



KWR 2022.011 | Augustus 2022

Praktijkonderzoek CoRe-Water-concept

Verkenning van een alternatief
zuiveringsconcept voor communaal
afvalwater

TKI Watertechnologie

Samenwerkingspartners



Rapport

Praktijkonderzoek CoRe-Water-concept

Verkenning van een alternatief zuiveringsconcept voor communaal afvalwater

KWR 2022.011 | Augustus 2022

Opdrachtnummer

402468

Projectmanager

Frank Oesterholt

Opdrachtgever

TKI Watertechnologie

Auteurs

Emile Cornelissen (KWR), Arnoud de Wilt (RHDHV), Danny Harmsen (KWR), Frank Oesterholt (KWR)

Kwaliteitsborger

Mirjam Blokker

Verzonden naar

Project partners TKI project (zie vorige blad)

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de resultaten zijn openbaar.

Keywords

Forward Osmosis, RWZI, waterhergebruik, EFGF, resource recovery

Jaar van publicatie
2022

Meer informatie
Ir. F.I.H.M. Oesterholt
T 0306069575
E frank.oesterholt@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

Augustus 2022 ©

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.

Samenvatting

Het CoRe-principe

CoRe staat voor “Concentrate, Recover and Reuse”. Het CoRe-Water-concept richt zich op het concentreren van rioolwater, het produceren van hoogkwalitatief water, het winnen van energie en het terugwinnen van resources. De sleuteltechnologie van dit nieuwe concept is Forward Osmosis (FO) waarmee in feite het zuiveringsproces wordt omgedraaid. Als eerste stap wordt namelijk schoon water geproduceerd van hoge kwaliteit door met een sterke zoutoplossing (draw solution) water te onttrekken aan het afvalwater. De afvalstoffen blijven achter in een geconcentreerde stroom met een 20 keer kleiner volume. Die geconcentreerde stroom kan vervolgens worden benut voor terugwinning van grondstoffen en voor energieproductie. Omdat de stroom geconcentreerd is, is de hypothese dat dit effectiever en efficiënter kan verlopen.

De partners in dit project hadden zich als hoofddoel gesteld het CoRe-Water-concept verder te ontwikkelen tot een nieuw modulair en adaptief concept voor de behandeling van communaal afvalwater. Onderdeel van het project was het ontwerp en bouw van een CoRe-pilot gericht op de combinatie FO-RO met een beoogde capaciteit van 2 m³/uur, een te realiseren flux van 5 liter per m² per uur en een concentratiefactor van 20. Het terugwinnen van resources uit het concentraat was geen onderdeel van de in dit onderzoek verrichte pilotstudies.

Voorbereidend pilotonderzoek en labtesten

Met een bestaande (kleinere) pilot is ervaring opgedaan op de RWZI Wehl (3 maanden) en bij een rioolwatergemaal in Leusden (1 maand). Die ervaringen waren van belang voor het ontwerp van de CoRe-pilot en de bedrijfsvoering daarvan. Naast de ervaringen met de combinatie FO-RO in de praktijk, is het FO-proces op kleine schaal onder goed geconditioneerde omstandigheden in het laboratorium onderzocht. Hierbij is vooral gekeken naar de mogelijkheden om de membraanvervuiling van de FO-membranen te beheersen via (een combinatie van) luchtwaterspoeling (AWF), osmotische terugspoeling (OBW) en chemische behandeling (CIP). Via een aantal deskstudies is meer inzicht verkregen in de meeste kritieke parameters van het CoRe-Water-Concept voor toepassing in de praktijk, in de belangrijkste kwaliteitseisen die bijvoorbeeld door de landbouw en industrie worden gesteld aan het geproduceerde water, en in de beste opties voor het terugwinnen van nutriënten uit het concentraat. De potentie voor biogasproductie uit het concentraat van het CoRe-Water-concept is op laboratoriumschaal onderzocht uitgaande van het concentraat van de pilot op de RWZI Wehl.

Ontwerp, bouw en commissioning CoRe-pilot.

Bij het ontwerp van de CoRe-pilot is gebruik gemaakt van de praktijkervaringen op RWZI Wehl en bij het Gemaal Leusden. Op grond daarvan is o.a. besloten om de FO-modules verticaal te positioneren zodat ze met een lucht/water-mengsel kunnen worden gespoeld. Daarnaast zijn de ervaringen van de labtesten meegenomen bijvoorbeeld gericht op de CIP-mogelijkheden van de CoRe-pilot. Na de bouw van de CoRe-pilot is de commissioning van de pilot uitgevoerd bij KWR in Nieuwegein, waarna de pilot is verplaatst voor onderzoek op de RWZI Roermond. Op die locatie zijn de prestaties van het concept getest met rioolwater na de voorbezinktank dat verder alleen via een zeeftrammel (40 µm) is voorbehandeld. De opstart van de pilot, de trouble-shooting en de bedrijfsvoering van de CoRe-pilot vormden een uitdaging qua complexiteit en inzet van menskracht. Er zijn gedurende twee periodes van telkens vijf weken testen uitgevoerd met het afvalwater waarbij onder andere de kwaliteit van het gevormde permeaat en concentraat zijn bepaald.

Technische en economische haalbaarheid van het concept

Op basis van de praktijktesten op de RWZI Roermond is vastgesteld dat Het CoRe-Water-concept in de huidige vorm met spiraalgewonden FO-membranen (SWFO-RO) technisch niet haalbaar is. De FO kan niet stabiel en met

een voldoende flux ($5 \text{ L/m}^2/\text{h}$) worden bedreven bij een relevante concentratiefactor (≥ 20). De voornaamste oorzaak hiervoor was een complexe combinatie van deeltjesvervuiling, organische vervuiling en biofouling als gevolg van onvoldoende voorbehandeling van het rioolwater. Verder bleek de concentratiefactor begrensd te zijn tot 20, vanwege de relatief hoge geleidbaarheid van het afvalwater van RWZI Roermond. De CoRe-pilot liet zien dat het concept wel een robuuste barrière vormt voor nutriënten (CZV, tot-N, tot-P, NH_4 en zouten) en een breed scala aan organische microverontreinigingen. De kwaliteit van het geproduceerde water (RO-permeaat) was zeer goed. Het CoRe-Water-concept in de huidige vorm (SWFO-RO) is economisch niet haalbaar. Uit de indicatieve vergelijking tussen het CoRe-Water-concept en een duurzame variant van de conventionele RWZI als referentiescenario blijkt dat zowel de stichtingskosten als operationele kosten van het CoRe scenario aanzienlijk hoger zijn (factor 4 tot 5 t.o.v. de referentie). De opbrengsten van CoRe zijn ook beduidend hoger, maar de meeropbrengsten zijn relatief gering.

Nieuw perspectief

Het CoRe-Water-concept is technisch haalbaar als vervuiling en verstopping kunnen worden beheerst. Een alternatief FO module-ontwerp biedt mogelijk een oplossing voor de vervuilingsgevoeligheid, het hoge energieverbruik en de hoge CAPEX/OPEX. In dit rapport is een nieuw CoRe-Water-concept voorgesteld uitgaande van een ondergedompeld systeem, waarbij de FO-membranen worden toegepast als ondergedompelde platen en/of door een capillair/tubulair FO (cap-FO/TFO) systeem en waarbij de voeding van binnen naar buiten wordt aangevoerd. Een dergelijk systeem is minder vervuilingsgevoelig, beter te reinigen, heeft minder energie nodig, is eenvoudiger qua ontwerp en de membranen zijn goedkoper dan de spiraalgewonden FO-membranen (SWFO). Voor dit nieuwe CoRe-Water-concept is inmiddels een octrooi aangevraagd. Deze cap-FO/TFO membranen laten het toe om het CoRe-concept te vereenvoudigen, zonder concessies te hoeven doen aan (minimale) voorbehandeling. De doelstelling van een vervolgproject zou vergelijkbaar zijn aan het huidige project (stabiele bedrijfsvoering te halen bij een flux van $5 \text{ L/m}^2/\text{h}$ bij een concentratiefactor van 20), waarbij de lessen uit het huidige project kunnen worden meegenomen. De vraag is of deze nieuwe cap-FO/TFO-membranen qua robuustheid ten aanzien van de verwijdering van nutriënten en organische microverontreinigingen vergelijkbaar of zelfs beter zijn dan de SWFO in het huidige project.

Het huidige CoRe-Water-concept (met SWFO-membranen) is mogelijk interessant voor het behandelen van minder vervuilende afvalwaterstromen (bv. in de industrie) waar een modulair en robuust systeem veel voordelen zou kunnen opleveren. Ook daarvoor is nog vervolgonderzoek nodig.

Inhoud

Samenwerkingspartners	2
Rapport	3
Samenvatting	4
Inhoud	6
1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding onderzoek	9
1.2 Het CoRe-Water-concept	10
1.3 Doelstelling van het onderzoek	11
1.4 Opzet onderzoek in hoofdlijnen	12
1.5 Consortium en taakverdeling	12
1.6 Leeswijzer	14
1.7 Dankbetuiging	14
2 Onderzoeksaanpak	15
2.1 Overzicht activiteiten	15
2.2 Overzicht onderzoeksvragen	17
3 Voorbereidende deskstudies	18
3.1 Verkennende technische en gevoeligheidsanalyse	18
3.1.1 Aanleiding	18
3.1.2 Doelstelling	18
3.1.3 Werkwijze	18
3.1.4 Resultaten	18
3.1.5 Conclusies	19
3.2 Eisen aan water- en concentraatkwaliteit	19
3.2.1 Aanleiding	19
3.2.2 Doelstelling	19
3.2.3 Werkwijze	19
3.2.4 Resultaten	19
3.2.5 Conclusies	20
3.3 Deskstudie naar mogelijkheden van nutriëntenterugwinning	20
3.3.1 Aanleiding	20
3.3.2 Doelstelling	21
3.3.3 Werkwijze	21
3.3.4 Resultaten	21
3.3.5 Conclusies	21
4 Laboratoriumtesten	23
4.1 Optimalisatie FO door laboratoriumonderzoek	23

4.1.1	Aanleiding	23
4.1.2	Doelstelling	23
4.1.3	Werkwijze	23
4.1.4	Resultaten	25
4.1.5	Conclusies	28
4.2	Laboratoriumonderzoek anaerobe vergisting concentraat	29
4.2.1	Aanleiding	29
4.2.2	Doelstelling	29
4.2.3	Werkwijze	29
4.2.4	Resultaten	30
4.2.5	Conclusies	31
5	Voorbereidend pilotonderzoek	32
5.1	Onderzoek locatie Wehl	32
5.1.1	Aanleiding	32
5.1.2	Doelstelling	32
5.1.3	Werkwijze	32
5.1.4	Resultaten	33
5.1.5	Conclusies	37
5.2	Onderzoek locatie Leusden (gemaal Leusden)	38
5.2.1	Aanleiding	38
5.2.2	Doelstelling	38
5.2.3	Methode en materialen	38
5.2.4	Resultaten	38
5.2.5	Conclusies	39
6	Praktijkonderzoek CoRe-pilot locatie RWZI Roermond	40
6.1	Aanleiding	40
6.2	Doelstelling praktijkonderzoek	40
6.3	Methode: beschrijving CoRe-pilot	40
6.3.1	Bedrijfsvoering FO-RO CoRe pilot	42
6.3.2	Beschrijving commissioning	43
6.3.3	Opstart CoRe pilot in Roermond	44
6.3.4	Onderzoeksopzet Roermond	45
6.4	Resultaten: operationele aspecten	49
6.4.1	Verloop eerste serie afvalwatertesten	49
6.4.2	Verloop tweede serie afvalwatertesten	49
6.5	Overzicht technische prestaties CoRe-pilot	49
6.5.1	Schoonwatertesten	49
6.5.2	Eerste serie afvalwatertesten	51
6.5.3	Tweede serie afvalwatertesten	52
6.5.4	Drukvalmetingen als indicatie voor systeemverstopping	54
6.6	Autopsie onderzoek	55
6.7	Overzicht resultaten kwaliteitsparameters CoRe-pilot	60
6.7.1	Geleidbaarheid	60
6.7.2	Retentie van CZV en ionen	60
6.7.3	Retentie van organische microverontreinigingen	63
6.8	Samenvatting CoRe pilotonderzoek RWZI Roermond	65

7	Evaluatie CoRe-Water-concept	67
7.1	Technische evaluatie	67
7.1.1	Aanleiding	67
7.1.2	Doelstelling	67
7.1.3	Technische evaluatie van CoRe-pilotonderzoek RWZI Roermond	67
7.1.4	Vergelijking tussen labonderzoek en pilotonderzoek te Wehl en Leusden	70
7.1.5	Conclusies technische haalbaarheid	71
7.2	Economische evaluatie	71
7.2.1	Aanleiding	71
7.2.2	Doelstelling	72
7.2.3	Methode en materialen	72
7.2.4	Resultaten	73
7.2.5	Conclusies	78
8	Discussie	79
8.1	Inleiding	79
8.2	Voorbehandeling	79
8.3	Energieverbruik	80
8.4	Vaste en variabele kosten	80
8.5	Een nieuw concept - Ondergedompelde FO platen en Capillaire FO	81
9	Conclusies en vervolgonderzoek	84
9.1	Conclusies	84
9.2	Vervolgonderzoek	85
10	Literatuur	87
11	Lijst met afkortingen	89
I	CIP procedures CoRe pilot Roermond	91
II	Analysepakketten	92
III	Bevindingen en analyseresultaten test met trommelzeef	93
IV	Retentie zouten/organica	97
V	Kengetallen CO₂-footprint	114

1 Inleiding

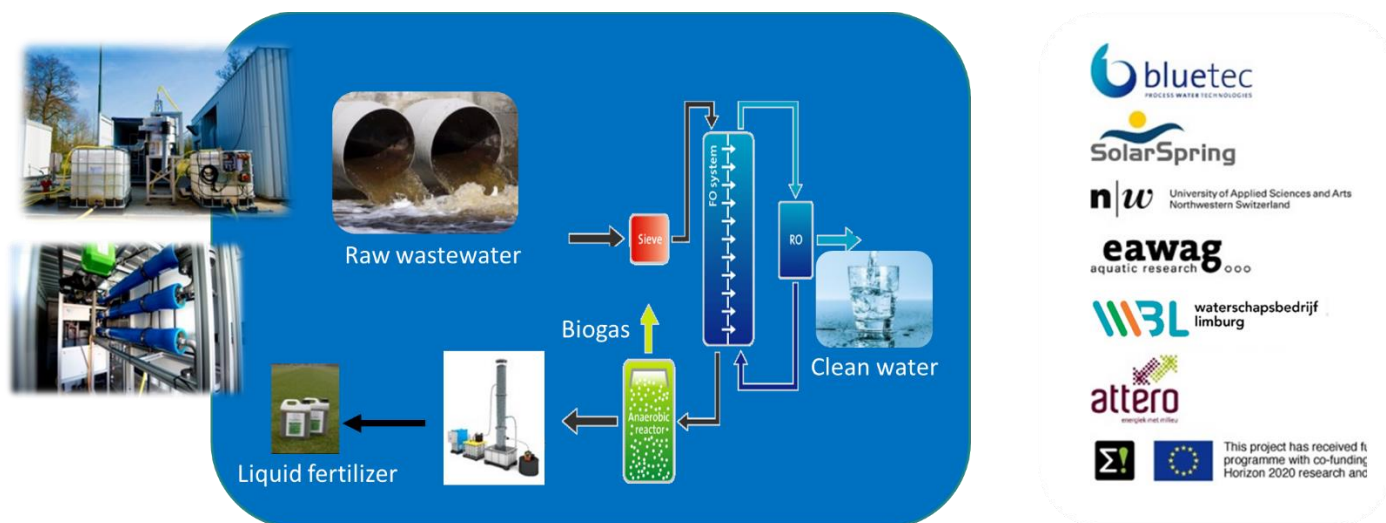
1.1 Aanleiding onderzoek

Afvalwater wordt niet langer beschouwd als een afvalproduct, maar als een bron van duurzame energie, grondstoffen en schoon water. Dit past in de maatschappelijke transitie naar een circulaire economie (Geissdoerfer, Savaget et al. 2017). De waterschappen werken aan een circulaire economie in de netwerkorganisatie Energie- en Grondstoffenfabriek (EFGF). Belangrijk voor de EFGF en de waterschappen is het ontwikkelen van kennis die de transitie naar een circulaire economie ondersteunt. Daarnaast zijn de waterschappen direct betrokken bij het vinden van oplossingen voor het probleem van opkomende stoffen zoals medicijnresten en andere organische microverontreinigingen uit rioolwater. Omdat deze verbindingen niet altijd volledig worden omgezet in bestaande rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) hebben ze een negatief effect op de oppervlaktewaterkwaliteit en het aquatisch milieu (Luo, Guo et al. 2014). Bovendien vormen ze een rechtstreekse bedreiging voor de drinkwaterbronnen die gebruik maken van oppervlaktewater. Andere ontwikkelingen die bepalend zullen zijn voor hoe we in de toekomst omgaan met rioolwater richten zich op de reductie van de emissie van broeikasgassen en het streven naar een modulair en adaptief zuiveringsconcept.

De uitdaging voor dit project is om te werken aan zowel verduurzaming en kosteneffectiviteit van de zuivering van rioolwater als aan een betere effluentkwaliteit (lees verwijdering van stikstof, fosfaat en microverontreinigingen). Bij het vernieuwende zuiveringsconcept CoRe-Water wordt afvalwater eerst geconcentreerd voordat het verder wordt behandeld. Sleuteltechnologie daarbij is Forward Osmosis (FO), voor de productie van schoon water zonder pathogenen, nutriënten en microverontreinigingen én met een veel geconcentreerdere afvalwaterstroom die veel efficiënter kan worden behandeld gericht op resource recovery en verwijdering van microverontreinigingen (Lutchmiah, Verliefe et al. 2014). FO wordt al toegepast in bijvoorbeeld de voedingsmiddelenindustrie en Zero Liquid Discharge (ZLD) toepassingen, echter nog niet op communaal afvalwater (Coday, Xu et al. 2014).

In de periode 2010 tot 2014 is door KWR fundamenteel onderzoek gedaan naar het direct scheiden van afvalwater met FO in het Sewer Mining Project (Lutchmiah, Verliefe et al. 2014). In 2017 is door BLUE-tec met succes een pilotinstallatie gebaseerd op FO gedraaid op de RWZI Simpelveld (zie Figuur 1-1). Deze pilot had een schaalgrootte van 0,2 m³/uur. Hierbij is een concentratiefactor voor rioolwater van 20 tot 30 gehaald. Tijdens het onderzoek op RWZI Simpelveld is er in het kader van het EUROSTARS project verkennend onderzoek gedaan naar biogasproductie en het terugwinnen van meststoffen uit het geconcentreerde afvalwater.

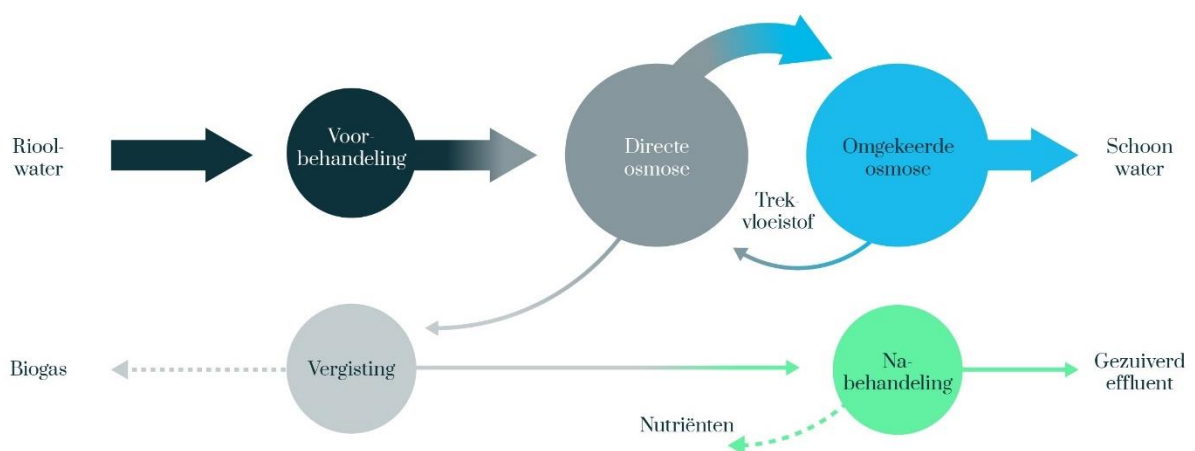
In maart 2018 hebben Waterschap Vallei en Veluwe, Waterschap Rijn en IJssel en Waterschapsbedrijf Limburg (WBL) samen met de partijen achter het CoRe-Water-concept een intentieverklaring getekend om gezamenlijk verder onderzoek te gaan uitvoeren naar het concept. In mei 2018 is het CoRe-Water project van start gegaan met ondersteuning vanuit TKI Watertechnologie.



Figuur 1-1 Project Eurostars: eerste pilot met het CoRe-Water-concept in Simpelveld in 2017

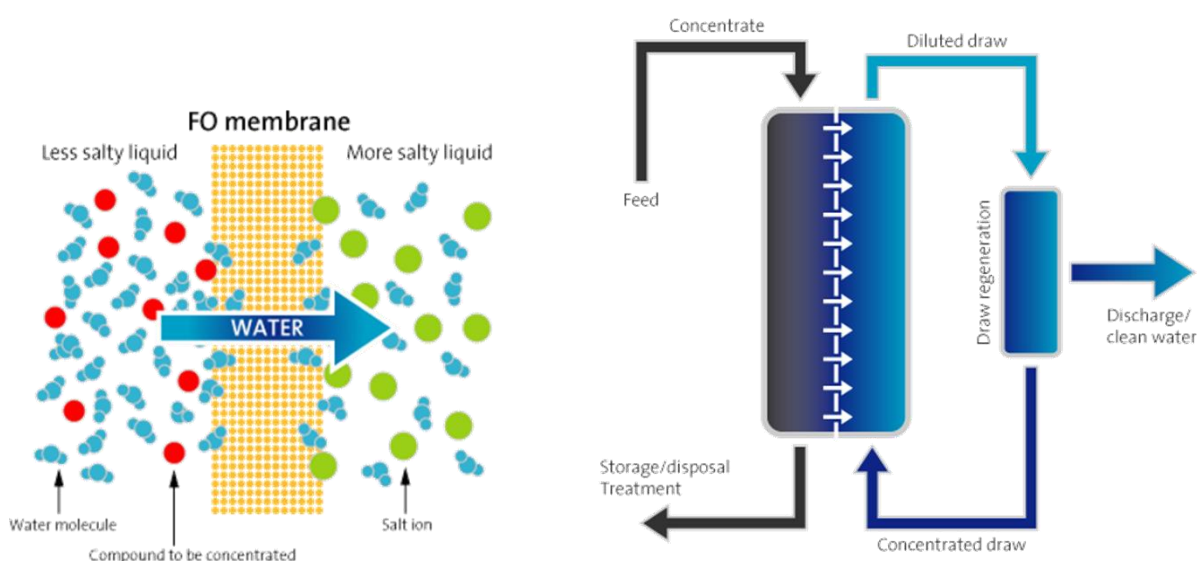
1.2 Het CoRe-Water-concept

CoRe staat voor “Concentrate, Recover and Reuse”. Het CoRe-Water-concept richt zich op het concentreren van rioolwater, het produceren van hoogkwalitatief water, het winnen van energie in de vorm van biogas en het terugwinnen van nutriënten zoals schematisch weergegeven in Figuur 1-2. De sleuteltechnologie van dit nieuwe concept is Forward Osmosis (FO) waarmee de facto het zuiveringsproces wordt omgedraaid. Als eerste stap wordt namelijk schoon water geproduceerd van hoge kwaliteit door met een sterke zoutoplossing (draw solution) water te onttrekken aan het afvalwater. De afvalstoffen blijven achter in een geconcentreerde stroom met een 20 tot 30 keer kleiner volume. Die geconcentreerde stroom kan vervolgens worden benut voor terugwinning van grondstoffen en voor energieproductie. Omdat de stroom geconcentreerd is, is de hypothese dat dit effectiever en efficiënter kan verlopen (Lutchmiah, Cornelissen et al. 2011).



Figuur 1-2 Principe van het CoRe-Water-concept: concentrate, recover and reuse

Forward Osmosis (FO) is een alternatief membraanproces, dat ook de potentie heeft om afvalwater direct te behandelen, waarbij water van hoge kwaliteit wordt geproduceerd. FO is een technische term die in feite het natuurlijke fenomeen van osmose beschrijft, namelijk het transport van watermoleculen over een semi-permeabel membraan. Het osmotische drukverschil is de drijvende kracht achter dat watertransport, in tegenstelling tot membraanprocessen die door hydraulische druk worden aangedreven. Bij FO wordt gebruikt gemaakt van een trekoplossing of 'draw solution' (DS) met een hogere osmotische potentiaal dan de voeding zodat een waterstroom wordt geïnduceerd (zie Figuur 1-3). Omdat de DS verdund raakt moet die worden geregenereerd door onder druk via omgekeerde osmose (RO) het water uit de DS te drukken. Door de dubbele passage van een semi-permeabele membraan (FO en RO) is het geproduceerde water in potentie van hoge kwaliteit (Cath, Childress et al. 2006).



Figuur 1-3 FO principe van Forward Osmosis (links) en regeneratie van de draw solution (DS) rechts

Het CoRe water concept is modulair en adaptief inzetbaar doordat de toegepaste membraantechnologie makkelijk schaalbaar is en de scheiding en het hergebruik van water direct lokaal kunnen worden uitgevoerd terwijl de concentraatbehandeling centraal plaatsvindt.

1.3 Doelstelling van het onderzoek

Hoofddoel van het project is het verder ontwikkelen van het CoRe-Water-concept tot een nieuw modulair en adaptief concept voor de behandeling van communale afvalwater. Daarbinnen kent het project de volgende subdoelen:

- Eerste verkennende technische en economische gevoeligheidsanalyse ter identificatie van de kritieke parameters op basis van bestaande ervaringen en literatuur;
- Ontwikkelen en verbeteren van de FO-stap op afvalwater tot een schaalgrootte van 2 m³/uur¹;
- Vaststellen van verschillende mogelijkheden voor de concentraatbehandeling inclusief terugwinnen van waardevolle componenten;
- Bepalen van de verwijderingsgraad van nutriënten en organische micro's;
- Bepalen van de impact op broeikasgasemissies;

¹ De technische uitvoeringsvorm is een combinatie van FO en RO. De uitdagingen liggen echter voornamelijk op het vlak van de FO-stap en vormt de focus van het onderzoek. De RO membranen worden in dit rapport alleen beschreven als het gaat om de waterkwaliteitsverbetering.

- Bepalen van het toepassingspotentieel van de schoonwaterstroom en de teruggewonnen componenten;
- Inzicht in de belangrijkste kansen en beperkingen van het CoRe-Water-concept inclusief inzicht in de technische en economische haalbaarheid.

Concreet waren de belangrijkste ambities bij de start van het onderzoek:

- Opschalen tot een pilot met een capaciteit van 2 m³/uur;
- Realiseren van een flux van 5 LMH (l per m² per uur);
- Realiseren van een concentratiefactor van 20 tot 30.

1.4 Opzet onderzoek in hoofdlijnen

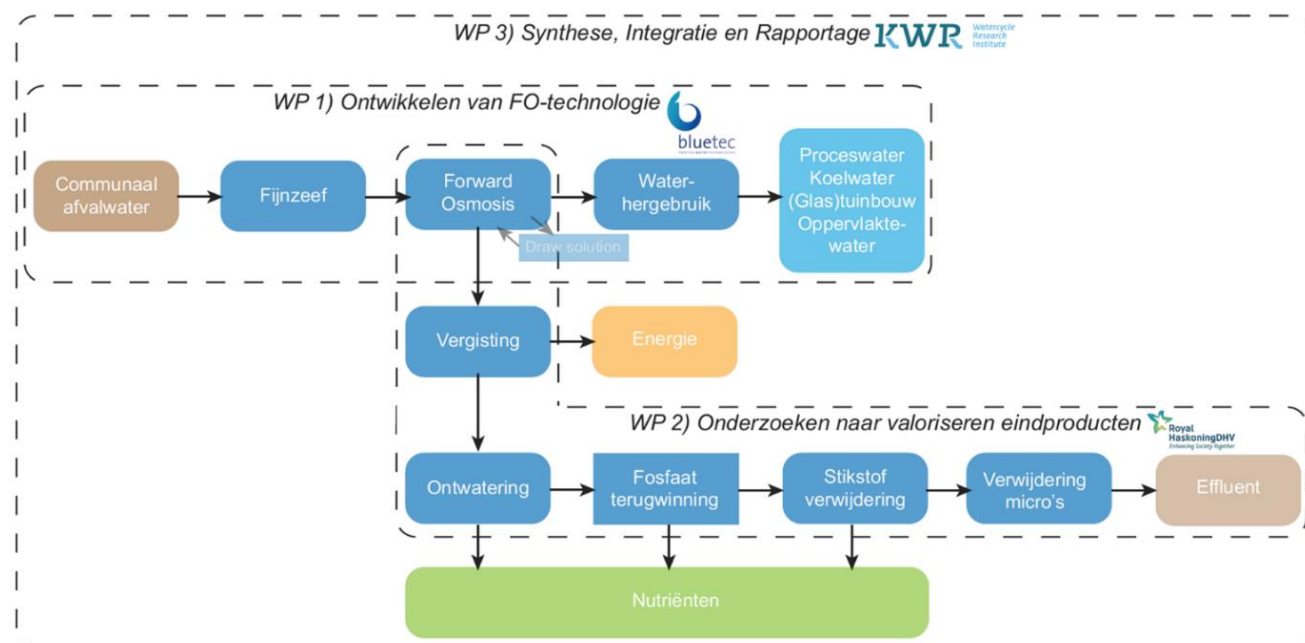
De gemeenschappelijke en centrale doelstelling is een succesvolle doorontwikkeling van de technologie – met name de FO – tot het gewenste schaalniveau. Dit vormt een cruciale stap, en beslaat het grootste deel van de projectactiviteiten.

Het project kent drie werkpakketten (WP):

WP 1) Ontwikkelen van FO-technologie (WP-leider BLUE-tec)

WP 2) Onderzoek naar valoriseren van de eindproducten (WP-leider RHDHV)

WP 3) Synthese, integratie, rapportage, disseminatie en projectmanagement (WP-leider KWR)



Figuur 1-4 Overzicht van de werkpakketten en de activiteiten binnen de werkpakketten voor het CoRe-Water project

1.5 Consortium en taakverdeling

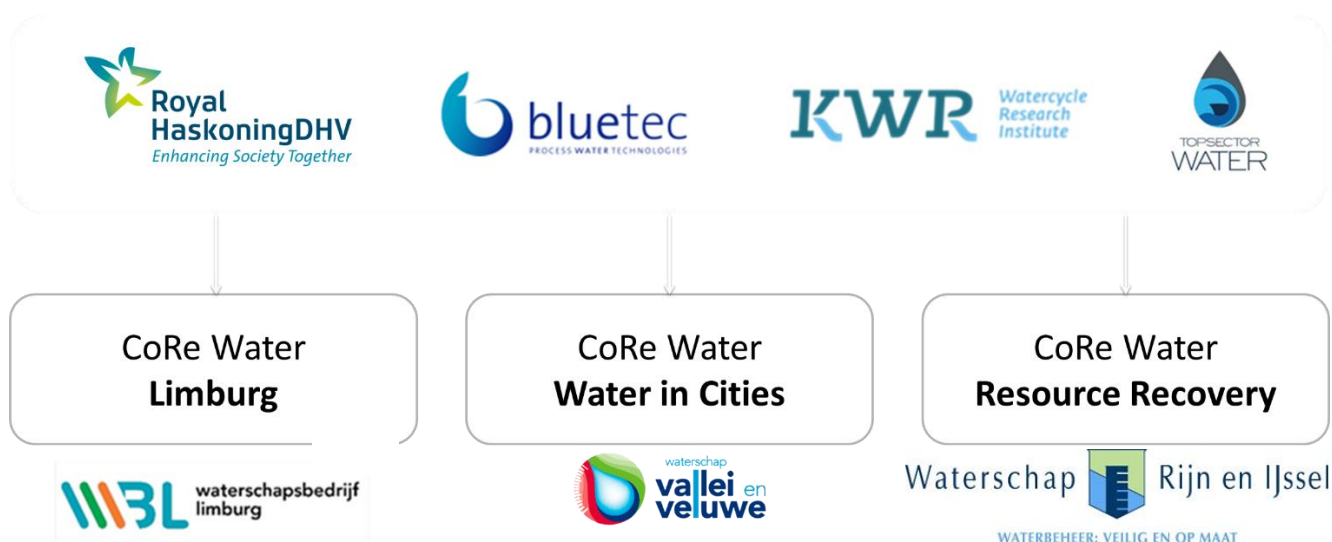
Royal HaskoningDHV (RHDHV), BLUE-tec en KWR vormen de onderzoekspartners in dit project. RHDHV heeft door jarenlange advisering aan de waterschappen als ingenieursbureau veel kennis van doorvertaling van nieuwe concepten naar de praktijk. In dit project is RHDHV vooral verantwoordelijk geweest voor het in beeld brengen van de economische en technologische potentie van het CoRe-water project. BLUE-tec is een leverancier voor FO-technologie in Nederland en heeft praktijkervaring opgedaan met de toepassing op afvalwater. In dit project was

BLUE-tec verantwoordelijk voor het ontwerp en (uitbestede) bouw van de CoRe-pilot. De basis van het CoRe-Water-concept ligt o.a. in een eerder funderend onderzoek bij KWR, zoals het Sewer Mining project (2010-2014). KWR was in dit project penvoerder en verantwoordelijk voor het projectmanagement, de inkoop van pilotonderdelen en het in beeld brengen van de behandelingsopties en afzetmogelijkheden voor het concentraat. Allied Waters werkt als KWH-dochter aan het valoriseren van innovatieve concepten in de stedelijke waterketen, uiteindelijk gericht op internationale markten. CoRe-Water vormt een van die mogelijke concepten (zie www.alliedwaters.com), waarin met BLUE-tec en RoyalHaskoningDHV werd samengewerkt.

Een projectgroep bestaande uit vertegenwoordigers van alle partners heeft de inhoudelijke uitvoering van het project bewaakt. Daarnaast heeft een stuurgroep, eveneens met vertegenwoordigers van alle partners, de voortgang van het project inhoudelijk én financieel bewaakt.

In potentie kan het CoRe-Water-concept leiden tot een revolutie op het gebied van rioolwaterzuivering. De partners in het CoRe-Water project spelen een sterk complementaire rol, zowel als het gaat om het ontwikkelen en toepassen van technologie als bij het valoriseren van de eindproducten. Wat dit laatste betreft speelt de vraagsturing vanuit de deelnemende waterschappen een belangrijke rol en zijn er verschillende accenten te onderscheiden (zie ook Figuur 1-5):

- Waterschap Vallei en Veluwe is geïnteresseerd in hoe de gezuiverde waterstroom nuttig kan worden ingezet in het stedelijk waterbeheer, bijvoorbeeld voor het verbeteren van de oppervlaktewaterkwaliteit in de stad.
- Waterschap Rijn en IJssel richt zich op het verwaarden van componenten uit de concentraatstroom en de lokale benutting vanuit de circulaire economiegedachte.
- Waterschapsbedrijf Limburg heeft interesse in de opschaling van de technologie en is geïnteresseerd in de mogelijkheden om het geproduceerde water - als alternatieve zoetwaterbron - toe te passen bij de industrie en landbouw in de regio. Bij voorkeur wordt daarbij verbinding gemaakt met het door WBL ontwikkelde Verdygo-concept.



Figuur 1-5 Verschillend invalshoeken voor de waterschappen in het CoRe-Water project

1.6 Leeswijzer

Dit rapport is opgebouwd uit vier delen. Het eerste deel (hoofdstukken 1 en 2) bevat een inleiding op het CoRe-Water-concept en een gedetailleerde beschrijving van de onderzoeksopzet. Het tweede deel (hoofdstukken 3, 4 en 5) geeft een beknopte samenvatting van de voorbereidende deskstudies, laboratoriumtesten en het voorbereidend pilotonderzoek op locatie in Wehl en Leusden. Over deze onderwerpen is binnen het project al separaat gerapporteerd via onderstaande deelrapportages.

Het derde deel (hoofdstuk 6) bevat een uitgebreide beschrijving van de ervaringen en resultaten van de inbedrijfname, schoonwatertesten en afvalwatertesten met de CoRe-pilot die als onderdeel van dit project is ontworpen en gebouwd. Het vierde een laatste deel (hoofdstukken 7,8 en 9) omvat de technische en economische evaluatie van het concept aangevuld met de discussie, de conclusies en aanbevelingen.

Bij het opstellen van dit document is gebruik gemaakt van de volgende deelrapportages:

- Rapportage pilot Wehl: *Report WP 1.4 Forward osmosis treatment of municipal wastewater. Pilot results Wehl.* (BLUE-tec)
- Rapportage pilot Leusden: *Report WP 2.1 Forward Osmosis pilot tests on untreated wastewater in Leusden.* (BLUE-tec)
- Notitie CoRe-Water – WP2, act 1b, Deskstudie bruikbaarheid water voor industrie en landbouw. BF8664-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0001 Oktober 2019 (RHDHV)
- Notitie CoRe-Water Uitgangspunten variantenstudie, energiebalans en gevoeligheidsanalyse. BF8664-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0001 Oktober 2019 (RHDHV)
- Notitie CoRe-Water – WP1 Act 1a Verkennende gevoeligheidsanalyse. BF8664-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0001 Oktober 2019 (RHDHV)
- KWR 2019.112 FO labonderzoek 2019 (KWR)
- KWR 2020.012 Anaerobic digestion of concentrated municipal waste water (KWR)
- KWR 2021.079 Ammoniumverwijdering in het CoRe-Water-concept (KWR)
- KWR 2021.024 Nutrient Recovery Perspectives from the CoRe-Water-concept (KWR)

1.7 Dankbetuiging

Onze dank gaat uit naar de drie waterschappen voor het hosten van de pilots in Wehl, Leusden en Roermond. In het bijzonder zijn we de medewerkers van WBL erkentelijk voor het gedurende lange tijd hosten en begeleiden van de grote CoRe-pilotinstallatie in de periode van september 2020 tot januari 2022.

2 Onderzoeksaanpak

2.1 Overzicht activiteiten

Werkpakket 1 richtte zich op het verder ontwikkelen van de FO-technologie als onderdeel van het CoRe-Water-concept. Hoofdactiviteit was het ontwerpen, bouwen en testen van een pilotinstallatie met een beoogde capaciteit van 2 m³/uur (CoRe-pilot). Voor het vaststellen van de ontwerpparameters en ontwerpvereisten (ten aanzien van de reiniging e.d.) is om te beginnen reeds beschikbare kennis geïnventariseerd, maar is daarnaast labonderzoek uitgevoerd met een speciaal voor dit onderzoek ontwikkelde labschaalopstelling (bench scale) met twee parallel geschakelde vlakke membraan cross flow FO-modules. Hierbij is vooral gekeken naar de benodigde voorbehandelingstechniek en effectiviteit van verschillende reinigingsmethoden. Verder zijn met een al bestaande pilot van BLUE-tec (BT-pilot, capaciteit 0,2 m³/uur) testen uitgevoerd op twee locaties vooral gericht op het opdoen van praktijkervaring en het verzamelen van procesgegevens over water/zoutflux, aangroei-/verstoppingsgedrag, alsmede het testen van reinigingsmethoden waaronder het effect van luchtwaterspoeling (air water flush, AWF) bij een verticaal opgestelde FO-module (Cornelissen, Vrouwenfelder et al. 2007).

In detail was de aanpak van het onderzoek in WP1 als volgt:

Activiteiten WP1	Deliverable
Vaststellen kritieke parameters met betrekking tot het CoRe-water concept en vastleggen van de belangrijkste uitdagingen voor het project.	Eerste verkennende gevoeligheidsanalyse
Vaststellen algemene eisen aan de kwaliteit van het geproduceerde water en concentraat.	Eisen water- en concentraatkwaliteit
Labonderzoek met parallelle FO lab-opstellingen. Focus op prestatie-indicatoren gekoppeld aan membraan-autopsieonderzoek in relatie tot voorbehandelingstechniek.	Selectie optimale voorbehandeling voor pilotonderzoek
Vergelijkend labonderzoek met vervuilde FO membranen (uit lab en pilot)	Selectie optimale reinigingsprocedure voor pilotonderzoek
Uitvoering testen met BT-pilot (200 L/h) gedurende drie maanden in Wehl (WRIJ). Inclusief onderzoek AMS, ammoniakterugwinning vanuit draw-loop	Praktijkervaring met BT-pilot
Monitoring NH ₄ /OMV in voeding, drawloop en permeaat voor massabalans.	Kennis over transport en beheersing ophoping van ammonium/OMV in CoRe-Water-concept
Vaststellen ontwerpparameters voor opschaling en constructie van de grote CoRe-pilot uitgaande van bestaande kennis en ervaringen.	Parameters voor opschaling en constructie grote pilot
Ontwerp en bouw CoRe-pilot (2 m ³ /h)	Realisatie Pilot (2 m ³ /h)
Uitvoering pilottesten (2 m ³ /h) gedurende 1 jaar bij WBL	Praktijkervaring met CoRe-pilot

Het onderzoek binnen werkpakket 2 was gericht op het valoriseren van de eindproducten. Hierbij gaat het in de eerste plaats om de kwaliteitsaspecten van het via FO geproduceerde water. Via een deskstudie is gekeken naar de eisen die aan het water worden gesteld bij afzet van het water bij de industrie of in de landbouw. Er is een variantenstudie opgezet waarmee uiteindelijk verschillende varianten van het CoRe-water concept zijn doorgerekend, van kleine schaal (lokale afzet van water) tot grote schaal (RWZI) in verschillende situaties. Daarnaast is praktisch onderzoek gedaan naar de mogelijkheden voor verwerking van het geconcentreerde afvalwater, onder andere naar het effect van verhoogde zoutconcentraties (via zoutlek uit de draw solution) op de biogasvorming voor de situatie dat de geconcentreerde stroom anaeroob zou worden nabehandeld. Ten slotte is een deskstudie uitgevoerd naar de mogelijkheden voor het terugwinnen van nutriënten uit het geconcentreerde afvalwater. In detail was de aanpak in WP2 als volgt:

Activiteiten WP2	Deliverable
Pilottesten (200 L/h) voor de aanvulling van oppervlaktewater bij een rioolgemaal in Leusden	Waterkwaliteit geproduceerd schoon FO-water
Deskstudie naar bruikbaarheid van water voor industrie en landbouw.	Overzicht van specifieke eisen aan de waterkwaliteit van het FO-water
Technologische variantenstudie	Behandelingsopties en afzetmogelijkheden producten uit concentraat
Labonderzoek naar biogasvorming in concentraat d.m.v. digestie. Effecten van zoutlek uit draw solution op biogasvorming.	Inzicht in energieproductie uit ingedikt afvalwater
<i>Deskstudie naar energiebalans CoRe-Water-concept</i>	<i>Energiebalans FO</i>
Deskstudie terugwinning nutriënten	Inzicht in mogelijkheden nutriënten terugwinning
<i>Deskstudie naar de reductie van de N₂O emissie en inventarisatie van andere milieuvoordelen</i>	<i>Inzicht in de milieuvoordelen van het CoRe-Water-concept .</i>

Werkpakket 3 betreft de synthese, integratie, rapportage, disseminatie en projectmanagement. In detail was de aanpak in WP3 als volgt:

Activiteiten	Deliverable
Wrap-up project resultaten Technische en financieel-economische evaluatie	Potentie van het FO-concept
Rapporteren	Eindrapport
<i>Workshop/publiciteit rondom start bouw en onderzoek CoRe-pilot</i>	Disseminatie

Van de genoemde activiteiten in bovenstaande tabellen zijn de cursiefgedrukte niet of slechts gedeeltelijk uitgevoerd.

2.2 Overzicht onderzoeksvragen

Onderzoeksvragen CoRe-Water gericht op het ontwikkelen van en het bepalen van de prestaties van het FO-concept:

1. Wat zijn de meest kritieke parameters met betrekking tot het CoRe-water-concept die van belang zijn voor het ontwerp van de pilotsystemen en waar liggen de belangrijkste uitdagingen voor het concept?
2. Wat is een passende voorbehandeling om verstopping te voorkomen en om membraanvervuiling te verminderen?
3. Wat is het dominante type membraanvervuiling bij FO?
4. Wat is de optimale reinigingsprocedure voor het reinigen van de FO-membranen om de vervuiling te beheersen, en welke rol kan een osmotische terugspoeling of osmotic backwash (OBW) daarbij spelen?
5. Hoe moet het ontwerp van de CoRe-pilot worden geoptimaliseerd op het punt van schakeling van de FO-elementen, tweefasestroming in de FO-elementen, interne recirculatiestromen en optimalisatie van het terugwinsysteem om tot een hogere indikkingsfactoren te komen.
6. Hoe omvangrijk is de opname van ammonium in de draw-solution en hoe kan hier op een effectieve manier mee worden omgegaan?
7. Wat zijn de mogelijkheden voor het terugwinnen van ammonium uit de draw loop?
8. Wat is het retentiegedrag van organische microverontreinigingen (OMV) door FO membranen en door het terugwinproces (via RO)?

Onderzoeksvragen CoRe-Water gericht op het valoriseren van eindproducten:

9. Wat is de kwaliteit van het geproduceerde FO-water en voor welke gebruiksdoeleinden is het geschikt?
10. Hoe kan de geconcentreerde afvalwaterstroom het best behandeld worden voor optimale energie- en grondstoffenwinning?
11. a. Wat levert het concentreren van de afvalwaterstroom op met betrekking tot biogasvorming in een nageschakelde anaerobe vergisting? b. En wat zijn de gevolgen van een zoutlek vanuit de draw-solution naar het afvalwater en wat zijn de mogelijke gevolgen daarvan voor de anaerobie?
12. Hoe verhoudt zich de energiebalans van het concept tot de conventionele behandeling van rioolafvalwater?
13. Welke aspecten zijn bepalend bij de winning van nutriënten (biostimulanten)? Waar en hoe kunnen de meststoffen (N en P) het best verkregen worden? Wat is de kwaliteit van die meststoffen en wat zijn de mogelijkheden voor verwaarding?

Onderzoeksvragen CoRe-Water gericht op valorisatie van het concept?

14. Wat is de potentie van het CoRe-Water-concept voor toepassing in de praktijk? En hoe past dit bij de ambities van de deelnemende waterschappen.
15. Wat zijn de kritieke parameters voor de technische haalbaarheid van het concept?
16. Wat zijn de kritieke parameters voor de economische haalbaarheid van het concept?

3 Voorbereidende deskstudies

3.1 Verkennende technische en gevoeligheidsanalyse

3.1.1 Aanleiding

In het CoRe-Water project zijn verschillende activiteiten (gevoeligheidsanalyse (WP1), variantenstudie voor behandeling van het concentraat en de afzetmogelijkheden (WP2), energiebalans van het CoRe-Water-concept (WP2), de reductie van broeikasgassen door middel van het CoRe-Water-concept (WP2) uitgevoerd waarbij telkens dezelfde uitgangspunten zijn gehanteerd. Om deze reden zijn deze uitgangspunten eenmalig vastgesteld in de notitie '*Uitgangspunten variantenstudie, energiebalans en gevoeligheidsanalyse*'.

3.1.2 Doelstelling

Het vaststellen van de uitgangspunten en het opstellen van een werkwijze om een verkenning en vergelijking mogelijk te maken tussen het CoRe-Water-concept en een conventioneel systeem.

3.1.3 Werkwijze

Voor elke activiteit is vastgesteld wat vereist is om de activiteit uit te voeren en is een werkwijze opgesteld voor genoemde activiteit. De werkwijze voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse was als volgt. Er is literatuuronderzoek gedaan waarbij de meest recente literatuur is meegenomen en tevens is kennis uitgewisseld met FO experts. Hieruit is gestedilleerd wat de belangrijkste aandachtspunten zijn die van invloed zijn op de technische en de economische aspecten van het CoRe-Water-concept.

3.1.4 Resultaten

In de variantenstudie zijn verschillende varianten van het CoRe-Water-concept doorgerekend. De door te rekenen varianten zijn vastgelegd in het projectgroepoverleg van 18 februari 2019. De volgende uitkomsteenheden zijn hier ook vastgelegd:²

- Euro/i.e.150, verwijderd
- Euro/m³_{schoon water}
- kWh/i.e.150, verwijderd
- kWh/m³_{schoon water}
- CO₂-eq/i.e.150, verwijderd
- m² grondoppervlak/ i.e.150 verwijderd

Op grond van deze uitkomsteenheden is de variantenstudie doorgerekend van kleine tot grote schaal in verschillende situaties.

Bij de energiebalans, waarbij zowel het elektriciteitsverbruik als de warmtebalans wordt bedoeld, wordt uitgegaan van de eenheden van de variantenstudie: kWh/i.e.150, verwijderd en kWh/m³_{schoon water}. De eerste eenheid zal worden vergeleken met het energieverbruik van een conventionele zuivering. De tweede eenheid wordt berekend op basis van het extra benodigde energieverbruik van de FO/RO-unit ten opzichte van het energieverbruik van een conventionele zuivering.

De broeikasgasemissie wordt teruggerekend naar CO₂-eq/i.e.150, verwijderd, zodat een vergelijking gemaakt kan worden tussen een conventioneel zuiveringsconcept en een 'CoRe-Water zuiveringsconcept'.

² Notulen van projectgroepoverleg van 18 februari 2019, kenmerk BF8664-RHD-ZZ-XX-MI-Z-0001

3.1.5 Conclusies

In deze verkenning voor de technische- en gevoeligheidsanalyse is vastgesteld welke uitgangspunten gehanteerd worden en is er een werkwijze opgesteld voor de benodigde activiteiten: de gevoeligheidsanalyse, de variantenstudie voor behandeling van het concentraat en de afzetmogelijkheden, energiebalans van het CoRe-Water-concept en de reductie van broeikasgassen door het CoRe-Water-concept.

3.2 Eisen aan water- en concentraatkwaliteit

3.2.1 Aanleiding

Een belangrijk aspect van het CoRe-Water-concept is de mogelijkheid tot hergebruik van het geproduceerde schone water (permeaat). Voor afzet in de industrie, landbouw, lozing op oppervlaktewater of infiltratie in de bodem van deze schone waterstroom dient inzicht te worden verkregen in de eisen waaraan het filtraat dient te voldoen. Hierover is uitgebreid gerapporteerd in de Deskstudie *Bruikbaarheid water voor industrie en landbouw*, kenmerk BF8664-RHD-WP2-Act 1b definitief, 8 oktober 2019.

3.2.2 Doelstelling

Vaststellen van de eisen aan het filtraat en het permeaat waarop getoetst zal worden in de pilot.

3.2.3 Werkwijze

Gedurende brainstormsessies met de waterschappen is geïnventariseerd welke routes het meest interessant zijn voor eventuele afzet van het FO/RO permeaat. Vervolgens zijn met diverse potentieel kansrijke afnemers gesprekken gevoerd. Daarnaast zijn de huidige permeaatkwaliteit en de gewenste waterkwaliteit voor de verschillende mogelijke toepassingen gekwantificeerd. Indien het permeaat van de FO/RO installatie niet voldoet aan de gestelde eisen voor verschillende industriële toepassingen is een overzicht gegeven worden van behandelingsmogelijkheden om wel aan de gestelde eisen te kunnen voldoen.

3.2.4 Resultaten

De volgende afzetroutes bleken kansrijk: glastuinbouw en afzet in de industrie. Omdat de gewenste waterkwaliteit zeer teeltspecifiek is, en er maar voor 5 tot 6 maanden per jaar behoefte is aan een andere waterbron is besloten om de afzet naar de glastuinbouw buiten beschouwing te laten. Om de afzet in de industrie nader te verkennen zijn gesprekken gevoerd met Utility Service Group (USG) van Chemelot en Evilim Industriewater. Tijdens bezoeken bij deze industrieën is geïnventariseerd voor welke toepassingen het FO/RO permeaat toegepast zou kunnen worden en wat de bijbehorende eisen zijn.

In gesprekken met USG en Evilim zijn diverse mogelijke toepassingen van het permeaat geïdentificeerd en welke eisen aan deze toepassingen voor het water worden gesteld. Hieruit volgt dat de kwaliteit van het permeaat van de 1e concentratiestap van de FO/RO installatie alleen voldoende is voor eventueel gebruik als koelwater en niet voldoet aan de eisen voor halffabricaat voor stoomketelwater en stoomketelwater/demiwater. Een aandachtspunt hierbij is nog wel dat de acceptabele ammoniumconcentratie voor koelwater (nog) niet bekend is. Mogelijk is de ammoniumconcentratie van het permeaat, vastgesteld op 15 tot 40 mg NH₄-N/l tijdens de pilottesten in Wehl (zie paragraaf 5.1), te hoog om het permeaat in te kunnen zetten als koelwater. Daarnaast is voor het gebruik als koelwater het chloridegehalte een aandachtspunt in verband met corrosie. Voor de uitgebreide vergelijking van kwaliteitsparameters, zie de tabel in 'Deskstudie bruikbaarheid water voor industrie en landbouw'.

Voor lozing op oppervlaktewater en infiltratie in de bodem zijn vooral ammonium- en fosfaatconcentraties van belang in verband met de Kader Richtlijn Water (KRW) doelen. De fosfaatconcentraties in het FO/RO-permeaat is voldoende laag voor lozing op oppervlaktewater of infiltratie in de bodem. De ammoniumconcentratie is echter te

hoog. Ook wanneer al het ammonium omgezet zou zijn naar nitraat mag het niet worden geloosd op oppervlaktewater. Er dient dus te allen tijde nog een extra behandelingsstap uitgevoerd te worden om het ammoniumgehalte (danwel stikstofgehalte) in het permeaat te verlagen. Mogelijke behandelingen zijn additionele RO zuiveringsstap, ionenwisselaar, elektrodialyse en actiefkoolfiltratie.

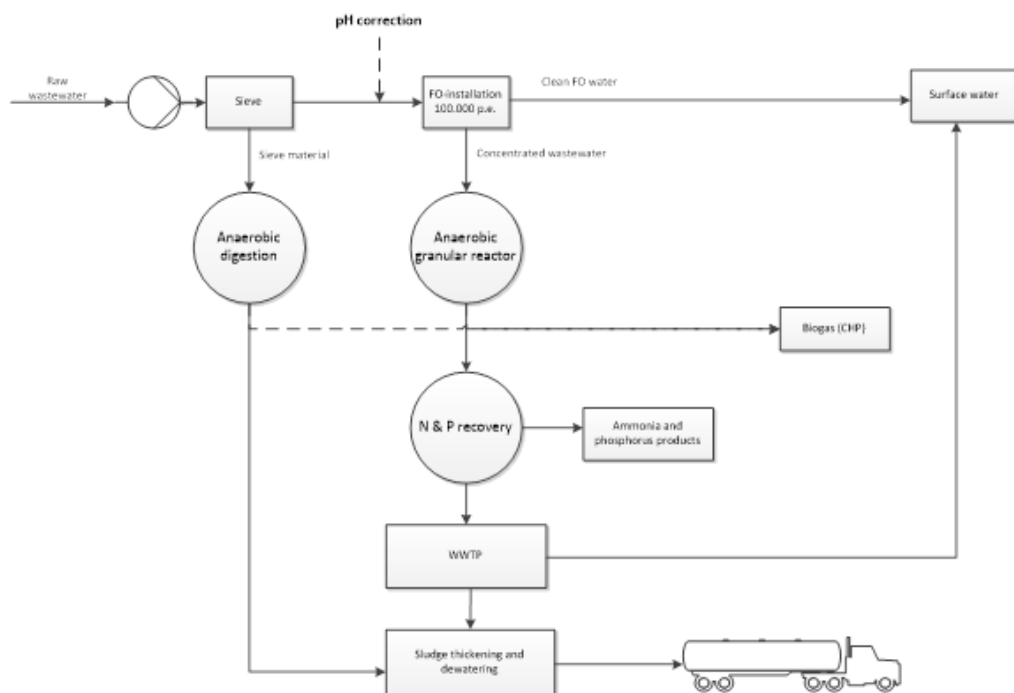
3.2.5 Conclusies

Het permeaat uit de FO-RO installatie voldoet op vrijwel alle parameters aan de eisen voor gebruik als koelwater, alleen het ammoniumgehalte verdient wel nadere evaluatie. Uit de bureaustudie komt naar voren dat dit gehalte mogelijk te hoog is. Voor hoogwaardiger toepassingen zoals halffabricaat voor stoomketelwater, demiwater, lozing op oppervlaktewater of infiltratie in de bodem is een extra behandelingsstap vereist om het ammoniumgehalte verder te verlagen.

3.3 Deskstudie naar mogelijkheden van nutriëntenterugwinning

3.3.1 Aanleiding

De energiebalans van gecentraliseerde gemeentelijke afvalwaterzuiveringen kan in algemene zin worden verbeterd door het afvalwater te concentreren om energiepositieve zuiveringsinstallaties te bereiken, waarbij in de literatuur verschillende concentratietechnieken zijn voorgesteld (Verstraete, Van de Caveye et al. 2009, Jenicek, Kutil et al. 2013). Door het toepassen van concentratietechnieken wordt een hoog belaste organische stroom gegenereerd en kan direct anaerobe behandeling worden toegepast om methaan te produceren. Bij het CoRe-Water-concept wordt afvalwater eerst tot een factor 20 geconcentreerd door middel van Forward Osmosis met als hoofddoel het terugwinnen van water met hoge kwaliteit. Het idee is dat de geconcentreerde stroom vervolgens in verschillende stappen wordt gezuiverd (zie Figuur 3-1). Na anaerobe behandeling biedt de geconcentreerde stroom (en de productie van biogas) in potentie goede mogelijkheden voor een optimale terugwinning van stikstof (N) en fosfaat (P) als nutriënten. Dit past in de ambitie van Waterschap Rijn en IJssel voor de lokale terugwinning van 'biobased' meststoffen.



Figuur 3-1 Schematische voorstelling CoRe-Water-concept. pH correctie indien nodig, directe lozing van schoon FO water op oppervlaktewater indien water niet wordt hergebruikt.

3.3.2 Doelstelling

In deze deskstudie is - als onderdeel van het CoRe-Water project- specifiek gekeken naar de mogelijkheden die het concept biedt als het gaat om terugwinning van nutriënten. Hierbij is gebruik gemaakt van de (op dat moment beschikbare) resultaten van de BT-pilot testen die zijn uitgevoerd in Wehl en Leusden (zie paragraaf 5.1 en 5.2).

Doel van de deskstudie is om meer inzicht te krijgen in geschikte technologieën voor de terugwinning van nutriënten waarmee het CoRe-Water-concept kan worden gekoppeld aan de doelstellingen voor de productie van 'biobased' meststoffen. Deze deskstudie is uitgebreid beschreven in KWR-rapport 2021.024 *Nutrient Recovery Perspectives from the CoRe-Water-concept*.

3.3.3 Werkwijze

De resultaten van de BT-pilots in Wehl en Leusden zijn gebruikt om de gehalten van ortho-fosfaat en ammonium in het geconcentreerde afvalwater na anaerobe behandeling te schatten. Uitgangspunt daarbij is dat door de anaerobe behandeling (vergisting) het organisch gebonden N en P zal worden omgezet naar ammonium en ortho-fosfaat. Daarbij wordt het volgende opgemerkt. Ten eerste zijn naast de geconcentreerde afvalwaterstroom ook de reinigingsvloeistoffen die vrijkomen bij het reinigen van de FO-membranen (CIP-reiniging) meegenomen in de berekening. Ten tweede blijkt ammonium (als klein molecuul) te accumuleren in de draw solution doordat FO-membranen een iets opener structuur hebben dan RO-membranen. Uiteindelijk ontstaat daarbij een evenwichtssituatie waarbij een substantieel aandeel (ongeveer 20 %) van het ammonium in het RO-permeaat terecht komt. Ten derde is in de berekening uitgegaan van een (beoogde) concentratiefactor (CF) van 20 voor de CoRe-pilot in Roermond. Dit leidt tot het uitgangspunt voor deze deskstudie dat in het geconcentreerde afvalwater na anaerobe behandeling (in de voeding naar terugwintertechnieken) rekening moet worden gehouden met gehalten van 640 mg/l $N_{Kjeldahl}$ en 111 mg/l P_{totaal} .

Vervolgens is via literatuurstudie een overzicht gemaakt van terugwinningstechnieken voor N en P. Op basis daarvan is vervolgens per techniek een inschatting gemaakt van de technologische en economische potentie.

3.3.4 Resultaten

Bij het geschatte ammoniumgehalte ($< 1,0 \text{ g NH}_4/\text{l}$) zal strippen van ammoniak door toepassing van thermische of alkalische technieken, of combinaties daarvan, technisch en economisch niet haalbaar zijn.

Aangezien struvietprecipitatie haalbaar is bij P-concentraties van meer dan 100 mg/l, en het momenteel de rijpere technologie is met reeds verscheidene toepassingen op grote schaal, zou het geconcentreerde afvalwater in de eerste plaats kunnen worden onderworpen aan fosfaatterugwinning door middel van struvietprecipitatie (De-Bashan and Bashan 2004). In dit proces zal ongeveer 10% van het ammonium worden vastgelegd, zodat voor de overige 90% een concentratietechnologie nodig is voor de verdere stikstofterugwinning.

Elektrodialyse zou kunnen worden gebruikt om ammonium uit het effluent van de struvietprecipitatie verder te concentreren tot een bruikbaar product voor bemesting. Hierbij is van belang dat een voeding met hoge geleidbaarheid, zoals wordt verwacht van het FO-concentraat, een gunstig effect heeft op het energieverbruik van de technologie. Verder is ionenuitwisseling met zowel kunstmatige media als minerale zeolieten een aantrekkelijke optie voor de terugwinning van zowel stikstof als fosfor. Technologisch en (daardoor mede) economisch gezien zijn er nog enkele uitdagingen, waaronder de regeneratie en effectieve terugwinning zonder pH-aanpassing. In algemene zin lijkt ionenwisseling technisch haalbaar en daarmee een interessante optie.

Bij de selectie van een technologie voor de terugwinning van ammonium zal het energieverbruik uiteindelijk een bepalende rol spelen. Dat energieverbruik zou onder de 10 kWh/kg $\text{NH}_4\text{-N}$ moeten liggen om te kunnen concurreren met het Haber-Bosch proces. Het energieverbruik van elektrodialyse kan daaronder blijven maar van luchtstrippen is het energieverbruik hoger en dus niet geschikt. .

3.3.5 Conclusies

Na anaerobe behandeling van het concentraat uit het CoRe-proces lijkt struvietprecipitatie een logische eerste stap. Hiermee kan fosfaat grotendeels worden teruggewonnen en ongeveer 10 % van het ammonium worden

gebonden. Voor het resterende ammonium lijken elektrodialyse en ionenwisseling de meest voor de hand liggende technieken.

4 Laboratoriumtesten

4.1 Optimalisatie FO door laboratoriumonderzoek

4.1.1 Aanleiding

Onderdeel van dit project is de realisatie van een CoRe-pilot met een capaciteit van 2 m³/uur voor praktijkonderzoek (zie hoofdstuk 6). Door laboratoriumtesten op kleine schaal uit te voeren met FO-membranen en afvalwater onder goed geconditioneerde omstandigheden is informatie verzameld die van belang is geweest voor het ontwerp, de bouw en bedrijfsvoering van die pilot. Die informatie is bijvoorbeeld gericht op de mate van vervuiling, de benodigde voorbehandeling van het afvalwater en op de geschikte reinigingsmethoden voor de FO-membranen. Het laboratoriumonderzoek is uitgebreid beschreven in het rapport KWR2019.112 *“TKI CoRe-Water van RWZI naar een duurzame waterfabriek – Forward Osmosis laboratoriumonderzoek 2019”*. De tabellen en figuren uit dit hoofdstuk zijn rechtstreeks overgenomen uit dat rapport.

4.1.2 Doelstelling

Het laboratoriumonderzoek is uitgevoerd met als doel om onder goed geconditioneerde omstandigheden meer inzicht te krijgen op de verbetering van de prestaties van de FO technologie in het CoRe-Water-concept waarbij gekeken is naar:

- Beter begrip van de invloed van vervuiling op de prestaties van FO-membranen door monitoring van prestatieverlies in relatie tot het type afvalwater.
- Verbetering FO membraanprestatie door beheersing van membraanvervuiling door een optimale voorbehandeling.
- Verbetering FO membraanprestatie door beheersing van membraanvervuiling door curatieve maatregelen, bijvoorbeeld chemische reiniging, luchtwaterspoeling en osmotische terugspoeling.

4.1.3 Werkwijze

Het eerste gedeelte (2019) van het onderzoek is uitgevoerd met gefiltreerd influentwater van de RWZI Wehl. Het onderzoek is uitgevoerd met twee identieke FO cross-flow laboratoriuminstallaties. Foto's van de installatie zijn weergegeven in Figuur 4-1. De installatie is in detail beschreven in rapport KWR2019.112.

Alle testen zijn uitgevoerd met een vaste drawconcentratie van 0,4M NaCl (osmotische druk = 24 bar). Waarbij één van de twee installaties diende als referentie (S1 = ref) die is gevoed met RWZI-influent + 40 µm (Trommelzeef + extra doek; voorbehandeling pilot Wehl). De tweede installatie (S2 = test) diende als testinstallatie waarbij verschillende variabele omstandigheden zijn getest. Tijdens alle testen was het voedingsdebiet 15 L/uur (0,15 m/s) en het drawdebiet 10 L/uur (0,10 m/s).



Figuur 4-1 Foto's FO cross-flow laboratoriuminstallatie. Links installatie met rechts de cross-flow cel

Voor de start van de testen zijn de membranen eerst gekarakteriseerd (schoonwaterflux = SWF) om de installaties te valideren (i.v.m. het vergelijken van resultaten beide laboratoriuminstallaties). Voor en na de verschillende testen zijn de membranen wederom gekarakteriseerd om de mate van vervuiling van het membraan in relatie tot de toegepaste behandelingstechnieken te bepalen. De karakterisering is uitgevoerd volgens de methode die is ontwikkeld door Tirafferri (Tirafferri, Yip et al. 2013) waarmee de waterpermeabiliteit (A in $L/m^2 \cdot \text{uur} \cdot \text{bar}$), zoutpermeabiliteit (B in $L/m^2 \cdot \text{uur}$) en structuurparameter (S in μm) kan worden bepaald. Een 4-punts karakterisatie is toegepast, die plaats vond bij 4 drawconcentraties (0,25, 0,5, 0,75 en 1,0M).

Achtereenvolgens is de invloed op de beheersing van membraanvervuiling onderzocht van luchtwaterspoeling (AWF) (Cornelissen, Vrouwenvelder et al. 2007), osmotische terugspoeling (OBW) (Motsa, Mamba et al. 2017) in combinaties met AWF en Cleaning In Place (CIP) (Lay, Zhang et al. 2012).

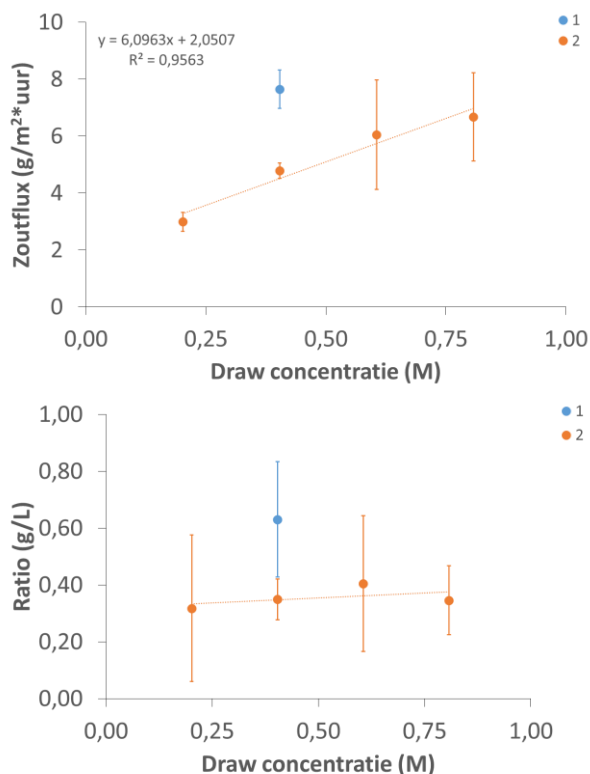
Gedurende de (karakterisatie)testen is de geleidbaarheid en gewichtstoename en afname aan de voedings- en drawzijde gemeten waarbij de zoutconcentratie aan de drawzijde constant werd gehouden. Daarnaast is de drukval over het voedingskanaal van de membranen gemeten en zijn er monsters genomen van de voeding voor analyse van TOC, Cl en ICPMS. Op deze manier zijn de water, zoutfluxen van verschillende ionen en de zout/water ratio bepaald.

In 2020 is er additioneel laboratoriumonderzoek uitgevoerd waarbij de invloed van extra voorbehandeling met $FeCl_3$ op de FO membraanprestatie is onderzocht. Het onderzoek is uitgevoerd met gefiltreerd influentwater van de RWZI te Roermond.

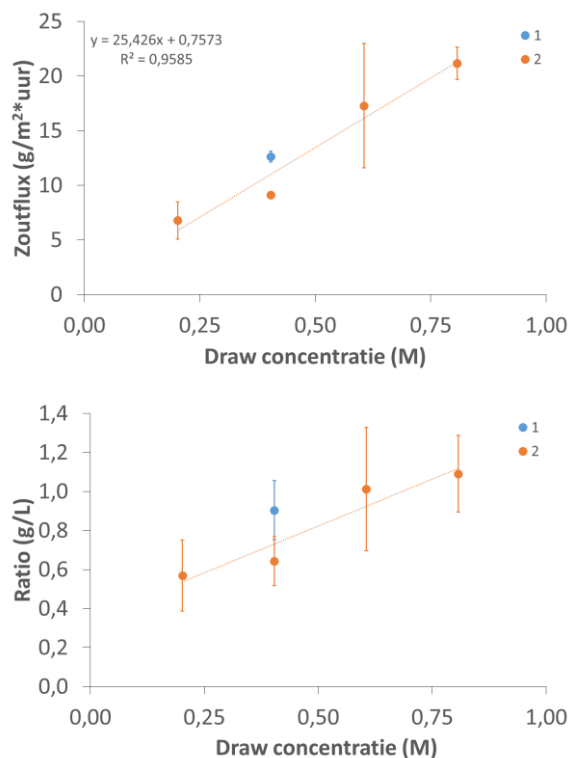
Tijdens het onderzoek is één van de twee installaties gevoed met water dat is extra voorbehandeld met $FeCl_3$. De tweede installatie is gevoed met water zonder de extra voorbehandeling met $FeCl_3$. Voor en na de verschillende testen zijn de membranen gekarakteriseerd (schoonwaterflux) om de mate van vervuiling van het membraan in relatie tot de toegepaste behandelingstechnieken te bepalen. Achtereenvolgens is de invloed van extra voorbehandeling met $FeCl_3$ en osmotische terugspoeling (OBW) in combinaties met AWF (met en zonder Fe-dosering) op de beheersing van membraanvervuiling onderzocht waarbij de geteste drawconcentratie 0,5M NaCl was.

4.1.4 Resultaten

Aan het begin van te testen in 2019 is eerst op beide installaties (S1 en S2) een schoon membraancoupon (gecodeerd als 1) gekarakteriseerd bij een drawconcentratie van 0,4M. Vervolgens is er een 4-punts karakterisatie uitgevoerd met nieuwe schone membraancoupons (gecodeerd als 2). De water en zoutflux en de ratio zout/waterflux zijn weergegeven in Figuur 4-2(ref) en Figuur 4-3 (test).



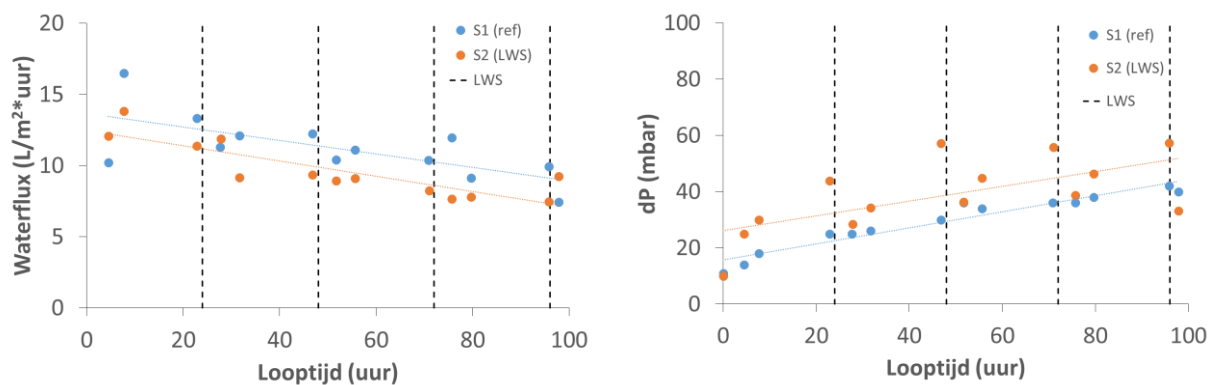
Figuur 4-2 Fluxen en ratio tijdens karakterisatie schone membranen (Coupon 1 en 2) S1 (ref installatie)



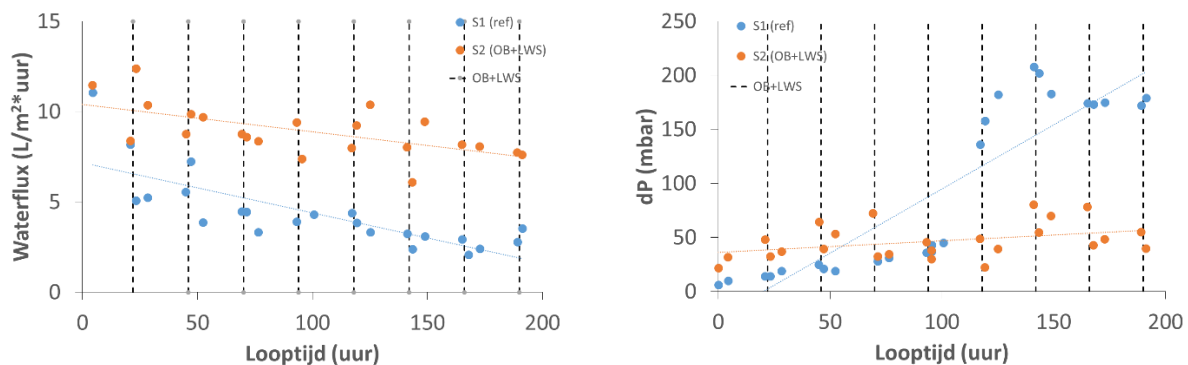
Figuur 4-3 Fluxen en ratio tijdens karakterisatie schone membranen (Coupon 1 en 2) S1 (test installatie)

Beide installaties geven een vergelijkbare waterflux bij toepassing van 0,4M NaCl drawconcentratie (drawconcentratie tijdens testen). Voor S1 en S2 zijn de fluxen voor de twee geteste membraancoupons respectievelijk $13,6 \pm 0,9$ en $14,4 \pm 0,3$ L/m².uur. De zoutflux is voor S1 beduidend lager dan voor S2 respectievelijk $6,2 \pm 2,0$ en $10,9 \pm 2,5$ g/m².uur. Een oorzaak voor dit verschil is niet eenduidig te geven. Maar gezien de grote spreiding in de metingen is er besloten om de testen met de huidige coupons (2) uit te voeren en na iedere test een karakterisering uit te voeren waardoor de membraanprestatie voor en na een test met elkaar kunnen worden vergeleken. De ratio zout/waterflux is voor S1 beduidend lager dan voor S2 dit komt volledig voor rekening van de hoger zoutflux in S2.

Uit de testen kwam naar voren dat toepassen van AWF geen effect heeft op de waterflux maar wel effectief is in het verlagen van de drukval over de membranen (Figuur 4-4). Toepassing van OBW+AWF heeft een positief effect op zowel de waterflux als de drukval over het membraan (Figuur 4-5). De waterflux daalde langzamer ten opzichte van de waterflux van het referentiemembraan waar geen OBW+AWF is toegepast. De drukval over het membraan liep veel langzamer op. Met OBW+AWF lijkt membraanvervuiling bij FO beheersbaar.



Figuur 4-4 Fluxen en drukval tijdens AWF test S1 (ref) en S2 (test)



Figuur 4-5 Fluxen en drukval tijdens OBW+AWF test S1 (ref) en S2 (test)

Tijdens de AWF-testen bleven de gemeten zoutfluxen (chloride en natrium) gedurende de gehele testperiode constant. De gemiddelde zoutfluxen voor chloride en natrium voor het referentiemembraan waren respectievelijk $3,0 \pm 0,5$ g Cl/m².uur en $3,6 \pm 0,8$ g Na/m².uur en voor het membraan met AWF $10,2 \pm 2,6$ g Cl/m².uur en $7,9 \pm 1,6$ g Na/m².uur. De zout/waterflux ratio voor chloride en natrium voor het referentie membraan waren respectievelijk $0,28 \pm 0,08$ g Cl/L en $0,33 \pm 0,8$ g Na/L en voor het membraan met AWF $1,16 \pm 0,44$ g Cl/L en $0,89 \pm 0,31$ g Na/L. Dit is in overeenstemming met de zoutfluxen en ratio's die zijn gevonden tijdens de karakterisatietesten. Er kan dus worden geconcludeerd dat de hogere zoutfluxen en ratio's installatie gebonden zijn. Ook tijdens de karakterisatietesten zijn er hogere zoutfluxen gevonden voor het membraan dat in S2 zat (met AWF) in vergelijking met S1. De zoutfluxen zijn voor zowel het referentiemembraan als het membraan na AWF constant over de tijd. Het verschil in drukval over de membranen is toe te schrijven aan het toepassen van AWF.

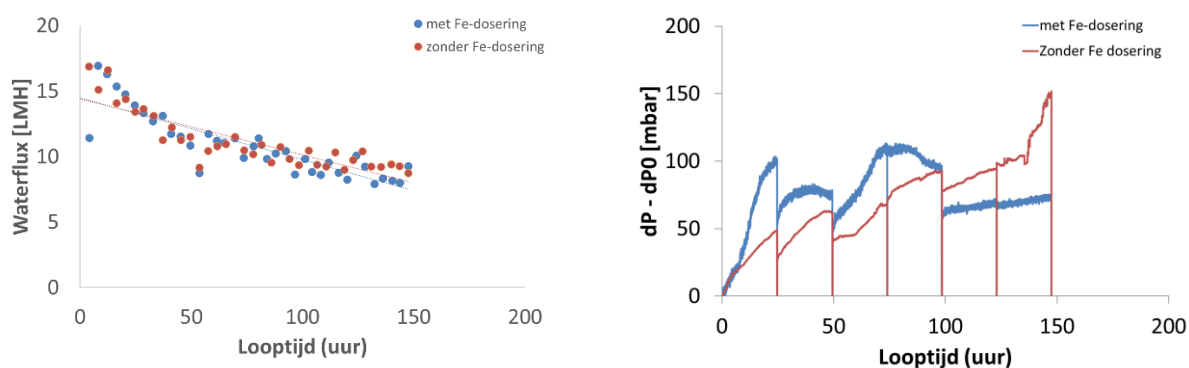
De volgende trends zijn waargenomen:

- Bij het referentiemembraan neemt de flux na ieder test verder af. Dit is conform verwachting omdat er steeds meer vervuiling op het membraan achterblijft. De flux neemt af volgens deze reeks: schoon membraan > na AWF >> OBW+AWF. De flux is met ongeveer 40 % gedaald van 14 naar 9 L/m².uur bij 0,4 M NaCl als drawoplossing na de OBW+AWF.
- Bij het membraan waar alle testen mee zijn uitgevoerd is dezelfde trend waargenomen maar minder extreem. De flux is na de AWF testen nagenoeg gelijk aan de flux bij een schoon membraan, en na de OBW+AWF testen is de flux met 10 – 20 % afgenomen. Het uitvoeren van de verschillende reinigingstechnieken (AWF en OBW+AWF) heeft een positief effect op het fluxverloop.
- Bij het referentiemembraan is de zoutflux na de AWF testen nagenoeg gelijk. Na de OBW+AWF testen stijgt de zoutflux met ongeveer 50% (van 4 naar 6 g/m².uur bij 0,4 M NaCl als drawoplossing).

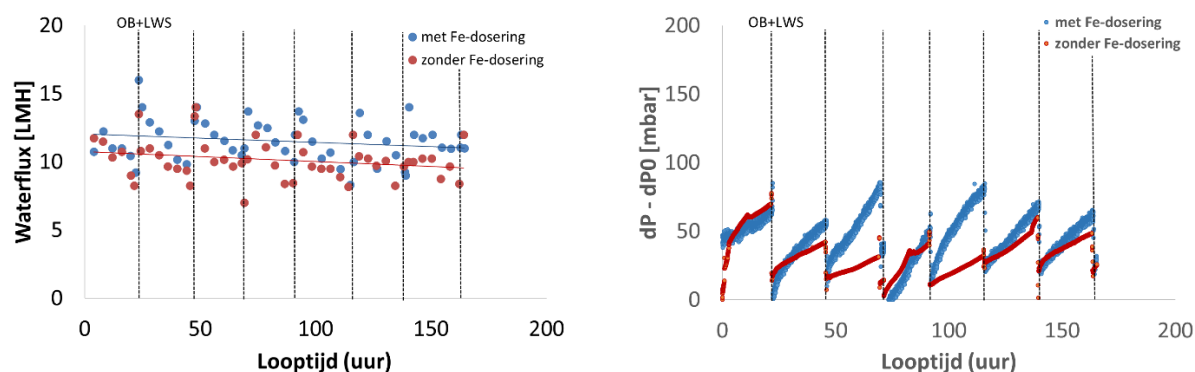
- Bij het membraan waar alle testen mee zijn uitgevoerd variëren de zoutfluxen sterk. Er is geen duidelijke trend waarneembaar. Opvallend is dat na AWF de zoutfluxen een factor 2 – 3 lager liggen t.o.v. het schone membraan. Na OBW+AWF is de zoutflux vergelijkbaar met de zoutflux van het schone membraan. De gevonden verschillen kunnen niet worden verklaard.

De uitgevoerd CIP had een positief effect op de waterflux van het referentiemembraan. De CIP had geen effect op de waterflux en zoutflux van het testmembraan en op de zoutflux van het referentiemembraan.. De oorzaak van de beperkte invloed van de CIP op het testmembraan ligt mogelijk in het feit dat de uitgevoerde AWF en OBW+AWF de makkelijk te verwijderen vervuiling al heeft verwijderd waardoor de CIP minder effectief lijkt.

Tijdens de testen in 2020 bij toepassen van een extra voorbehandelingsstap met FeCl_3 leek het erop dat de flocculatie niet optimaal is verlopen. Op basis van de visuele beoordeling tijdens de test en ijzerconcentratiemetingen lijkt maar een gedeelte van de gevormde vlokken te zijn afgevangen. Het kan zijn dat de gevormde vlokken te klein waren waardoor ze niet door het filter ($50\ \mu\text{m}$) werden tegengehouden. Uit de testen kwam naar voren (Figuur 4-6) dat toepassen van een extra voorbehandelingsstap met FeCl_3 geen effect heeft op de waterflux en leidt tot een lagere drukval over het voedingskanaal van het membraan in de tijd ten opzicht van het systeem waar geen voorbehandeling met ijzer is toegepast. Toepassen van dagelijks OBW+AWF (Figuur 4-7) leidde tot een iets hogere waterflux (10%) maar zorgde ervoor dat het positieve effect op de drukval over het membraan niet meer werd teruggevonden.

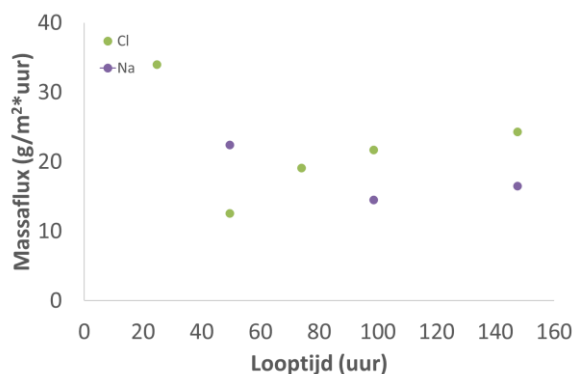


Figuur 4-6 Fluxen en drukval tijdens test met en zonder Fe-dosering

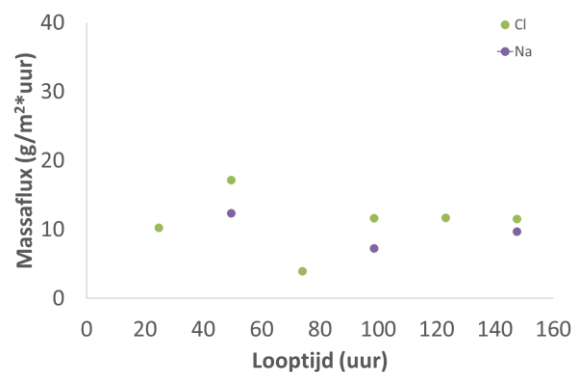


Figuur 4-7 Fluxen en drukval tijdens test met en zonder Fe-dosering inclusief OBW+AWF

In alle gevallen leidde toepassen van een extra voorbehandelingsstap met FeCl_3 tot een significante verhoging (1,5 – 2,3) van de zoutflux van verschillende ionen zoals duidelijk te zien is in Figuur 4-8 en Figuur 4-9. Met als gevolg dat de water/zoutflux ratio ook een factor 1,5 – 2,3 hoger wordt bij toepassen van Fe-dosering.



Figuur 4-8 Zoutfluxen (Cl en Na) tijdens test met Fe -dosering (S1)



Figuur 4-9 Zoutfluxen (Cl en Na) tijdens test zonder Fe -dosering (S2)

Op basis van de karakterisatie van de membranen na iedere test zijn de volgende trends waargenomen:

- Zowel bij het membraan met als zonder Fe-dosering neemt de waterflux af. Na toepassen van OBW+AWF is de waterflux van beide membranen nagenoeg gelijk aan de oorspronkelijk waterflux aan het begin van de testen
- Voorbehandeling met Fe en OBW + AWF geeft een zeer hoge zoutflux die een factor 2,7 ($1,0 \rightarrow 2,7$ g/L) hoger is in vergelijking tot de test met alleen voorbehandeling Fe.
- Voorbehandeling met Fe en OBW + AWF van het systeem zonder Fe-dosering geeft het omgekeerde beeld te zien. Hier neemt de zoutflux af van 1,0 naar 0,7 g/L
- De ratio zout/waterflux neemt voor het membraan met Fe-dosering sterk toe van 1 naar 2,7 g/L aan het einde van de testen. De ratio voor het membraan zonder Fe-dosering neemt af van 1 naar 0,7 g/L aan het einde van de testen.

4.1.5 Conclusies

Uit het onderzoek waarbij achtereenvolgens is de invloed van luchtwaterspoeling (AWF), osmotische terugspoeling (OBW) in combinaties met AWF en Cleaning In Place (CIP) op de beheersing van membraanvervuiling is onderzocht komt naar voren dat:

- Alle toegepaste curatieve maatregelen hebben een positief effect op de beheersing van membraanvervuiling.
- Geen van de toegepaste curatieve maatregelen heeft invloed op de zoutfluxen (Na en Cl).
- Zowel AWF, OBW als CIP hebben een positief effect op de drukvalontwikkeling over het voedingskanaal van het membraan.
- OBW en CIP zorgen voor een toename in de waterflux over de tijd in vergelijking met een FO membraan zonder toepassing van curatieve maatregelen. AWF heeft geen invloed op de waterflux.
- Extra voorbehandeling met FeCl_3 op het RWZI influent van Roermond geeft geen verbetering van de FO membraanprestatie ten opzichte van reeds toegepast voorbehandeling met een trommelzeef (Trumma, 40 μm filterdoek). Er is zelfs sprake van een negatieve invloed omdat de gemeten zoutfluxen van verschillende ionen een factor 1,5 – 2,3 hoger zijn dan bij het systeem zonder Fe-dosering. Het is daarom niet aan te bevelen om tijdens het CoRe pilot onderzoek in Roermond deze extra voorbehandelingsstap voor de 40 μm trommelzeef te introduceren. Minimale voorbehandeling voor RO gaf vergelijkbare resultaten (Cornelissen, Harmsen et al. 2021).

4.2 Laboratoriumonderzoek anaerobe vergisting concentraat

4.2.1 Aanleiding

Zoals weergegeven in Figuur 1-2 produceert het CoRe-water-concept naast schoon water ook een geconcentreerde afvalwaterstroom. Met het CoRe-Water-concept wordt een concentratiefactor (CF) beoogd van 20 tot 30. Dit biedt de mogelijkheid tot anaerobe behandeling van het geconcentreerde afvalwater (vergisting) waarbij biogas wordt geproduceerd. Dit geeft in potentie een enorme toename van de productie van biogas ten opzichte van een conventionele RWZI en verbetert daarmee de energie-efficiëntie van het hele zuiveringsproces. Om die reden is het relevant om het biogasproductiepotentieel van het FO-concentraat te bepalen rekening houdend met specifieke kwaliteitsaspecten zoals mogelijk verhoogde zoutconcentraties als gevolg van een zoutlek uit de draw solution. De uitvergiste concentraatstroom digestaat biedt bovendien goede mogelijkheden voor het terugwinnen van nutriënten zoals stikstof en/of fosfaat (zie paragraaf 3.3).

4.2.2 Doelstelling

Het doel is op laboratoriumschaal de anaerobe vergisting van FO-concentraat te onderzoeken bij bedrijfstemperaturen van 10 °C, 20 °C en 35 °C, uitgaande van concentratiefactoren hoger dan 20 en bij verhoogde zoutconcentraties als gevolg van lekkage van zout uit de draw solution (DS). Daarnaast kan het sluiten van waterkringlopen in de toekomst ook in algemene zin leiden tot toename van zoutgehalten van afvalwater.

4.2.3 Werkwijze

Om beter te begrijpen hoe het geconcentreerde stedelijke afvalwater onder anaerobe omstandigheden wordt afgebroken, zijn op laboratoriumschaal batchproeven uitgevoerd.

De experimenten zijn uitgevoerd in 0,6 liter glazen flessen met het concentraat van de FO-pilot in Wehl (zie paragraaf 5.1). De zuivering in Wehl ontvangt zowel stedelijk als industrieel afvalwater. De geconcentreerde FO-stroom is naar het laboratorium gebracht en daar opgeslagen bij 4 °C. De flessen zijn geënt, waarbij gebruik is gemaakt van anaeroob slib afkomstig van een grootschalige reactor voor de behandeling van industrieel afvalwater (Shell Moerdijk), dat hoofdzakelijk acetaat en benzoaat bevatte en dat was geacclimatiseerd aan zoutgehalten van 6 tot 10 g Na/l.

Vervolgens zijn testen uitgevoerd waarbij de specifieke methanogene activiteit (specific methanogenic activity, SMA) en het cumulatieve methaan productiepotentieel (cumulative methane potential, CMP) zijn gemeten. Hierbij is gebruik gemaakt van een Automated Methane Potential Test System AMPTS II (Bioprocess Control, Zweden) volgens vaste protocollen. De AMPTS II berekent en registreert het gasvolume onder normale omstandigheden (NmL, 0 °C, 1 bar). De experimenten zijn uitgevoerd bij verschillende temperaturen van 35 °C, 20 °C en 10 °C. CO₂- en H₂S-gas worden voor de meting uit het biogas gestript met een 3 M NaOH-oplossing. Alle testen, inclusief blanco's (inoculum+medium), SMA (inoculum+natriumacetaat), positieve controle (inoculum+cellulose), en CMP (inoculum+FO-concentraat), zijn in drievoud uitgevoerd (Tabel 4-1).

De anaërobe biologische afbreekbaarheid van het substraat kan vervolgens worden berekend door deling van de totale methaanproductie aan het eind van het experiment (uitgedrukt in g COD) en het aanvankelijke totale COD gehalte (tCOD) van het substraat (uitgedrukt in procenten).

Tabel 4-1 Overzicht van uitgevoerde SMA en CMP assays

Temperature (°C)	Type experiment	Testen met toenemende NaCl concentratie
35	Mesofiel, FO-concentraat, SMA, Positieve controle (cellulose), blanco's	FO-concentraat met toevoeging van 0.3, 0.6 en 1 M NaCl
20	Omgevingstemperatuur, FO-concentraat, SMA, Positieve controle (cellulose), blanco's	FO-concentraat met toevoeging van 0.5, 1.0 en 1.5 M NaCl
10	Psychrofiel, FO-concentraat, SMA, Positieve controle (cellulose), blanco's	FO-concentraat met toevoeging van 0.25, 0.5 en 0.75 M NaCl

4.2.4 Resultaten

De karakteristieken van het FO-concentraat en het influent (rioolwater) zijn weergegeven in Tabel 4-2. De concentraties in het influent (stedelijk afvalwater) van 799 mg.L⁻¹ totaal CZV en 86 mg.L⁻¹ NH₄-N kunnen worden beschouwd als stedelijk afvalwater met een gemiddelde sterkte. Dit wordt toegeschreven aan de lozingen van industrieën in het rioolstelsel van Wehl, dat tot variatie in de waterkwaliteit leidt.

Tabel 4-2 Karakteristieken van het FO-concentraat van de FO-pilot in Wehl

mg/l	CZV (totaal)	STD	CZV (opgelost)	STD	NH ₄ -N	STD	TKN	STD	PO ₄ -P(s)	STD
FO Concentraat 1	3935	58	3848	3	406	27.9	671	2.8	78	0.0
FO Concentraat 2	4116	255	3446	76	466	29.3	563	1.7	53	0.0
Influent RWZI	799	3	409	4	86	3.5	131	1.0	10	0.01
C.F. FO Concentraat 1	5		9		5		5		8	

Het geleidingsvermogen van het FO-concentraat 1 en 2 bedroeg respectievelijk $56,9 \pm 0,6$ mS.cm⁻¹ en $67,1 \pm 0,2$ mS.cm⁻¹. De vluchtige vaste stoffen (VS) en vluchtige gesuspendeerde vaste stoffen (VSS) van het FO-concentraat bedroegen respectievelijk $2,38 \pm 0,04$ g.L⁻¹ en $1,12 \pm 0,01$ g.L⁻¹.

De lagere CF voor ammonium (ten opzichte van CZV) is het gevolg van het feit dat ammonium in staat is om het FO-membraan te passeren en te accumuleren in de DS. Verder moet de CF in de tabel worden gecorrigeerd voor het feit dat het influent rioolwater met een trommelzeef (40 µm) wordt voorbehandeld. Als wordt aangenomen dat er ongeveer 200 mg CZV/L in het FO-influent zit na de voorbehandeling, is voor CZV een CF van ongeveer 20 bereikt.

Bij een temperatuur van 35 °C werd een specifieke methanogene activiteit (SMA) van ongeveer $0,33 \pm 0,02$ g CH₄-COD.gVS⁻¹.d⁻¹ gemeten. Deze was 45% lager bij 20°C, doordat het inoculum niet aan deze temperatuur gewend was. Bij 10°C bedroeg de waarde slechts 6,1% van die bij 35°C.

Het biochemisch methaanpotentieel van het FO-concentraat bedroeg ongeveer 135 ± 5 NmL methaan per gram COD (NmL CH₄.gCOD_{substrate}⁻¹) bij zowel 35 °C als 20 °C. Theoretisch werd een soortgelijke waarde verwacht bij 10 °C, maar er werd slechts ongeveer $36,1 \pm 20,6$ NmL CH₄.gCOD_{substrate}⁻¹ verkregen. Dit lage methaanpotentieel onder psychrofiële omstandigheden (<20 °C) is toegeschreven aan het niet-aangepaste slib en de hoge methaanoplosbaarheid bij incubatie.

Het geconcentreerde afvalwater vertoonde een anaerobe biologische afbreekbaarheid van ongeveer $39\pm 1\%$ bij 35°C en $30\pm 15\%$ bij 20°C . In overeenstemming met het methaanpotentieel was de biologische afbreekbaarheid bij 10°C ongeveer vier keer lager dan bij 35°C . Uit deze waarden kan worden afgeleid dat de samenstelling van het concentraat de anaerobe omzetting kan hebben beperkt, waarschijnlijk doordat het afvalwater van Wehl tijdens de proeftests industriële lozingen ontving. Het gebrek aan anaerobe omzetting wordt echter voornamelijk toegeschreven aan de hogere zoutconcentratie van de anaerobe biomassa met het FO-concentraat. Zoutconcentraties tussen $0,15 - 0,6 \text{ M}$ bleken niet nadelig te zijn voor de methaanproductie bij alle onderzochte temperaturen. Een zoutconcentratie tussen $0,6 - 1,5 \text{ M}$ bleek wel de totale methaanopbrengst te belemmeren wat leidde tot volledige remming bij een geleidbaarheid $> 100 \text{ mS cm}^{-1}$ in de reactor.

4.2.5 Conclusies

De testen lieten geen verschil zien tussen het methaanproductiepotentieel bij 20 en 35°C . Dit is positief omdat het FO-concentraat bij een relatief lage temperatuur kan worden vergist. Bij zoutconcentraties boven $0,6 \text{ M}$ moet rekening worden gehouden met een verminderde methaanopbrengst. De anaerobe biologische afbreekbaarheid was tijdens de testen relatief laag.

5 Voorbereidend pilotonderzoek

5.1 Onderzoek locatie Wehl

5.1.1 Aanleiding

In het CoRe-water project is het Waterschap Rijn en IJssel vooral geïnteresseerd in de mogelijkheden om componenten uit de concentraatstroom uit het CoRe proces te verwaarden en lokaal te benutten. Dit sluit aan bij het project Kunstmestvrije Achterhoek³ waar het waterschap in participeert. Het bereiken van een voldoende hoge concentratiefactor (CF) in het CoRe-Water-concept is in dat opzicht van belang. Daarnaast is van belang inzicht te hebben in de verliezen van ammonium via de draw solution.

Het onderzoek in Wehl is uitgebreid beschreven in het rapport *“Report WP 1.4 Forward osmosis treatment of municipal wastewater. Pilot results Wehl”*. De tabellen en figuren uit dit hoofdstuk zijn rechtstreeks overgenomen uit dat rapport.

5.1.2 Doelstelling

Proefonderzoek aan de FO/RO-configuratie vormt het hart van het CoRe-project. Als onderdeel van werkpakket 1 is de BT-pilot in 2018/2019 gedurende een periode van 3 maanden op de RWZI Wehl geplaatst om experimenten uit te voeren. De belangrijkste doelen van de pilot in Wehl zijn;

- Verdere optimalisatie van de werking van de FO.
- Verzamelen van praktijkervaring en procesgegevens over water/zoutflux, vervuiling/verstoppingsgedrag, alsmede testen van reinigingsmethoden om vervuiling/verstopping te verminderen of te verwijderen.
- Verzameling van waterkwaliteitsgegevens door analyse van de geproduceerde concentraat- en permeaatstroom en de toegepaste DS.
- Het verkrijgen van relevante inputparameters uit de pilot Wehl voor het ontwerp van een 2m³/h demonstratie-installatie (CoRe-pilot).

5.1.3 Werkwijze

Het voedingswater voor de testen in Wehl is voorbehandeld door middel van een trommelzeef met een maaswijdte van 40 µm. Vervolgens is de BT-pilot gebruikt met geïntegreerd terugwinningssysteem op basis van RO en een mogelijkheid voor toepassing van cleaning in place (CIP) voor de FO. De installatie is geplaatst in een standaard 20 voets container en bevat naast twee parallel geplaatste FO-modules, een voedingstank, een DS-tank, een CIP-tank, een tank voor osmotische terugspoeling (OBW) en een RO-terugwinunit. De pilot is ontworpen om in batch-modus te werken, waarbij een batch van de voedingsoplossing wordt geconcentreerd tot de gewenste concentratie. Daarna wordt een nieuwe batch toegevoegd, die dan ook weer wordt geconcentreerd tot de gewenste concentratie. De installatie heeft een capaciteit van ongeveer 200 l/uur, afhankelijk van de concentratie van de draw solution, de concentratiefactor alsmede de kwaliteit van het voedingswater.

Het pilotonderzoek in Wehl is uitgevoerd in drie testfasen:

1. Batch modus zonder afvoer van concentraat ('no bleeding') waarbij verschillende concentraties voor de DS zijn getest: 0.2M (12 g/L), 0.5M (29g/L) en 0.8M (46,7g/L) NaCl. Tussen de testen is een CIP-procedure uitgevoerd met Ultrasil 110 (basisch) en Ultrasil 73 (zuur) bij 35 °C gedurende 30 minuten bij een flow van 3.500 l/h.
2. Continue modus met afvoer van concentraat (bleed modus) waarbij telkens gedurende een week verschillende concentraties DS en daarmee corresponderende concentratiefactoren zijn getest: 0,2 M met CF van 5, 0,5 M met CF van 15 en 0,8 M met CF van 28. Hiermee werd beoogd verschillende concentratiestappen te simuleren. In deze testfase zijn op verschillende posities monsters genomen en geanalyseerd op CZV, TOC, alkaliniteit,

³ <https://kunstmestvrijeachterhoek.nl/>

chloride, ammonium nitriet, nitraat, totaal-P en metalen. De analyseresultaten zijn vooral gebruikt om massabalansen op te stellen. In deze fase is tweewekelijks een CIP-reiniging uitgevoerd van de FO-membranen met een vaste routine op woensdag en een wisselende routine op vrijdag. In alle gevallen bestond de CIP uit een behandeling met Ultrasil 110 (basisch) bij 0,5 % w/w gecombineerd met een Ultrasil 73 (zure) behandeling met 1,5 % w/w, beide gedurende 30 minuten en bij een temperatuur van 35 °C.

3. Continue modus met afvoer van concentraat bij een hoge CF van 28 gedurende een aaneengesloten periode van 3 dagen gericht op maximale vervuiling van het FO-membraan. Vervolgens zijn successievelijk vier verschillende CIP-reinigingen getest. Naast de CIP-routine zoals omschreven voor testfase 2 betreft het een routine met 0,1% natronloog met 0,1% natriumdodecylsulfate (SDS) gevolgd door 2% citroenzuur (beide 30 min en bij 35 °C), een routine met 0,1% natronloog gevolgd door 0,1% zoutzuur (beide 30 min en bij 35 °C) en een routine met een osmotische terugspoeling met 0,5M NaCl als voeding en RO-permeaat als DS. Om te zorgen dat elke afzonderlijke test een vergelijkbaar startpunt heeft, is na elke routine nogmaals de CIP-routine met Ultrasil-producten toegepast. Het effect van elke CIP-routine is gemonitord door meting van de flux en de drukval over de FO-modules voor en na de CIP. Per methode is de CIP-procedure drie keer herhaald.

5.1.4 Resultaten

De resultaten van testfase 1 geven een indicatie van de fluxen (in l/m².h of LMH) die bereikt kunnen worden als functie van de concentratie in de DS en de gekozen volumetrische CF. Deze data zijn van belang geweest voor het ontwerp van de CoRe-pilot:

- Bij een concentratie van de DS van 0,2 M en een CF van 5 is een flux bereikt van 4 -6 LMH.
- Bij een concentratie van de DS van 0,5 M en een CF van 15 is een flux bereikt van 3 -4 LMH.
- In de test met een 0,8M DS kon binnen de tijdsduur van de test de gewenste CF van 30 niet worden bereikt.

Testfase 2 waarbij de pilot gedurende drie weken in een continue modus is bedreven met per week een oplopende concentratie van de DS en een daarmee corresponderende oplopende CF, heeft veel inzicht verschaft in de kritieke procesparameters voor het ontwerp van de CoRe-pilot. Die procesparameters zijn opgenomen in Tabel 5-1. Wat opvalt is dat de fluxen in de drie experimenten vergelijkbaar zijn, namelijk gemiddeld rond de 5 LMH.).

Tabel 5-2 toont de analyseresultaten van de belangrijkste parameters voor het concentraat uit de 0,8 M test en het permeaat van de 0,2 M test. Deze twee stromen zijn de beste weergave van de uiteindelijke concentraat- en permeaatstroom. Wat direct opvalt, is dat in het permeaat sprake is van een relevante restconcentratie aan ammonium. Dat komt doordat ammonium (als relatief klein molecuul) in staat is om het FO-membraan deels te passeren. Omdat het RO-membraan een dichtere structuur heeft, accumuleert ammonium in de DS wat uiteindelijk in een evenwichtssituatie resulteert in een relatief hoge concentratie in het RO-permeaat. In een brainstormsessie is gezocht naar mogelijke oplossingsrichtingen voor ammoniumverwijdering uit het permeaat (afhankelijk van de toepassing van het permeaat). Hiervoor zijn ionenwisseling, zeolietenfilter, capacitieve de-ionisatie (CDI), elektrolyse (ED) en een tweede nageschakelde RO genoemd als meest realistische opties. Daarnaast zijn luchtstrippen of membraanstrippen genoemd als opties om ammonium selectief uit de DS te verwijderen. Het resultaat van deze brainstormsessie staat beschreven in *KWR 2021.079 Ammoniumverwijdering in het CoRe-Water-concept*.

Tabel 5-1 Overzicht van de belangrijkste procesparameters in testfase 2 met per week oplopende concentratie van de DS en oplopende CF.

Process conditions 0.2M NaCl	
Volumetric Concentration Factor (VCF)	5
Average Flux FO (L.m2.h.)	4.9
Average Reverse Salt Flux (g/L)	0.16
Average Reverse Salt Flux (g/L _{influent})	0.28
Average pressure draw recovery (bar)	11
Average feed temperature (°C)	18
HCl Dosed (L/h)	0.047
HCl Dosed (L/m ³ _{influent})	0.56

Process conditions 0.5M NaCl	
Volumetric Concentration Factor (VCF)	15
Average Flux FO (L.m2.h.)	5
Average Reverse Salt Flux (g/L)	0.41
Average Reverse Salt Flux (g/L _{influent})	0.73
Average pressure draw recovery (bar)	28
Average feed temperature (°C)	18
HCl Dosed (L/h)	0.064
HCl Dosed (L/m ³ _{influent})	0.74

Process conditions 0.8M NaCl	
Volumetric Concentration Factor (VCF)	28
Average Flux FO (L.m2.h.)	5.4
Average Reverse Salt Flux (g/L _{influent})	0.53
Average Reverse Salt Flux (g/L)	0.64
Average pressure draw recovery (bar)	41
Average feed temperature (°C)	22
HCl Dosed (L/h)	0.084
HCl Dosed (L/m ³ _{influent})	0.38

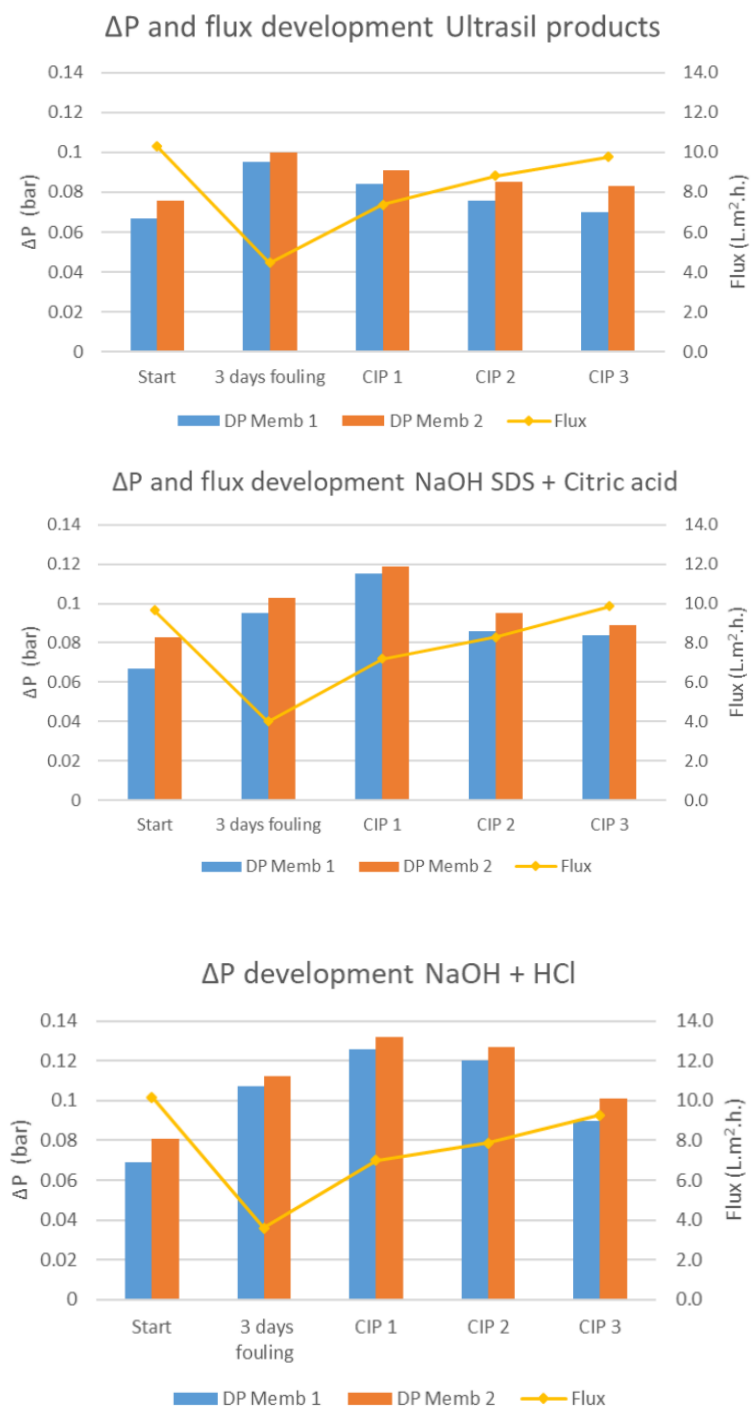
Voor geen van de drie testfasen kon voor de verschillende parameters een sluitende massabalans worden opgesteld. Dat komt voornamelijk doordat CIP-vloeistoffen niet in de analyse zijn meegenomen. Wel heeft die exercitie aangetoond dat in de DS accumulatie plaatsvindt van meerdere parameters, zoals waterstofcarbonaat, zwavel, magnesium, kalium, totaal-P, ammonium, TOC en CZV. Hierbij geldt dat de concentraties in de DS toenemen (meer accumulatie) bij toenemende molariteit van de DS en bij toenemende tijdsduur van de test.

Tabel 5-2 Analyseresultaten van de meest relevante parameters in het concentraat van de 0,8 M DS test en het permeaat van de 0,2 M test.

	<i>Infl. Trumma</i>	<i>Infl. pilot</i>	<i>Concentrate</i>	<i>Permeate</i>
	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>
<i>COD</i>	650	590	5330	11
<i>TOC</i>	170	176	1100	11
<i>Chloride</i>	47	67	16000	62
<i>Ammonium</i>	34.1	54	717	12.3
<i>Total phosphorus</i>	7.1	9.1	130	0.05
<i>Aluminium</i>	0.7	0.6	6.6	<0.05
<i>Calcium</i>	29	37	430	0.8
<i>Natrium</i>	63	63	12000	28
<i>Kalium</i>	16	27	410	4.4
<i>Koper</i>	0.03	0.04	330	<00001
<i>Magnesium</i>	3.7	5.2	72	0.1
<i>Ijzer</i>	0.5	0.5	4.2	<0.05
<i>Zwavel</i>	6.5	12.8	170	5.8

In testfase 3 zijn vier verschillende reinigingsmethoden getest. In *Figuur 5-1* zijn de resultaten van de testen weergegeven voor de CIP-methoden gebaseerd op de combinatie van een zuur en een base. Daarbij gaat het om weergave van de flux en drukval over beide FO-modules bij de start van de test met afvalwater, na drie dagen in bedrijf te zijn geweest zonder reiniging en vervolgens na toepassing van de betreffende CIP-methode en de herhaling daarvan tot twee keer toe. Wat vooral opvalt is de toename van de drukval over de modules bij de tweede en derde CIP-methode. Verder vindt bij alle drie methoden uiteindelijk een vrijwel volledig herstel van de flux plaats, respectievelijk 91 %, 100 % en 86 %.

Toepassing van een osmotische terugspoeling (OBW) heeft slechts beperkt invloed op het herstel van de drukval over een module (33 %), maar toepassing van drie OBW achter elkaar leidt tot een fluxherstel van 65 %. Dit geeft aan dat OBW effectiever is in het reinigen van het membraan dan van de membraan spacer.



Figuur 5-1 Ontwikkeling van de drukval en flux tijdens de experimenten met verschillende CIP-oplossingen.

5.1.5 Conclusies

Op basis van de pilottesten uitgevoerd in Wehl zijn de volgende conclusies getrokken:

- De testen hebben inzicht gegeven in de te behalen waterfluxen als functie van de volumetrische CF en de sterkte van de DS die bruikbaar waren voor het ontwerp van de CoRe-pilot. Daarnaast hebben de testen inzicht gegeven in de drukval aan de voedingszijde van het membraan tijdens vervuilingsexperimenten met afvalwater en experimenten met CIP-methoden.
- Analytische data van RO-permeaat tonen aan dat met name ammonium, chloride en zwavelverbindingen bepalend zijn voor de permeaatkwaliteit en daarmee voor de bruikbaarheid van het permeaat.
- Ammonium hoopt zich op in de DS en komt daardoor ook in het RO-permeaat terecht. Een typisch concentratieniveau voor ammonium in het influent is 50 mg/l, in de draw solution 400 – 1000 mg/l (afhankelijk van de molariteit van de DS) en in het permeaat 15 – 40 mg/l (eveneens afhankelijk van de molariteit van de DS).
- Oplossingsrichtingen om de ammoniumconcentratie in het permeaat te verlagen, richten zich op luchtstrippen of membraanstrippen van de DS (procesgeïntegreerd) en/of nabehandeling van het permeaat met ionenwisseling, filtratie over zeolieten of een tweede nageschakelde RO.
- Door accumulatie van ionen in de DS kan niet worden uitgesloten dat (op termijn) in de DS neerslagreacties gaan optreden. Hierdoor is het gebruik van natriumchloride (boven bijvoorbeeld een magnesiumzout) als DS favoriet.
- Voor het opstellen van een sluitende massabalans over het CoRe-proces moeten ook de reinigingsvloeistoffen worden meegenomen (bij monsterneming en analyse) .
- Toepassing van een frequentie van CIP-reiniging (met Ultrasil zuur/base) van eens per 46 uur blijkt onvoldoende voor het bereiken van een stabiele procesvoering.
- De CIP-methode met NaOH + SDS/citroenzuur blijkt het meest effectief uitgaande van fluxherstel (100 %). De methode met Ultrasil-producten bereikt een fluxherstel van 91 %.
- Het citroenzuur en zoutzuur die gebruikt zijn bij de 2^{de} en 3^{de} CIP methode resulteerden in een toename van de drukval over de FO-module (in plaats van een afname). Op basis hiervan is geconcludeerd dat de Ultrasil producten effectievere en bovendien meer gevestigde reinigingsmiddelen zijn voor toepassing in de CoRe-pilot.
- De methode met osmotische terugspoeling heeft, mede door zijn eenvoud en door het ontbreken van chemicaliën, veel potentie om toegepast te worden voor herstel van de flux (tot 65%).

5.2 Onderzoek locatie Leusden (gemaal Leusden)

5.2.1 Aanleiding

Het doel van het CoRe-Water project is het komen tot een nieuw, modulair en adaptief concept voor afvalwaterzuivering. In voorafgaand pilotonderzoek is de CoRe-technologie op een RWZI onderzocht (RWZI Wehl) aan het einde van de rioleringsketen. De CoRe-technologie kan mogelijk ook bovenstrooms in de rioleringsketen worden toegepast bijvoorbeeld om lokaal schoon water te produceren (waarbij het concentraat alsnog wordt afgevoerd en centraal behandeld). Om de prestaties van de technologie onder die omstandigheden te testen is de BT-pilot na het onderzoek op de locatie Wehl in Leusden geplaatst nabij een rioolgemaal van het Waterschap Vallei en Veluwe.

Het onderzoek in Leusden is uitgebreid beschreven in het rapport *“Report WP 2.1 Forward Osmosis pilot tests on untreated wastewater in Leusden”*.

5.2.2 Doelstelling

De pilot is specifiek bij een rioolgemaal getest met als doel om te evalueren hoe het CoRe-Water-concept reageert op afvalwater dat minder lang in de riolering heeft gezeten dan het afvalwater op een RWZI.

Een tweede doelstelling was vast te stellen wat er allemaal bij komt kijken om een dergelijke installatie in een bebouwde omgeving te realiseren. Hierbij moet worden gedacht aan E- aansluiting, ruimte bij het gemaal, wateraansluiting, vergunningen, geluidhinder, geuremissie e.d. Dit is door het Waterschap Vallei en Veluwe separaat onderzocht en elders gerapporteerd.

5.2.3 Methode en materialen

De pilot bevat een FO systeem met geïntegreerd RO systeem en een cleaning in place (CIP). De pilot is ontworpen om in een semi-continue batchverwerking te draaien met een capaciteit van 0,2 m³/uur, afhankelijk van het influent. De experimenten zijn uitgevoerd met een concentratiefactor CF = 5 en een draw oplossing van 2M NaCl.

De testen zijn uitgevoerd in twee fasen. In elke testfase is het effect van luchtwaterspoeling (AWF) en een combinatie van AWF en osmotische terugspoeling (OBW) vergeleken met een referentie waarbij deze reinigingsmethoden niet werden toegepast (Lay, Zhang et al. 2012). Elke experiment duurde ongeveer 4 dagen, exclusief voorbereidingstijd en aanvullende chemische reinigingsprocedures. In fase 1 zijn de testen in deze volgorde uitgevoerd: referentie, AWF en AWF + OBW. In fase 2 is de pilot set-up veranderd om parallelle experimenten uit te voeren op twee membraanmodules: één referentie en één met reinigingsmethode. De belangrijkste parameters zijn gemonitord, dat wil zeggen de drukval over de toevoerzijde van de FO-modules en de flux door de FO-membranen.

5.2.4 Resultaten

In algemene termen zijn de patronen van de parameters in testfase 1 conform verwachtingen: de flux neemt af vanaf zijn initiële waarde en bereikt een stabiele waarde en de drukval neemt toe waarin de toename steeds steiler wordt. De flux in de referentietest vermindert veel sneller in Leusden dan in Wehl. Ook de drukval is van een grotere orde in Leusden dan in Wehl. De verschillen worden waarschijnlijk bepaald door een andere samenstelling van het influent.

Voor de AWF test is ondanks de herhaalde chemische reiniging niet alle vervuiling verwijderd. Bij de AWF + OBW test hebben de reinigingsmethodes geen significante invloed op (een verhoging van) de flux.

In testfase 2 was de verwachting dat de parameter drukval voor het referentiemembraan een continue drukval zou vertonen terwijl het membraan met reiniging zou resulteren in een gestabiliseerd drukvalpatroon. De resultaten laten echter geen verschil zien. De flux is niet gemeten per module, alleen voor de combinatie van beide modules.

De macroparameters zoals CZV, TZV, P en N maar ook organische microverontreinigingen laten een afname zien in concentratie in het permeaat.

De samenstelling van het permeaat maakt het water geschikt voor aanvulling van het oppervlaktewater of infiltratie in de bodem met uitzondering van het stikstofgehalte (rond 10 mg/l NH_4). Hiervoor is een aanvullende behandeling nodig. Verder blijkt dat een kleine hoeveelheid zout in het permeaat terecht komt. De gehalten zijn vergelijkbaar met die in drinkwater. Daarnaast is sprake van een omgekeerde zoutflux naar het concentraat. Deze zoutflux was relatief hoog voor Leusden, wat deels kan komen door de lage waarden voor de waterflux. Echter na correctie voor deze waarden laat het nog steeds verhoogde waarden zien in vergelijking met Wehl.

Overigens bleken de omstandigheden in Leusden een stuk uitdagender dan de omstandigheden op de RWZI Wehl. Met name de in het influent aanwezige zwevende stoffen en de optredende variaties in samenstelling hadden een negatief effect op de prestaties van de pilot. Het verloop van de drukval over de voedingszijde van de membranen en de geproduceerde flux is meer uitgesproken dan in Wehl. De toepassing van AWF en AWF + OBW kon een geleidelijke verhoging van drukval niet voorkomen en een afname van de flux over de loop van de experimenten. Daarnaast lijken de toegevoegde effecten van AWF en OBW gelimiteerd. Om de membranen te reinigen was chemische reiniging vereist.

5.2.5 Conclusies

- Op basis van de testresultaten en de autopsie van de membranen na afloop van de testen, is de conclusie dat de voorbehandeling voor de verwijdering van zwevende stof verder moet worden geoptimaliseerd.
- Uit de samenstelling van de DS blijkt dat praktisch alle onderzochte componenten zich in de DS ophopen. Dit lijkt te gebeuren tot het punt waarop de concentratie in de trekoplossing een evenwicht bereikt met de concentratie aan de toevoerszijde. Dit leidt net als in Wehl tot verhoogde ammoniumconcentraties in het permeaat.
- De toepassing van AWF en AWF+ OBW (niet gebruikt in Wehl), kon een geleidelijke toename van de drukval en een afname van de waterflux in de loop van de experimenten niet voorkomen. Om de prestaties van de membranen te herstellen was een aanvullende chemische reiniging nodig.
- Er moet rekening worden gehouden met zowel een zoutflux (zoutlek) naar het permeaat (via RO) als een omgekeerde zoutflux naar het concentraat (via FO).
- De retentie voor organische microverontreinigingen is zeer hoog.

6 Praktijkonderzoek CoRe-pilot locatie RWZI Roermond

6.1 Aanleiding

Binnen het CoRe-Water project was het doel om, na labtesten en testen op kleine pilotschaal, de werking van het CoRe-concept op een relevante schaal (met een relevante concentratiefactor CF) voor een langere periode aan te tonen. Hiertoe is op de RWZI Roermond pilotonderzoek uitgevoerd met een $2\text{ m}^3/\text{h}$ demonstratie-installatie (CoRe-pilot) gedurende een periode van 14 maanden. Op deze relevante schaal is het mogelijk om uitspraken te kunnen doen over (i) langdurige pilotprestaties, (ii) de technische en economische haalbaarheid van het CoRe-Water-concept, (iii) het perspectief van het CoRe-Water-concept en (iv) de uitdagingen bij opschaling van de technologie. De technische evaluatie richt zich specifiek op (i) de productie in de tijd gekoppeld aan het membraanvervuilingsgedrag (de permeabiliteit), (ii) het verstoppingsgedrag (drukval) en (iii) de waterkwaliteit (passage van componenten).

6.2 Doelstelling praktijkonderzoek

Voor het langdurig proefonderzoek aan het CoRe-Water-concept is een pilot ontworpen en gebouwd in 2018/2019, en in 2020/2021 gedurende een periode van 14 maanden op de RWZI Roermond geplaatst waarna experimenten zijn uitgevoerd. De belangrijkste doelen van de pilot in Roermond zijn;

- Technische haalbaarheid vaststellen van het CoRe-Water-concept, door:
 - Opdoen van praktijkervaring en verzamelen van procesgegevens over permeabiliteit, vervuiling/verstoppingsgedrag, reinigungsstrategie voor beheersing van vervuiling/verstopping
 - Verzamelen van waterkwaliteitsgegevens middels analyse van de geproduceerde permeaatstroom.
- Vergelijking met de prestaties van dit pilotonderzoek en de (pilot)ervaringen op de locaties RWZI Wehl (H5) en Gemaal Leusden (H6).
- Uitspraken kunnen doen over haalbaarheid, perspectief en opschaling van het CoRe-Water-concept.

In dit hoofdstuk wordt de data gepresenteerd en besproken over de technisch haalbaarheid. De evaluatie van de haalbaarheid, het perspectief en de opschaling van het CoRe-Water-concept volgt in hoofdstuk 7.

6.3 Methode: beschrijving CoRe-pilot

De CoRe-pilot is ontworpen door Blue-tec in samenwerking met KWR. In het basisontwerp voor de CoRe-pilot is een FO-RO-installatie ontworpen voor het concentreren van huishoudelijk afvalwater. De beoogde capaciteit van de installatie is $2\text{ m}^3/\text{h}$ waarbij wordt gestreefd naar het bereiken van een concentratiefactor (CF) van 30. Bij het ontwerp is gebruik gemaakt van een algemeen model voor de berekening van de FO-flux per module in elke trap, rekening houdend met het gemiddelde osmotische drukverschil over elke module, de gemiddelde verwachte temperaturen en de zoutflux (reversed salt flux, RSF). Op grond van kostenoverwegingen en vooruitlopend op de omstandigheden op ware grootte is de pilot ontworpen met twee opeenvolgende trappen.

Voor het ontwerp zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De ervaringen van de testen op de RWZI Wehl zijn toegepast bij het ontwerp van de proefinstallatie.

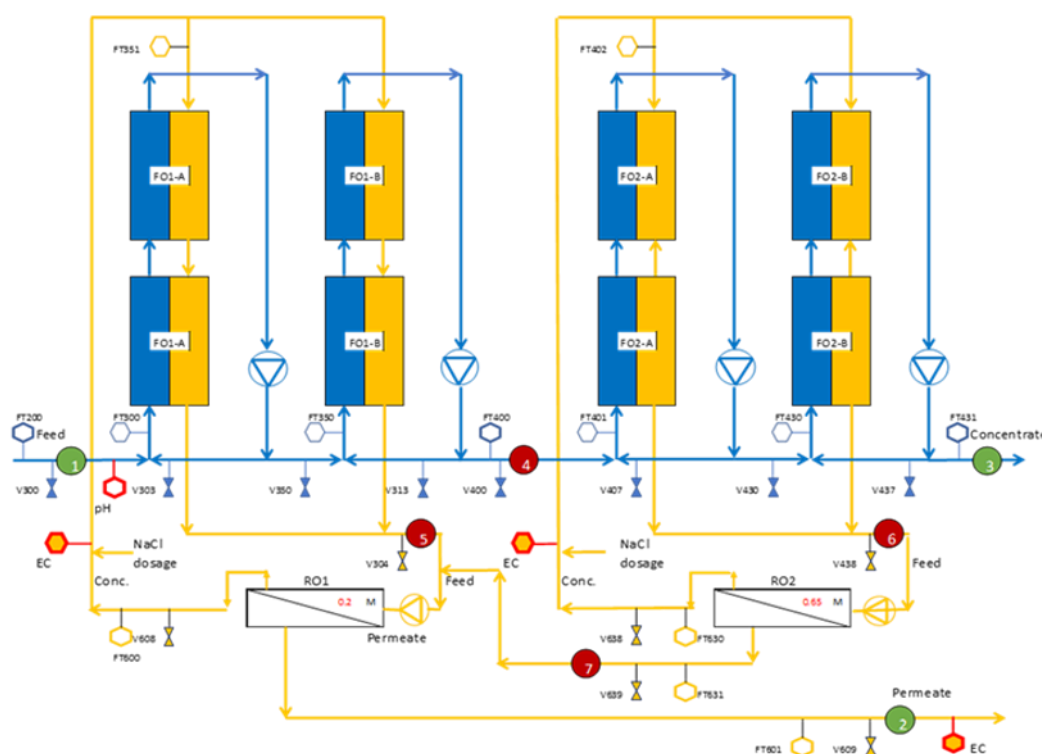
- De capaciteit van de pilot is 2 m³/uur.
- Beoogde concentratiefactor (CF) is 20 tot maximaal 30.
- De gebruikte FO-membranen zijn van het type FO8040 TCK 8" Toray membranen
- De FO-modules werken in tegenstroom.
- NaCl wordt gebruikt als DS
- Het systeem bestaat uit twee trappen FO-RO:
- Trap 1: CF = 7, molariteit van de onttrekkingsoplossing ongeveer 0,2 M NaCl (0,25 M in de winter)
- Trap 2: Cf = 4, molariteit van de gebruikte oplossing ongeveer 0,65 M NaCl (0,7 M in de winter)
- Voor de voorbehandeling van de CoRe-pilot wordt een roterende trommelzeef met een maaswijdte van 40 µm toegepast. De voorbehandeling wordt automatisch gereinigd door besproeiing van de zeef met water.

Het ontwerpproces van de CoRe-pilot is in november 2019 afgerond met een Basic Engineering document, een functionele beschrijving van de pilot, een voorlopig layout plan en een P&ID (piping & instrumentation diagram). In augustus 2020 gevolgd door een gebruikshandleiding (operational manual). De bouw van de pilot is gestart in oktober 2019 en in juni 2020 is de pilot opgeleverd. In de zomer van 2020 heeft de pilot voor commissioning bij KWR in Nieuwegein gestaan. Eind september 2020 is de pilot naar de RWZI Roermond getransporteerd.

De FO-RO CoRe pilot bestaat uit twee FO en twee RO trappen (Figuur 6-1). Alle FO-modules zijn verticaal geplaatst en worden in tegenstroom bedreven wat betekent dat ze worden gevoed vanaf de bovenkant terwijl de draw oplossing aan de onderkant het membraan binnenkomt.

De eerste FO trap bestaat uit twee, in serie geplaatste sub-trappen (FO1A, FO1B) die elk weer bestaan uit twee, in serie geplaatste sub-trappen (bv. FO1A1 en FO1A2) waarin zich acht parallelle 8" FO modules (Toray CSM TCK – FO-spiral wound element FO8040) bevinden. De eerste FO trap bestaat uit 32 8" FO membranen. Het geconcentreerde voedingswater, na de eerste FO trap, wordt vervolgens verder behandeld met de tweede FO-trap. De tweede FO trap bestaat uit twee, in serie geplaatste sub-trappen (FO2A, FO2B) die elk weer bestaan uit twee parallelle 8" FO modules. De tweede FO trap bestaat uit vier 8" FO membranen.

De verdunde drawoplossing na passage van de eerste FO trap (Draw 1), wordt behandeld met twee in serie geschakelde RO membranen (Filmtec SW30XLE-440i; 41 m²). Het concentraat wordt vervolgens weer terug gevoerd richting de drawzijde van de eerste FO trap. Het permeaat wordt afgevoerd richting het riool. Voordat het permeaat het riool bereikt zal een gedeelte worden afgevoerd richting de CIP vaten en is er de mogelijkheid om het permeaat via een bemonsteringsleiding te bemonsteren. De verdunde drawoplossing na passage van de tweede FO trap wordt behandeld met twee in serie geschakelde RO membranen (Filmtec SW30HRLE-4040; 7,9 m²). Het concentraat wordt vervolgens weer terug gevoerd richting de drawzijde van de tweede FO trap. Het RO-permeaat van trap 2 (Draw 2) wordt teruggevoerd naar drawzijde van de eerste FO trap (vanwege de relatief slechte kwaliteit van de trap in termen van NH₄ en NaCl). Om de drawconcentratie op de gewenste concentratie te houden wordt, indien nodig, geconcentreerd zout toegevoegd aan beide drawoplossingen voordat het de FO (Figuur 6-1) in gaat. De CoRe pilot staat schematisch weergegeven in Figuur 6-1. Gedetailleerde documentatie over de CoRe pilot is terug te vinden in *Operational manual oktober 2020 rev 01.pdf*, *Technical manual oktober 2020 Rev 00*, *Technical manual oktober 2020 Rev 00.docx*.



Figuur 6-1 Schematische weergave FO-RO CoRe pilot RWZI Roermond

De geleidbaarheid in beide drawloops wordt gemeten en geregistreerd na de RO en de zoutdosering van de desbetreffende loop. Verder wordt ook de geleidbaarheid van het permeaat van de eerste RO-trap RO1 gemeten en geregistreerd (Figuur 6-1). Daarnaast bevindt zich direct voor de FO een mechanisch zelfreinigend 45 µm filter om grotere deeltjes af te vangen. Ook is het mogelijk om de pH te corrigeren direct voor de FO met behulp van een HCl-dosering.

6.3.1 Bedrijfsvoering FO-RO CoRe pilot

De pilot wordt bestuurd via de HMI (besturingsprogramma CoRe pilot). Voor opstart van een test worden eerst de gewenste pH, voedingsdebiet, concentratiefactoren (CF) en drawconcentraties in de drawtanks ingesteld. Vervolgens wordt de pilot opgestart. Zolang de gewenste CF en drawconcentraties nog niet zijn bereikt, wordt tijdens de opstart het concentraat naar het riool afgevoerd. In die situatie is het niet mogelijk om te bemonsteren.

Zodra de gewenste CF en drawconcentratie zijn bereikt gaat de pilot in “Normal Operation”. Vanaf dit moment wordt het concentraat niet direct afgevoerd via het riool maar via de bemonsteringsleiding en begint de eigenlijke test. Om de gewenste CF te halen zal de pilot automatisch het voedingsdebiet en de drawconcentraties in de drawvaten bijsturen.

Er zijn verschillende reinigingsprocedures getest. Hiervoor is een doseerkabinet aanwezig met Cleaning In Place (CIP) vloeistoffen (2 stuks). De CIP vloeistoffen worden gedoseerd in aparte CIP vaten. De vaten worden met permeaat van RO1 gevoed en, indien dat beperkt beschikbaar is, aangevuld met drinkwater. Verder is het mogelijk om de vloeistoffen in deze CIP vaten te verwarmen. Er zijn twee CIP vaten aanwezig namelijk een CIP voeding en CIP draw vat om de FO-voedingsloop en de drawloop te kunnen reinigen.

De volgende reinigingsprocedures kunnen via de HMI kunnen worden uitgevoerd:

1. Waterspoeling. Een waterspoeling wordt uitgevoerd met het permeaat van RO1 eventueel aangevuld met drinkwater dat zich in de CIP tank bevindt. Tijdens een waterspoeling verdringt het schone water het

afvalwater, aan de voedingszijde van het membraan, uit de membranen richting het riool. Ook kan er een waterspoeling worden uitgevoerd aan de drawzijde van het membraan. Het schone water verdringt de drawoplossing uit het membraan dat wordt afgevoerd richting de drawtank.

2. Luchtwaterspoeling (AWF). Tijdens een AWF wordt de voedingszijde van het FO membraan gereinigd met een combinatie van permeaat/drinkwater en lucht waarbij het water wordt afgevoerd richting het riool. Tijdens de AWF wordt het membraan van onder af (in tegenstelling tot normale bedrijfsvoering) gevoed met water/lucht (1350/5400 L/uur) gedurende een vast in te stellen tijdsperiode.
3. Osmotisch terugspoelen (OBW). Tijdens een OBW verdringt het schone water, uit het CIP draw vat, de drawoplossing uit het membraan en wordt afgevoerd richting het drawvat. Aan de voedingszijde bevindt zich geconcentreerd afvalwater dat continu wordt gerecirculeerd. Hierdoor wordt schoon water via de drawzijde richting de voedingszijde getransporteerd. Tijdens de OBW wordt het CIP vat continu aangevuld met drinkwater om het waterverlies door het membraan tijdens de procedure te compenseren. Zodra de tweede FO trap (FO-2) een OBW ondergaat kan de eerste FO trap weer in 'normal operation' gaan. Zodra FO-1 weer in 'normal operation' is, zal FO-2 het (verdunde) concentraat richting het riool sturen. De OBW procedure is op tijd gestuurd.
4. Basische CIP. Een basische CIP kan zowel aan de voedingszijde als drawzijde worden uitgevoerd. Afhankelijk van de zijde wordt hiervoor het CIP voedings- of drawvat gebruikt. Tijdens een basische CIP wordt eerst een waterspoeling uitgevoerd. Vervolgens wordt de basische CIP gestart. Tijdens het onderzoek in Roermond is de basische CIP uitgevoerd met Ultrasil110. Eerst wordt de Ultrasil110 gedoseerd aan RO permeaat/drinkwater in het CIP vat. Tijdens het doseren wordt de oplossing gemengd en opgewarmd waarbij de oplossing wordt gerecirculeerd. Nadat de oplossing op de gewenste temperatuur is gebracht start de CIP. Eerst wordt de CIP vloeistof in de desbetreffende loop gebracht en gedurende een ingestelde periode gerecirculeerd. Vervolgens volgt een inweekperiode die weer wordt gevolgd door een recirculatieperiode. Daarna wordt de CIP vloeistof afgevoerd en het CIP vat gespoeld. Er wordt afgesloten met een waterspoeling.
5. Zure CIP. De zure CIP wordt op dezelfde wijze uitgevoerd als een basische CIP. In plaats van Ultrasil110 wordt Ultrasil73 gebruikt als CIP vloeistof.

De CIP-procedures zijn ingesteld deels op basis van de ervaringen van eerdere pilots en deels proefondervindelijk. De instellingen van de verschillende reinigingsprocedures zijn weergegeven in bijlage I.

6.3.2 Beschrijving commissioning

De commissioning (als afronding van de constructiefase; duur 2 maanden) bestaat uit het controleren van het besturingsprogramma. In de eerste plaats zijn hierbij de verschillende sensoren in het systeem gekalibreerd en is geverifieerd of de ingestelde schakelpunten correct reageren. Vervolgens zijn de verschillende procedures en bedrijfssituaties gesimuleerd en gecontroleerd. Dit is gebeurd met een installatie die is aangesloten op een schoonwater aanvoer, waarbij de geproduceerde stromen zijn gerecirculeerd naar de aanvoerbuffer. Deze fase is afgerond met een testrun met gesimuleerd afvalwater (drinkwater met enig zout) en samenstellingen van de twee DS-kringlopen conform de ontwerpuitgangspunten.

Commissioning: testen met de installatie en schoonwater

- Alle procedures doorlopen en "normal operation" bereikt
- Beperkte zoutgehaltes en bijbehorende concentratiefactor
- Flux in overeenstemming met de lage zoutgehaltes, beperkte drijvende kracht.
- Beide recoveryssystemen voor de draw solution in bedrijf;
- Niveaubewaking door aanpassing klepstand en toerental hoge druk pomp werkt naar behoren

Commissioning: resultaten van test met hogere zoutgehaltes

- Concentratiefactor van 22,4 behaald;
- Geleidbaarheid in draw 1: 11,4 mS/cm.
- Geleidbaarheid in draw 2: 21,17 mS/cm

- Geleidbaarheid permeaat: 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Commissioning: Meting schoonwaterflux (SWF) uitgevoerd op 17 september 2020 (afronding commissioning bij KWR).

Vervolgens is de pilot richting RWZI Roermond getransporteerd.

6.3.3 Opstart CoRe pilot in Roermond

Voordat de pilot op de RWZI Roermond kon worden opgestart, zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Realisatie benodigde aansluitingen, elektriciteit, drinkwater, proceswater (koeling), afvalwater.
- Gereed maken opstelling trommelzeef.
- Als eerste stap in de opstart is gecontroleerd of de installatie functioneert conform de situatie aan het eind van de constructieperiode. Dit is gedaan door de omstandigheden bij de testrun opnieuw in te stellen en de installatie hiermee te bedienen. Deze initiële test is opgevolgd door de schoonwatertesten. De resultaten daarvan zijn als eindresultaat van de oplevering beschouwd (SAT-test).
- Gelijktijdig met deze verificatie is ook de voorbehandeling van het influent definitief getest en ingeregeld. Dit betreft de koppeling met de aanvoerpompen van RWZI-influent en het gedrag van de trommelzeef. Hierbij is specifiek aandacht besteed aan het gedrag van de trommel bij verschillende aanvoerdebieten.

Uit metingen in januari 2021 bleek de benodigde capaciteit (2 m^3/uur) met de trommelzeef niet haalbaar.

Daarnaast werd geconstateerd dat, na behandeling met de trommelzeef, nog zand in het water aanwezig was.

Begin februari is een test uitgevoerd waarbij naast het bepalen van de capaciteit ook de waterkwaliteit voor en na de trommelzeef is geanalyseerd (deeltjestellingen, TOC, droog en gloeirest, ICPMS, Koolhydraten, eiwitten en ATP). De bevindingen en de analyseresultaten zijn weergegeven in bijlage III. Daarnaast is eind februari 2021 gedurende 1 week getest of de gewenste capaciteit van 2 m^3/uur wordt gehaald. Deze testen zijn voortgezet in maart 2021. Op basis van deze testen is besloten de trommelzeef te gaan voeden met voorbezonden afvalwater (dat wil zeggen afvalwater na passage van de voorbezinktank op de RWZI).

Naast het inrichten van de voorbehandeling diende ook het CIP-gedeelte van de pilot in gereedheid te worden gebracht. Na het oplossen van problemen bij het plaatsen van de CIP vaten in het CIP kabinet en bij het doseren van de chemicaliën (namelijk het ontbreken van de juiste hefmaterialen en ongunstige weersomstandigheden), is eind maart 2021 gestart met het inregelen en testen van de verschillende CIP procedures. Het inregelen duurde tot eind april 2021. Op basis van de resultaten van de CIP testen is het besturingsprogramma aangepast zodat de CIP automatisch kon worden uitgevoerd.

De opgedane praktijkervaring hangt vooral samen met het oplossen van allerlei problemen (gedurende de periode januari – april):

- Eindkap RO1 was stuk gegaan tijdens commissioning. De RO draaide toen op maximale capaciteit van 23 bar. Na vervanging draaide de RO weer op maximale capaciteit van 35 bar.
- Softwarematige aanpassing is uitgevoerd in samenwerking met Verautomation
 - pH correctie en zelfreinigend (50 μm filter) werken niet op de juiste manier. Dit is opgelost.
 - Aantal pompen/kleppen konden niet worden ingeregeld door de operators. Dit is aangepast.
 - CIP procedures aangepast en verwerkt in het besturingsprogramma.
- Nadat eind april 2021 een schoonwatertest op drinkwater is uitgevoerd, kon op 3 mei gestart worden met de eerste test op afvalwater. Tijdens deze test viel de pilot regelmatig in storing, doordat bij het in bedrijf gaan van het zelfreinigende filter de voedingspomp op hol sloeg en de installatie in storing viel. Na enkele dagen is handmatig een basische CIP (zie paragraaf 6.3.1) uitgevoerd, wat twee werkdagen duurde.
- Bij de daaropvolgende test op afvalwater brak de druksensor voor RO1 af. . Daarom is besloten om een volledige CIP procedure (handmatig) uit te voeren.

De verificatie van het gedrag van de installatie onder bedrijfsomstandigheden en het testen van de verschillende procedures (start-up, shut down, CIP) heeft aangetoond dat de pilot technisch goed functioneert. Hierna is gestart met de testen op schoonwater en afvalwater. De werkelijke testen op afvalwater zijn vanaf 7 juni uitgevoerd. Vanaf dat moment was ook de CIP-procedure volledig geautomatiseerd.

6.3.4 Onderzoeksopzet Roermond

Overzicht uitgevoerd onderzoek in de tijd

Onderstaand schema geeft per week een overzicht van de activiteiten met de CoRe-pilot in Roermond toegespitst op de bepaling van de schoonwaterflux (SWF), testen met afvalwater (AWT) en het uitvoeren van een autopsie (AUT) van een aantal membraanmodules.

test	SWF								SWF	
week	48	49	50	51	52	53	1	2	3	4
jaar	2020					2021				
test						SWF		SWF	SWF	
week	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
jaar										
test			SWF						AWT	AWT
week	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
jaar										
test	AWT		AWT	AWT					SWF	
week	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
jaar										
test								SWF	AWT	AWT
week	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
jaar										
test	AWT	AWT	AWT		AUT					
week	45	46	47	48	49	50	51	52	1	2
jaar									2022	

Figuur 6-2 Tijdlijn van het onderzoek met de CoRe-pilot op RWZI Roermond (SWF = bepaling schoonwaterflux; AWT = afvalwatertesten; AUT = autopsie)

Algemeen

De technische prestaties van de CoRe-pilot worden bepaald door het verloop van de permeabiliteit. Er is gestart met het meten van de schoonwaterpermeabiliteit (SWP), die de prestatie weergeeft van het schone systeem aan het begin van de test. De SWP is de waterflux van schoon water gedeeld door de geleidbaarheidstoename aan de voedingszijde van het membraan en wordt uitgedrukt in LMH/(mS/cm).

Daarna is de permeabiliteit van het systeem gevolgd op afvalwater (AWP). Het bestuderen van de AWP is in twee periodes verdeeld, voor en na de zomervakantie in 2021, gelabeld als de eerste serie en tweede serie afvalwatertesten. De prestaties hangen sterk af van de gehanteerde concentratiefactor CF. Zo kan een (kwalitatieve) uitspraak worden gedaan over het vervuiligingsgedrag van het membraan, en of de gehanteerde beheersmaatregelen (AWF, OBW en CIP) afdoende zijn. Een aanvullende parameter is de drukval over het FO-systeem die een indicatie geeft over het verstoppingsgedrag. Een laatste parameter is de zoutlek maar die is niet gemeten.

Tijdens dit onderzoek is veel data gegenereerd. In dit hoofdstuk is een selectie van grafieken (1 a 2 per onderdeel) weergegeven. De rest is in de bijlage opgenomen.

Schoonwatertesten

Schoonwatertesten zijn van essentieel belang om de status van de membranen te bestuderen in een nieuwe installatie maar ook om later als referentiewaarden te kunnen gebruiken voor en na testen met afvalwater.

Tijdens schoonwatertesten wordt de schoonwaterpermeabiliteit (SWP) bepaald van schoon water.

De schoonwatertesten zijn uitgevoerd met drinkwater. Om het opbouwen van osmotische druk over de opvolgende trappen in de FO-membranen te simuleren is aan het voedingswater extra zout (NaCl) toegevoegd.

Tijdens alle testen is de geleidbaarheid van het voedingswater op ongeveer 1,5 mS/cm gebracht. De testen zijn uitgevoerd met drinkwater zonder pH correctie. De testen zijn in recirculatie uitgevoerd waarbij zowel permeaat als concentraat zijn teruggevoerd naar de voedingstank (IBC). Een test start nadat de installatie in 'Normal Operation' gaat. Aangezien niet al het water wordt teruggevoerd (deel wordt gebruikt voor vullen CIP vaten richting het voedingsvat waarbij het niveau in het voedingsvat handmatig op niveau is gehouden door drinkwater en zout toe te voegen. Een test duurde tussen de twee tot vijf uur. Tijdens de testen zijn de waterfluxen van de verschillende FO stages en de geleidbaarheid van draw 1 en 2 geregistreerd. Vervolgens is de SWP bepaald door de flux te delen door de geleidbaarheid van de verschillende stages.

Tijdens de opstartperiode zijn een aantal schoonwatertesten uitgevoerd om het gedrag van de installatie te bepalen. Er zijn testen uitgevoerd bij verschillende CF instellingen. De resultaten van de commissioning bij KWR zijn gebruikt als input voor de instellingen tijdens de schoonwatertesten. De instellingen tijdens de schoonwatertesten zijn weergegeven in Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Instellingen schoonwatertesten tijdens onderzoek CoRe RWZI Roermond

Week	Datum	Draw1	Draw2	CF1	CF2	Cf totaal	Opmerkingen
nr.		Geleidbaarheid (mS/cm)					
48	25-11-2020	10	20	5	3		
3	21-1-2021	10	20	6	3,5	21	
10	8-3-2021	13	40	6	3,5	21	
12	24-3-2021	13	40	6	3,5	21	
13	30-3-2021	15	55	7	4	28	
17	29-4-2021	15	55	7	4	28	Voor eerste serie afvalwatertesten
33	19-8-2021	15	55	7	4	28	Na eerste serie afvalwatertesten
42	21-10-2021	20	55	7	4	28	Voor tweede serie afvalwatertesten

Eerste serie afvalwatertesten

De eerste testen op afvalwater zijn gestart op maandag 7 juni 2021 waarbij de CIP automatisch werd bedreven.

Tijdens de start van een test was het voedingsdebiet 2 m³/h. De ingestelde CFs waren 7 en 4 voor respectievelijk de eerste en tweede FO-trap en de pH werd gecorrigeerd tot een waarde van 6,0. De drawconcentraties in drawvat 1 en 2 waren respectievelijk 20 en 55 mS/cm. Een gedetailleerde omschrijving van de uitgevoerde CIPs staat in bijlage

I. Het bleek niet mogelijk om extra handmetingen en monsternemingen uit te voeren tijdens de testen doordat geen stabiele bedrijfsvoering werd bereikt, onder andere doordat de installatie regelmatig in storing viel. De bedrijfsvoering en problemen die werden ondervonden tijdens de eerste serie testen met afvalwater worden uitvoerig besproken in paragraaf 6.4.1.

Tweede serie afvalwatertesten

Nadat op donderdag 21 oktober een schoonwatertest is uitgevoerd, is vanaf maandag 25 oktober gedurende 5 weken een tweede serie afvalwatertesten uitgevoerd. Tijdens de start van een test is het voedingsdebiet 2 m³/h. De ingestelde CFs waren 7 en 4 voor respectievelijk de eerste en tweede FO trap en de pH werd gecorrigeerd tot 6,00. De drawconcentraties in drawvat 1 en 2 waren respectievelijk 20 en 55 mS/cm bij de start van de testen. Deze werden in de tweede week verhoogd naar 30 en 65 mS/cm om sneller de gewenste CF te bereiken. Vervolgens zijn de drawconcentraties niet meer aangepast. Tijdens de testen werd het stroomverbruik geregistreerd en vonden er iedere dag handmetingen plaats van de drukval van de verschillende FO stages en geleidbaarheid na de verschillende FO stages van het RO permeaat.

Eerst is gedurende twee weken een test uitgevoerd inclusief CIP procedures. De OBW is niet getest vanwege de beperkte beschikbaarheid van permaat. Deze test is herhaald en vervolgens heeft de pilot tijdens de laatste week alleen gedraaid op afvalwater zonder CIP. Aan het einde van de testen zijn het eerste en laatste FO element uit de installatie gehaald en aangeboden voor autopsie. Daarnaast is het gewicht van alle FO membranen bepaald aan het einde van de testcyclus. In Tabel 6-2 staat de set-up van de tweede serie testen weergegeven.

Tabel 6-2 Set-up tweede serie afvalwatertesten RWZI Roermond (week 43 t/m 47)

test	week	Datum	Actie
	nr.		
1	43	maandag 25 oktober 2021	test met afvalwater
		dinsdag 26 oktober 2021	
		woensdag 27 oktober 2021	AWF + CIP Basisch voeding
		donderdag 28 oktober 2021	start op afvalwater
		vrijdag 29 oktober 2021	AWF + CIP Basisch voeding
		Zaterdag _ zondag	Installatie staat stil (vanaf zaterdag 12:00)
	44	maandag 1 november 2021	test met afvalwater
		dinsdag 2 november 2021	
		woensdag 3 november 2021	AWF + CIP Basisch voeding
		donderdag 4 november 2021	test met afvalwater
		vrijdag 5 november 2021	AWF + CIP Basisch + zuur voeding en Basisch + zuur Draw
		Zaterdag _ zondag	Installatie staat stil (vanaf zondagmiddag 18:00)
2	45	maandag 8 november 2021	test met afvalwater
		dinsdag 9 november 2021	
		woensdag 10 november 2021	AWF + CIP Basisch voeding
		donderdag 11 november 2021	start op afvalwater
		vrijdag 12 november 2021	AWF + CIP Basisch voeding
		Zaterdag _ zondag	Installatie staat stil (vanaf zaterdag 12:00)
	46	maandag 15 november 2021	test met afvalwater
		dinsdag 16 november 2021	
		woensdag 17 november 2021	AWF + CIP Basisch voeding

3		donderdag 18 november 2021	test met afvalwater
		vrijdag 19 november 2021	AWF + CIP Basisch + zuur voeding en Basisch + zuur Draw
		Zaterdag _ zondag	Installatie staat stil (vanaf zondagmiddag 18:00)
	47	maandag 22 november 2021	test met afvalwater
		vrijdag 26 november 2021	einde afvalwater
	48	maandag 6 december 2021	verwijderen membraanmodules(2x FO (eerste en laatste))
		dinsdag 7 december 2021	Autopsie (bij KWR)

Monsterneming en bepaling kwaliteitsparameters

Er zijn alleen analyses uitgevoerd tijdens de tweede serie afvalwatertesten. In totaal waren er 7 monsterpunten aangebracht in de pilot (Figuur 6-1). Voor drie monsterpunten (aangegeven met groene bolletjes in Figuur 6-1) zijn monstereksten geplaatst. Met behulp van deze monstereksten kan volumeproportioneel worden bemonsterd (24 uurs monsters). Daarnaast zijn er vier monsterpunten (aangegeven met rode bolletjes in Figuur 6-1) waar steekmonsters zijn genomen. De monsterpunten inclusief codering zijn weergegeven in Tabel 6-3. Tijdens het onderzoek zijn de CIP-vloeistoffen niet geanalyseerd.

Tabel 6-3 Monsterpunten CoRe pilot Roermond

Monsterpunt	omschrijving	
1	Voeding FO na trommelzeef (voor pH correctie)	24 uurs monster
2	Verzameld Permeaat	24 uurs monster
3	Verzameld Concentraat	24 uurs monster
4	Concentraat FO1	Steekmonster
5	Voeding RO1	Steekmonster
6	Voeding RO2	Steekmonster
7	Permeaat RO2	Steekmonster

Monsternamen vond plaatst in de tweede week van een test, 24 uur nadat de pilot is gestart en vlak voordat er een AWF + CIP plaatsvond. Er zijn in totaal drie monsternomenten per week (dinsdag, woensdag en vrijdag). Tijdens de test zonder CIP zijn op dezelfde momenten monsters genomen. Op alle monsternamedagen zijn er monsters genomen voor analyse op een standaard analysepakket. Daarnaast zijn er tijdens de eerste test op de eerste en laatste monsterdag extra monsters genomen voor de analyse van ICPMS en Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) en organische microverontreinigingen (OMV). Gedetailleerde info over welke parameters er zijn gemeten in de diverse analysepakketten is te vinden in bijlage II.

Autopsie

Aan het einde van de testen zijn het eerste en laatste FO element uit de installatie gehaald en aangeboden voor autopsie. De autopsie is volgens de door KWR gehanteerde standaard uitgevoerd (Hijnen, Castillo et al. 2012). Nadat het membraan uit de installatie is gehaald (na 1,5 week stilstand) wordt deze gedurende 1 uur verticaal geplaatst zodat het overgebleven water eruit lekt. Vervolgens zijn de membranen naar KWR getransporteerd en is de volgende dag de autopsie uitgevoerd. Het membraan is opengesneden, er zijn foto's genomen en visueel beoordeeld. Daarna zijn er monsters genomen van het begin (voedingszijde), midden en einde (concentraatzijde) van het membraan (spacer + membraan). De monsters zijn geanalyseerd op ATP en Koolhydraten (CH) en Totaal Organisch Koolstof (TOC). Er is een extra membraanmonster van het begin genomen en geanalyseerd op calcium, ijzer en mangaan (totaal). Deze analyses zijn door het KWR laboratorium volgens standaardprocedures uitgevoerd.

6.4 Resultaten: operationele aspecten

6.4.1 Verloop eerste serie afvalwatertesten

Vanaf de opstart van de eerste testen waren er problemen met de bedrijfsvoering van de pilot. Het was niet mogelijk om gedurende een langere periode een stabiele bedrijfsvoering te bewerkstelligen. De installatie viel binnen 4 tot 8 uur uit waardoor de voorgenomen test van twee weken niet optimaal kon worden uitgevoerd. Al snel werd duidelijk dat de gewenste drawconcentraties in de drawvaten, noodzakelijk om de ingestelde CF's te halen, niet werd bereikt. De dosering van geconcentreerd zout bleek niet afdoende. Om toch de gewenste CF's te halen werd het voedingsdebiet automatisch (paragraaf 6.3.1) verlaagd, maar tegelijkertijd was de pilot zo beveiligd dat bij een voedingsdebiet $< 1,5 \text{ m}^3/\text{uur}$ de pilot uitvalt. Deze instelling kon niet worden gewijzigd door de operators. Daarom werd besloten om buiten de container een extra vat met geconcentreerd zout te plaatsen om ervoor te zorgen dat de zoutconcentratie van het drawvat op peil kon worden gehouden. Ook werd er op locatie een extra operator opgeleid die gedurende werkdagen altijd aanwezig was zodat storingen die niet vanaf kantoor/thuis konden worden opgelost werden verholpen. Op het moment dat deze acties liepen is er verder gedraaid tot half juli waarbij de CF's zijn verlaagd om ervoor te zorgen dat de pilot minder snel in storing viel. Half juli werd er lekkage op een rvs las voor de RO geconstateerd waardoor de installatie buiten bedrijf moest worden gesteld en gerepareerd. In overleg met de projectgroep is toen besloten om zodra de pilot weer in bedrijf zou zijn eerst een schoonwatertest uit te voeren. Vervolgens de pilot te reinigen met behulp van een volledige CIP procedure (CIP basisch en zuur, voeding en draw) en de membranen weg te zetten in een oplossing van natriumbisulfiet (zuurstofbinder) om verdere biologische groei te voorkomen tijdens stilstand in de zomerperiode.

Op basis van de verkregen data (afvalwatertesten en schoonwaterfluxtesten) zijn de instellingen voor de tweede afvalwatertesten bepaald. Voor aanvang van de testen is de stroomverbruik registratie geregeld en extra hulp on-site (onder andere voor handmatige metingen, storing on-site oplossen). Daarnaast werd het voedingsdebiet aangepast waarbij de installatie automatisch uitvalt van $1,5$ naar $0,5 \text{ m}^3/\text{uur}$ en werd de geconcentreerde zoutdosering uitgebreid.

6.4.2 Verloop tweede serie afvalwatertesten

Tijdens de tweede serie afvalwatertesten verliep de bedrijfsvoering van de installatie beter dankzij de aanpassingen. Echter het zoutgehalte in drawvat 1 kon niet op peil worden gehouden ondanks het toevoegen van een hogere en meer geconcentreerde zoutoplossing. Het zoutgehalte in drawvat 2 werd probleemloos op de gewenste concentratie gehouden. Om toch de CF's te halen werd het voedingsdebiet (automatisch) in loop van de tijd verlaagd tot de kritische grens van $0,5 \text{ m}^3/\text{uur}$. Door geforceerd (op locatie of van afstand) de installatie te stoppen en weer opnieuw te starten (voedingsdebiet $2,0 \text{ m}^3/\text{uur}$) kon de installatie in bedrijf worden gehouden. Na het opnieuw opstarten van de installatie duurde het ongeveer een half uur voordat de installatie stabiel draaide onder de ingestelde condities. Tijdens de stabiele bedrijfsvoering bleek het mogelijk om de tweewekse cyclus met en zonder CIP inclusief handmetingen en monsternemingen uit te voeren.

6.5 Overzicht technische prestaties CoRe-pilot

6.5.1 Schoonwatertesten

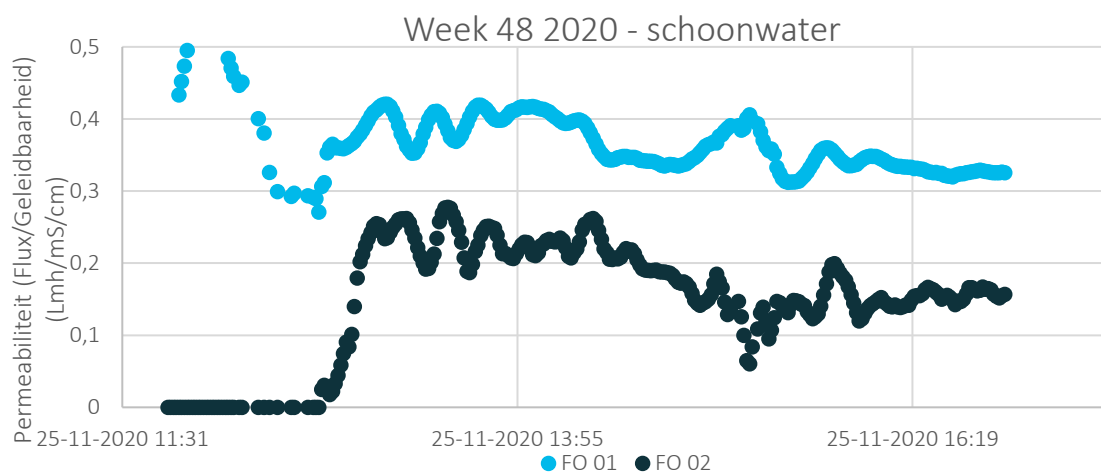
De allereerste SWP-gegevens van de FO-membranen zijn essentieel om een goed beeld te kunnen vormen de initiële presentaties van het systeem. De allereerste SWP-gegevens zijn gegenereerd tijdens de commissioning van de CoRe-pilot bij KWR in de zomer van 2021 (

Tabel 6-4). Helaas is de initiële prestatie niet systematisch onderzocht, maar een indicatieve SWP is bepaald van 1,62 LMH/bar voor FO1 en circa 0 LMH/bar voor FO2.

Tabel 6-4 SWP-gegevens tijdens commissioning bij KWR

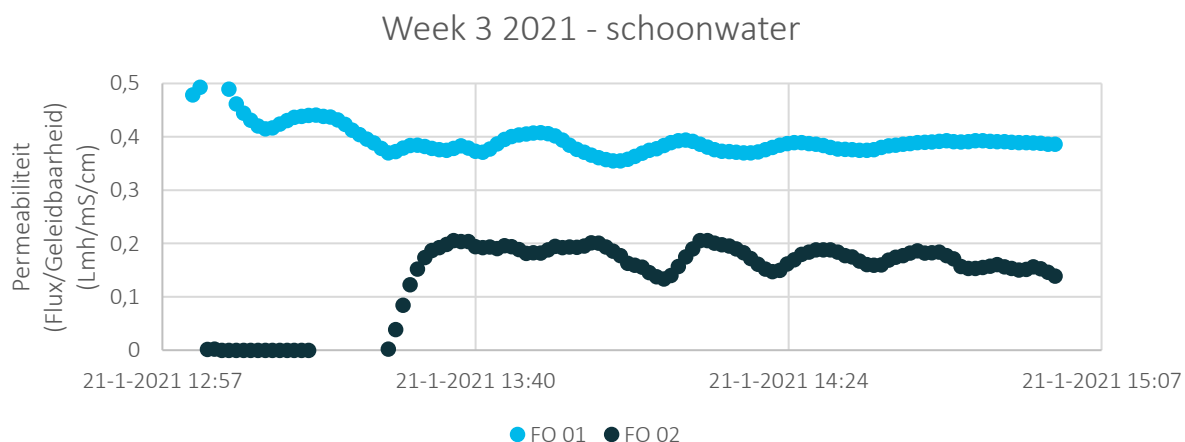
					"Perm"	"Perm"	"Perm"	"Perm"
week		CF1	CF2	Cftotaal	FO1	FO2	FO1	FO2
					LMH/(mS/cm)		LMH/bar	
39	22-9-2020	5,08	4,42	22,45	0,29	0,24	1,62	-0,03

De eerste SWP-gegevens op de locatie RWZI Roermond zijn gegenereerd in week 48 2020 tijdens de opstart van de CoRe-pilot (Figuur 6-3). De SWP van FO1 is ca. 0,4 LMH/(mS/cm) en daarmee aanzienlijk lager (50 %) dan de SWP tijdens de commissioning (0,81 LMH/(mS/cm)). De SWP van FO2 stelt zich in op ca. 0,15 LMH/(mS/cm). Tijdens de maandenlange stilstand tussen de commissioning en opstart bij RWZI Roermond is mogelijk membraanvervuiling opgetreden ten gevolge van biologische groei in stilstaand water in het CoRe-systeem. Dit is echter niet aangetoond met aanvullende metingen.



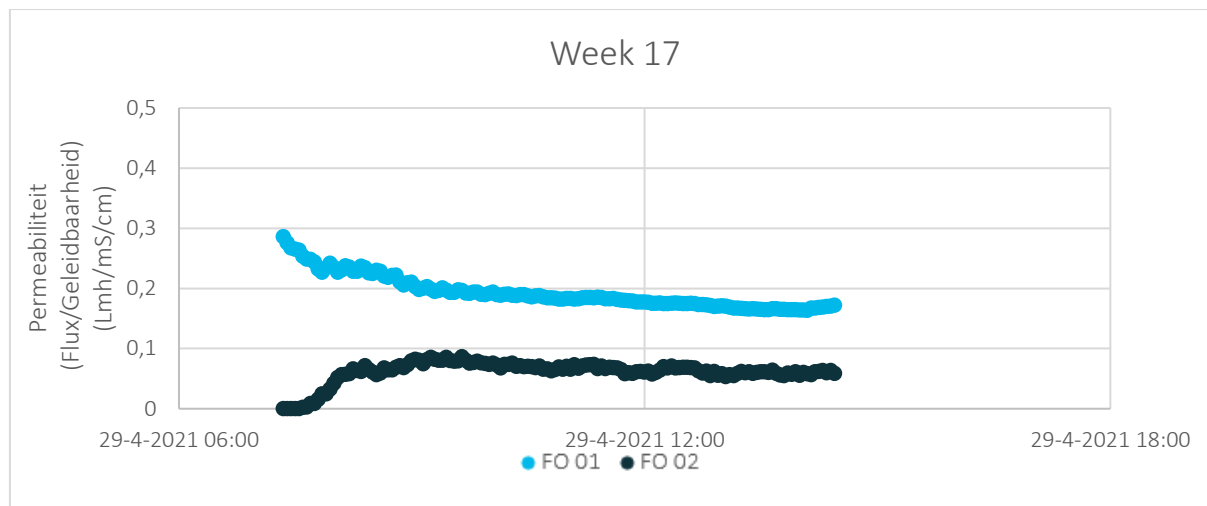
Figuur 6-3 Prestatie (permeabiliteit) tijdens schoonwatertesten in week 48 2020 voor FO1 en FO2

De SWP-gegevens van FO1 en FO2 blijven gedurende de eerste weken (t/m week 3) van de bedrijfsvoering op schoonwater gelijk aan deze eerste metingen (zie Figuur 6-4). Er treedt blijkbaar geen additionele vervuiling op in januari 2021.



Figuur 6-4 Prestatie (permeabiliteit) tijdens schoonwatertesten in week 3 2021 voor FO1 en FO2

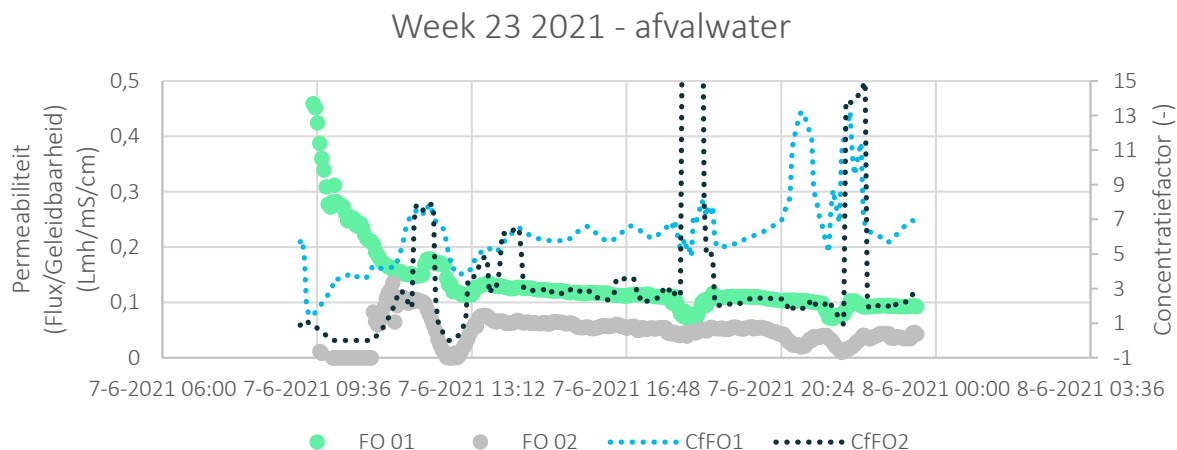
De SWP-gegevens van FO1 en FO2 dalen echter tijdens de volgende weken (week 3 t/m week 17) van bedrijfsvoering op schoonwater. SWP FO1 en FO2 dalen naar respectievelijk 0,16 LMH/(mS/cm) en 0,06 LMH/(mS/cm) (Figuur 6-5). Er treedt blijkbaar aanzienlijke additionele vervuiling op tijdens de schoonwatertesten tussen januari en april 2021. De oorzaak van deze vervuiling is moeilijk te achterhalen, wel is tijdens de bedrijfsvoering visueel een sterke algengroei in de voedingstank waargenomen.



Figuur 6-5 Prestatie (permeabiliteit) tijdens schoonwatertesten in week 17 2021 voor FO1 en FO2

6.5.2 Eerste serie afvalwatertesten

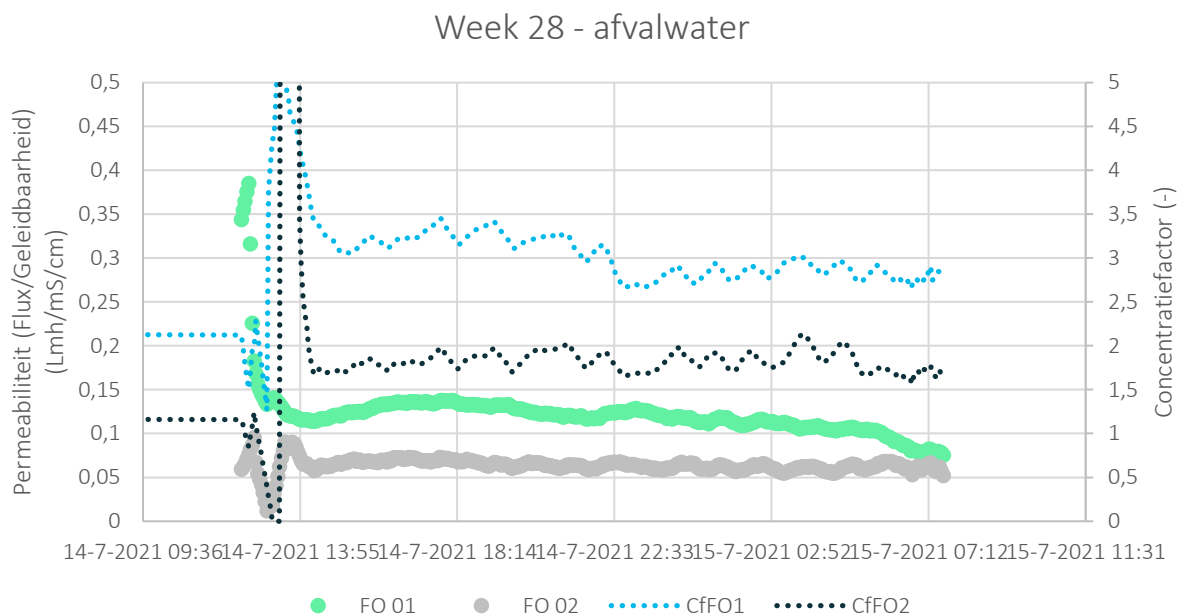
Op 7 juni is de eerste serie afvalwatertesten gestart. In Figuur 6-6 en Figuur 6-7 zijn de gegevens van week 23 en week 28 getoond. Na enkele instellingseffecten stabiliseert de AWP van FO1 in week 23 op 0,1 LMH/(mS/cm), dat is 60% van de laatste SWP-gegevens van FO1. De AWP van FO2 bedraagt dan 0,05 LMH/(mS/cm), dat is 83% van de laatste SWP-gegevens van FO2. De CF-waarden bedroegen 7 en 2,5 voor respectievelijk FO1 en FO2, wat een totale CF oplevert van 17,5. De gewenste CF-instelling (28) kon niet worden bereikt, vooral door een limitatie in de drijvende kracht FO2 ten gevolge van een te hoog zoutgehalte in het afvalwater (zie H7).



Figuur 6-6 Prestatie (permeabiliteit en CF) tijdens afvalwatertesten in week 23 2021 voor FO1 en FO2

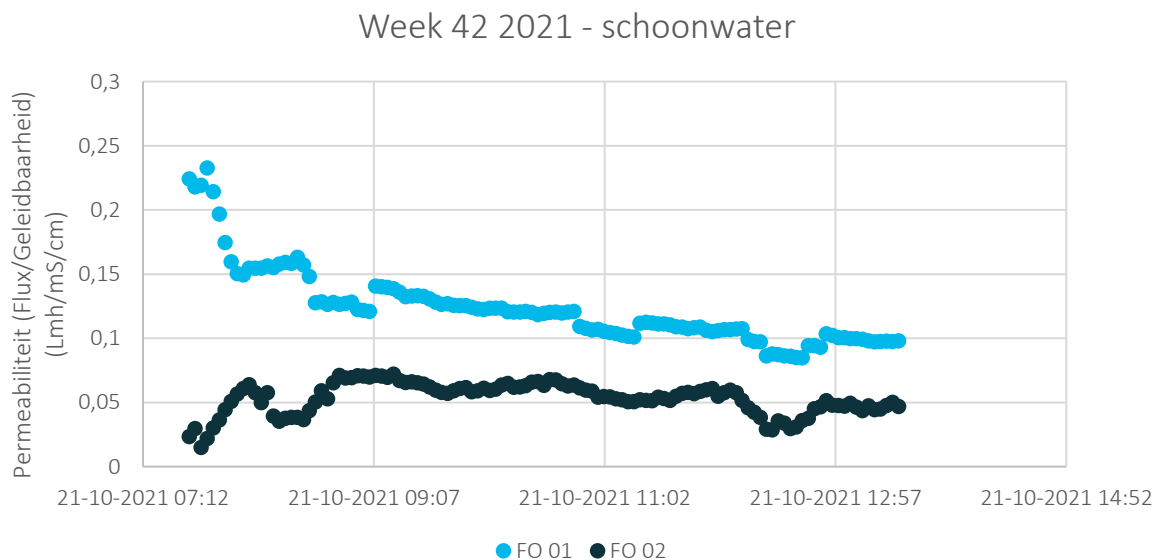
De prestatiegegevens in week 28 komen overeen met week 23, AWP = 0,1 LMH/(mS/cm) (FO1) en AWP = 0,05 LMH/(mS/cm) (FO2) (Figuur 6-7). Het lijkt er echter op dat de AWP van FO1 aan het einde van het experiment nog verder daalt. De CF-waarden in week 28 zijn significant lager: CF1 = 3 en CF2 = 2 en CF_tot = 6 (oorspronkelijk instelling van CF_tot is 28). Er treedt blijkbaar een significante vervuiling en verstopping op van zowel de FO1 en FO2 membranen die niet voldoende kan worden beheerst door de toegepaste maatregelen, zijnde AWF, OBW en

CIP-reiniging. Ten gevolge van deze vervuiling/verstopping daalt de permeabiliteit en is de oorspronkelijke CF-instelling van 28 niet haalbaar. Deze effecten worden groter naar gelang het experiment vordert.



Figuur 6-7 Prestatie (permeabiliteit en CF) tijdens afvalwatertesten in week 28 2021 voor FO1 en FO2

Na de zomerperiode van 2021 is de installatie terug in bedrijf genomen en is begonnen met schoonwatertesten om de staat van de CoRe-pilot te kunnen beoordelen (Figuur 6-8). De SWP was – na stabilisatie – 0,1 LMH/(mS/cm) en 0,05 LMH/(mS/cm) voor respectievelijk de FO1 en FO2 membranen. Deze waarden zijn hetzelfde als de laatste gemeten permeabiliteitsdata met afvalwater. Ondanks de uitvoerige beheersmaatregelen (AWF, OBW, CIP en langdurig inweken met natriumbisulfiet) kon de opgetreden vervuiling tijdens de afvalwatertesten niet worden weggenomen. Er is kennelijk irreversibele vervuiling opgetreden. De tweede serie afvalwatertesten zijn vervolgens uitgevoerd met deze vervuilde FO1 en FO2 membranen.



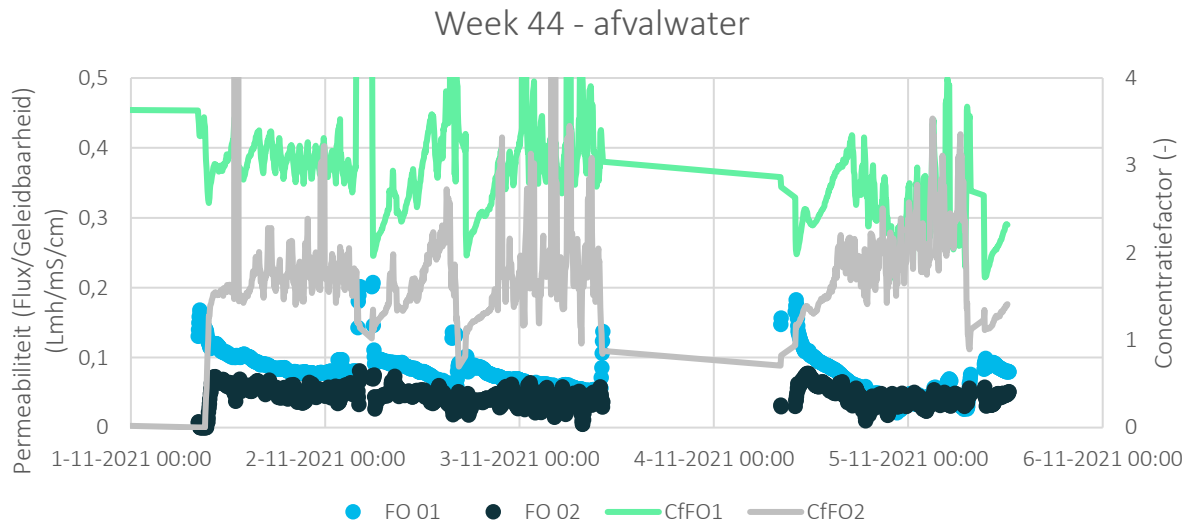
Figuur 6-8 Prestatie (permeabiliteit) tijdens schoonwatertesten in week 42 2021 voor FO1 en FO2

6.5.3 Tweede serie afvalwatertesten

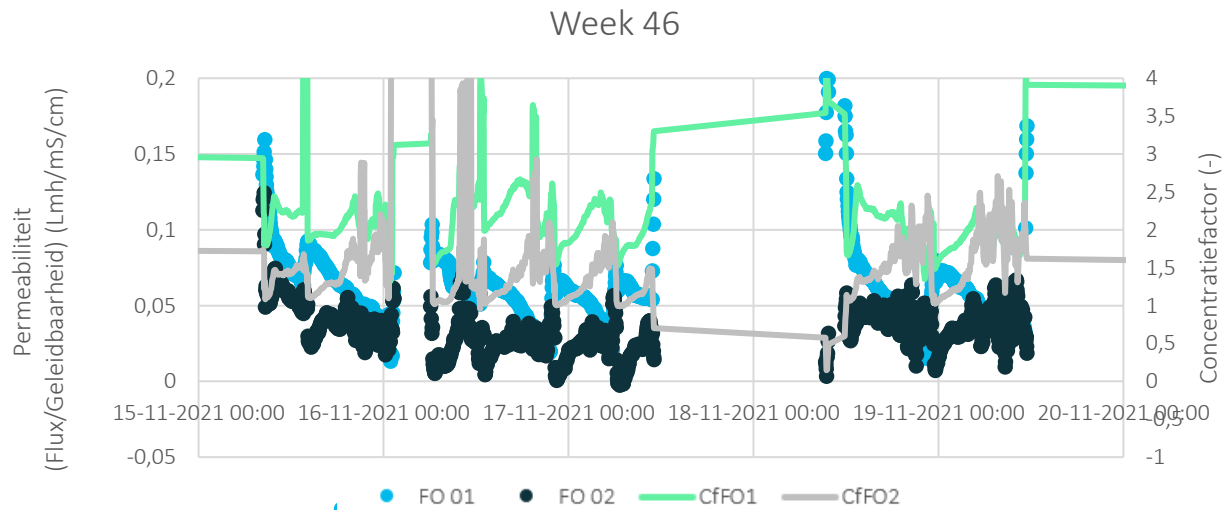
De tweede serie afvalwatertesten vond plaats op sterk vervuilde membranen (zie 6.5.2). Tijdens deze testen zijn in week 43 t/m 46 intensieve reinigingen uitgevoerd met OBW en CIP. De AWP was 0,07 LMH/(mS/cm) en 0,04

LMH/(mS/cm) voor respectievelijk de FO1 en FO2 membranen in week 44 (Figuur 6-9). De CF-waarden bedroegen $CF_1 = 3$, $CF_2 = 1,5$ en $CF_{\text{tot}} = 5$. In week 46 was de AWP 0,07 LMH/(mS/cm) en 0,035 LMH/(mS/cm) voor respectievelijk de FO1 en FO2 membranen bij $CF_1 = 2$ en $CF_2 = 1,5$ ($CF_{\text{tot}} = 3$) (Figuur 6-10).

De FO1 en FO2 zijn nog meer vervuild geraakt tijdens week 43 t/m 46 en de oorspronkelijke CF-instelling waren niet haalbaar. Ondanks de intensieve opvolging met regelmatige reiniging, blijkt het systeem onomkeerbaar vervuild.



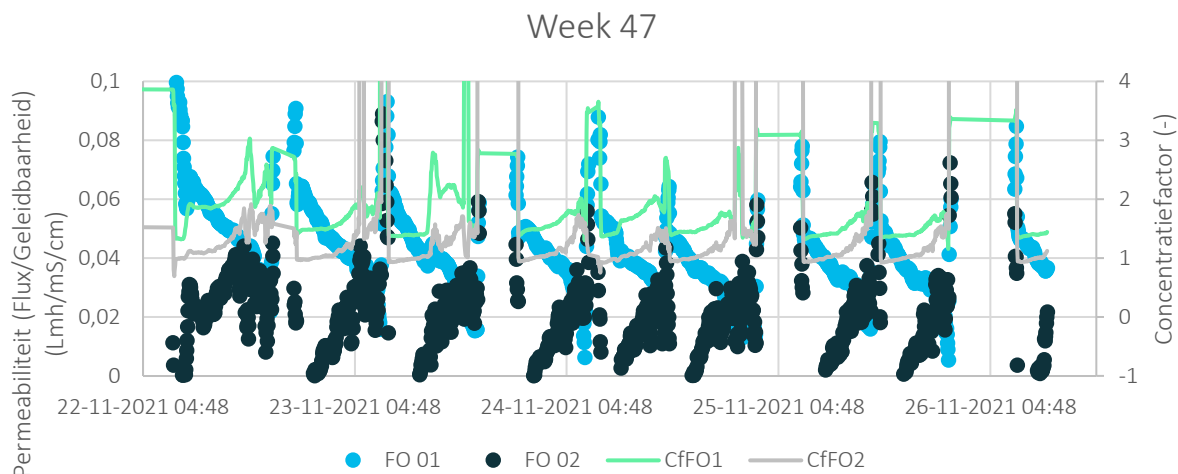
Figuur 6-9 Prestatie (permeabiliteit en CF) tijdens afvalwatertesten in week 44 2021 voor FO1 en FO2 (met CIP)



Figuur 6-10 Prestatie (permeabiliteit en CF) tijdens afvalwatertesten in week 46 2021 voor FO1 en FO2 (met CIP)

In week 47 is de installatie bedreven zonder intensieve en periodieke reiniging met OBW en CIP (de 'crash-test'). De AWP daalde verder naar 0,04 LMH/(mS/cm) en 0,02 LMH/(mS/cm) voor respectievelijk de FO1 en FO2 membranen (Figuur 6-11). De CF-waarden bedroegen $CF_1 = 1,5$, $CF_2 = 1$ en $CF_{\text{tot}} = 1,5$. De FO1 en FO2 zijn nog extremer

vervuild geraakt en de oorspronkelijke CF-instellingen waren niet meer haalbaar..

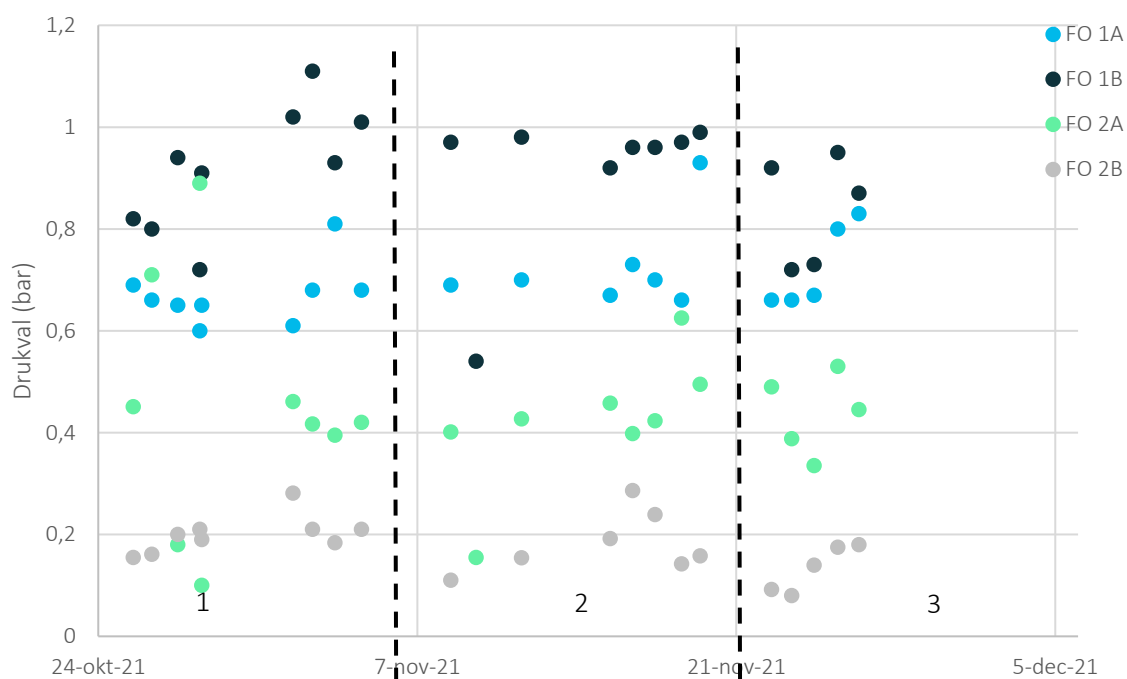


Figuur 6-11 Prestatie (permeabiliteit en CF) tijdens afvalwatertesten in week 47 2021 voor FO1 en FO2 (zonder CIP)

6.5.4 Drukvalmetingen als indicatie voor systeemverstopping

Naast het monitoren van de permeabiliteit (SWP en AWP) (6.5.1 t/m 6.5.3) is de opvolging van de drukval over de FO-membranen belangrijk om een indicatie te krijgen van eventuele verstopping van de FO-membranen. Het CoRe-systeem was niet uitgerust met automatische drukverschilmeters, en de drukval is daarom manueel bepaald uit het verschil tussen drukmeters voor en na de FO-membranen. Deze manuele drukmeting is alleen uitgevoerd tijdens de tweede serie afvalwatertesten vanaf week 43. Het is daarom niet mogelijk om een vergelijking te maken met de drukval in schone FO-membranen aan het begin van het project.

Tijdens de tweede serie afvaltesten blijkt dat de FO1-membranen een hogere drukval hebben dan de FO2 membranen. Ook wordt er een verschil waargenomen in drukval tussen de twee verschillende straten A en B, voor zowel FO1 en FO2. De hoogste drukval wordt gemeten in de FO1B membranen (ca 1 bar) gevolgd door de FO1A membranen (ca 0,7 bar). Aan het einde van testen lijkt de drukval van FO1A te stijgen naar dezelfde waarden als FO1B (Figuur 6-12). De drukval van FO2A is ca 0,4 bar en FO2B is ca 0,2 bar. In deze periode kan nagenoeg geen drukvalstijging worden waargenomen. Deze waarden zijn zeer hoog, en het lijkt erop dat de membranen maximaal zijn verstopt.



Figuur 6-12 Drukvalgegevens tijdens de tweede serie afvalwatertesten in 2021 voor FO1 en FO2 (week 43 t/m 47)

6.6 Autopsie onderzoek

De autopsie is visueel weergegeven in onderstaande foto's. Na het openzagen zijn membraancoupons verwijderd voor het analytisch onderzoek (Figuur 6-13 A en B).



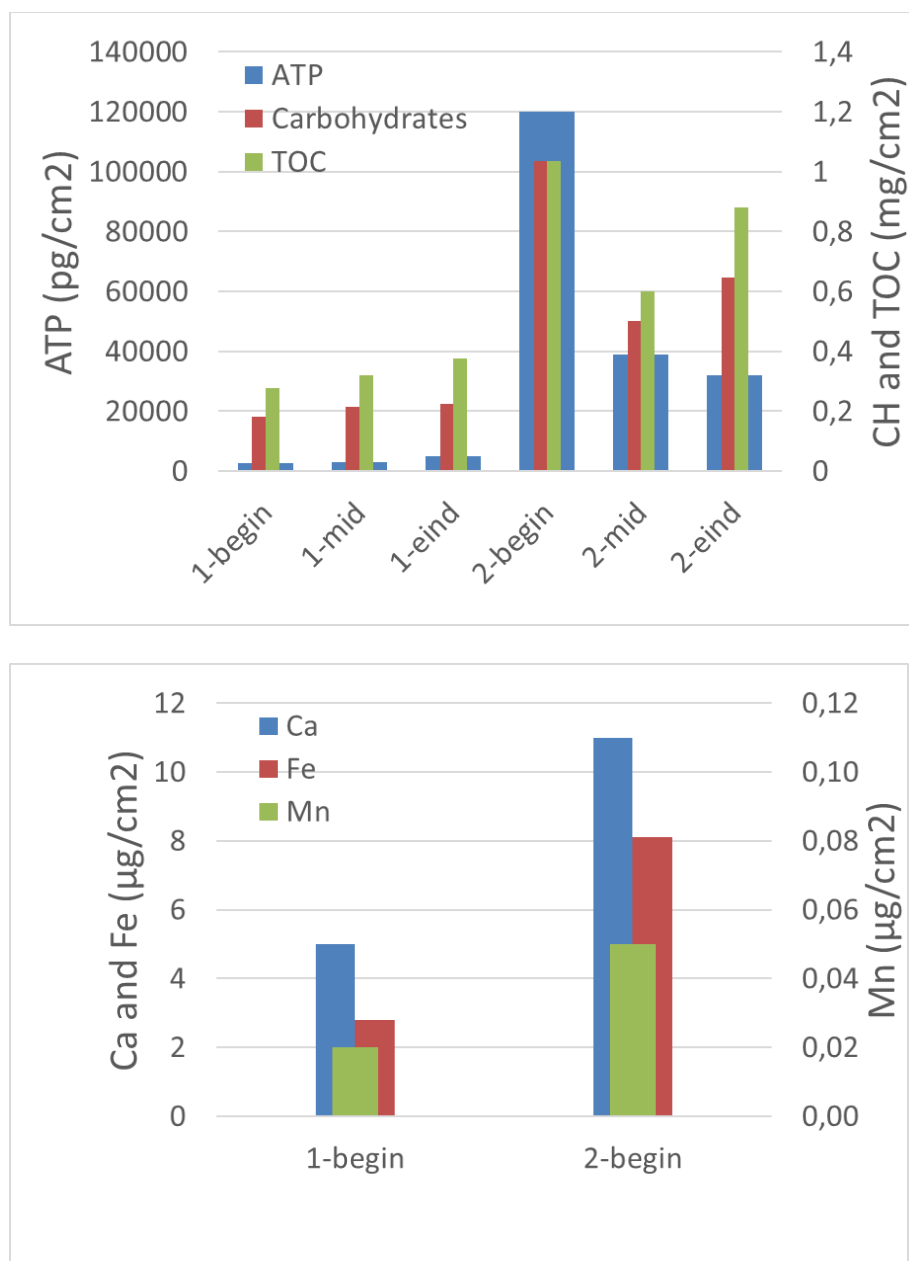
Figuur 6-13 Membraanautopsie van de FO-elementen van de CoRe-pilot in week 49 2021. A) Het openzagen van het membraan. B) Het uitknippen van coupons voor verdere analyse. C) Vervuiling van de FO-module. D) en E) Vervuiling van de membraanvoedingszijde. F) De drawoplossing zijde

Visuele inspectie wijst uit dat het membraan sterk vervuild is (Figuur 6-13 B t/m E). Er is een dikke bruine slijmerige laag zichtbaar aan de voedingszijde van het membraanelement. Deze laag is niet uniform verdeeld over het oppervlakte maar volgt op sommige plaatsen het (ruitjes)patroon van de voedingsspacer. Het valt overigens ook op dat er geen vervuiling optreedt op de plek van de voedingszijde waar zich aan de *andere* zijde de lijmrands bevindt (Figuur 6-13 D). Overigens wordt, conform verwachting, visueel geen vervuiling waargenomen aan de drawzijde van het membraan waar zich de zoutoplossing bevindt (Figuur 6-13 F).

Na het openmaken van het membraan, zijn membraancoupons verwijderd aan het begin, midden en einde van de beide FO-membranen (1^{ste} en laatste membraan uit de CoRe-pilot). Deze coupons zijn gebruikt om het ATP-, koolhydraatgehalte (CH) en TOC te bepalen⁴ (zie Figuur 6-14 boven). De ATP-waarden zijn laag voor het 1^{ste} membraan ($< 5.000 \text{ pg ATP/cm}^2$) en hoog voor het laatste membraan ($30.000\text{--}120.000 \text{ pg ATP/cm}^2$). ATP is een maat voor de actieve/levende biomassa en moet binnen 24 uur worden bepaald. In onze testen was dit niet mogelijk, waardoor deze resultaten moeilijk exact kunnen worden geïnterpreteerd. De CH-waarden zijn hoog voor het 1^{ste} membraan (ca $0,2 \text{ } \mu\text{g CH/cm}^2$) en zijn zeer hoog voor het laatste membraan ($0,5\text{--}1 \text{ } \mu\text{g CH/cm}^2$). CH is een maat voor de biopolymeren, die een belangrijke rol spelen bij membraanvervuiling. De TOC-waarden zijn vergelijkbaar en iets hoger in vergelijking met de CH-waarden en bevestigt het beeld hierboven. De Ca, Fe en Mn-waarden (Figuur 6-14 onder) zijn hoger voor het laatste membraan wat ook overeenkomt met de ATP, CH en TOC-gehalten.

Het 1^{ste} membraan is sterk vervuild, echter minder dan het extreem vervuilde laatste membraan uit de CoRe-pilot. Doordat de concentratie van afvalwater het hoogst is bij de laatste FO-membranen in de installatie, resulteert dit in de grootste vervuiling. De gevonden waarden zijn extreem hoog. Ook valt op dat de vervuiling aan het begin van het laatste FO-membraan nog hoger is dan in het midden en het einde van het membraan. Bij biologische vervuiling wordt dit effect vaker waargenomen. De autopsiegegevens bevestigen het beeld dat was ontstaan tijdens de bedrijfsvoering van de CoRe-pilot. Uit deze autopsiegegevens lijkt het dat adsorptievervuiling vooral plaatsvindt in het begin van de installatie (1^{ste} membraan) en dat er meer biofouling plaatsvindt aan het einde van de installatie (laatste membraan).

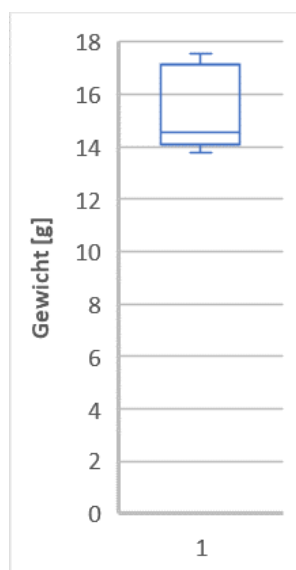
⁴ Ter vergelijking. ATP-waarden van $20.000\text{--}90.000 \text{ pg ATP/cm}^2$ en CH-waarden van $0,05\text{--}0,4 \text{ } \mu\text{g/cm}^2$ zijn gemeten voor zeer vervuilde omgekeerde osmose membranen oppervlaktewater (Cornelissen, E. R., D. J. H. Harmsen, B. Blankert, L. P. Wessels and W. G. J. van der Meer (2021). "Effect of minimal pre-treatment on reverse osmosis using surface water as a source." *Desalination* **509**.)



Figuur 6-14 ATP, CH en TOC gehalten aan het begin, midden en einde van het 1^{ste} en laatste (2) FO-membraan uit de CoRe-pilot (boven). Ca, Fe en Mn gehalten aan het begin van het 1^{ste} en laatste (2) FO-membraan uit de CoRe-pilot (onder).

Aangezien de FO-membranen sterk vervuild waren, is besloten om alle membranen uit de installatie te halen en te wegen. Het drooggewicht van een typische vergelijkbare full-scale 8-inch module is 13,2 kg⁵. Het gemiddelde gewicht van de FO-membranen (behalve die zijn gebruikt voor de membraanautopsie) is 15,4 ± 1,5 kg (Tabel 6.5 en Figuur 6-15). De gemiddelde gewichtstoename door vervuiling bedraagt dan 2,2 kg per FO-membraan (17%). In totaal is tijdens de vervuilingstesten in Roermond 79 kg aan vuil geaccumuleerd op de membranen.

⁵ Het drooggewicht van een FO8040 TCK 8" Toray module is door BlueTec vastgesteld op 13,2 kg. membraan



Figuur 6-15 Gemiddelde gewicht van FO-membranen uit de CoRe-pilot

Tabel 6-5 Gewicht FO modules einde testen RWZI Roermond

Trap	Membraan	Gewicht kg	Trap	Membraan	Gewicht kg	Trap	Membraan	gewicht kg
FO 1A	FOM300	KWR (Autopsie)	FO 1B	FOM350	14,2	FO2A	FOM400	14,47
	FOM301	15,6		FOM351	13,76		FOM401	15,52
	FOM302	16,88		FOM352	14,16	FO2B	FOM430	14,24
	FOM303	17,2		FOM353	14,17		FOM431	KWR (Autopsie)
	FOM304	16,6		FOM354	14,17			
	FOM305	16,57		FOM355	14,59			
	FOM306	17,1		FOM356	14,31			
	FOM307	16,74		FOM357	13,79			
	FOM308	17,46		FOM358	14,09			
	FOM309	17,37		FOM359	13,95			
	FOM310	16,45		FOM360	13,91			
	FOM311	17,45		FOM361	14,03			
	FOM312	17,55		FOM362	13,93			
	FOM313	17,56		FOM363	14,32			
	FOM314	17,25		FOM364	13,92			
	FOM315	17,19		FOM365	13,92			

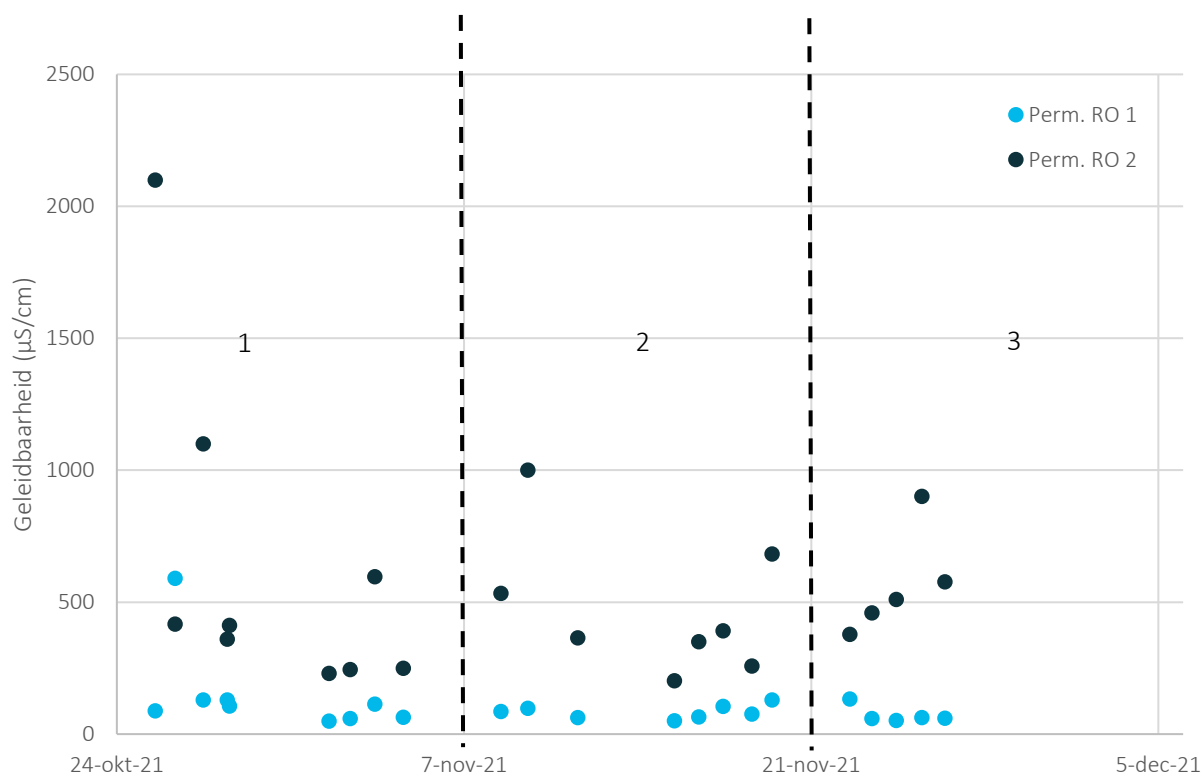
6.7 Overzicht resultaten kwaliteitsparameters CoRe-pilot

De bedrijfsvoering van de CoRe-pilot is hierboven uitvoerig besproken. Naast gegevens over de bedrijfsvoering is het uiteraard van belang om te weten en te begrijpen hoe de waterkwaliteit verandert/verbetert door het CoRe-Water-concept. In deze paragraaf wordt de waterkwaliteit gepresenteerd na de FO-membranen (en de RO-membranen).

6.7.1 Geleidbaarheid

Het afvalwater passeert de CoRe pilot via twee membraanprocessen, het FO en het RO-proces en twee verschillende trappen 1 en 2 (Figuur 6-1). De geleidbaarheid wordt gemeten na de FO1-RO1 trap en na de FO2-RO2 trap. Omdat de RO2-permeaatstroom wordt teruggevoerd voor de RO1, is het permeaat na RO1 de uiteindelijke productstroom van de CoRe-pilot.

De geleidbaarheid van het afvalwater van RWZI Roermond is ca 2.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Deze geleidbaarheid varieert gedurende de afvalwatertesten in week 43 t/m 47, wat resulteert in een variatie in de permeaatgeleidbaarheid van RO1 en RO2 (Figuur 6-16). Afgezien van enkele uitschieters is de gemiddelde geleidbaarheid van het permeaat van RO1 en RO2 respectievelijk ca. 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en ca. 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De geleidbaarheid van de uiteindelijke productstroom van de CoRe-pilot is dus ca. 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, wat een zeer acceptabele waarde is.



Figuur 6-16 De geleidbaarheid in de permeaatstromen RO1 en RO2 van de CoRe-pilot (week 43 t/m 47)

6.7.2 Retentie van CZV en ionen

FO-membranen zijn een robuuste barrière voor de meeste organische en anorganische componenten in water. Op het afvalwater van RWZI Roermond en in het permeaat van de FO-membranen zijn ICPMS, CZV, TIC, TOC, SO_4 , tot-N en tot-P-metingen uitgevoerd. Hieruit is de retentie bepaald van CZV en enkele andere componenten over het FO-RO-membraan.

De retentie (R) is bepaald met behulp van de volgende formule:

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_v}\right) * 100$$

Waarbij voor de retentie van de FO-RO:

C_v = voeding FO

C_p = verzameld permeaat = permeaat RO1

Waarbij voor de retentie van RO1:

C_v = voeding RO1

C_p = permeaat RO1

Waarbij voor de retentie van RO2:

C_v = voeding RO2

C_p = permeaat RO2

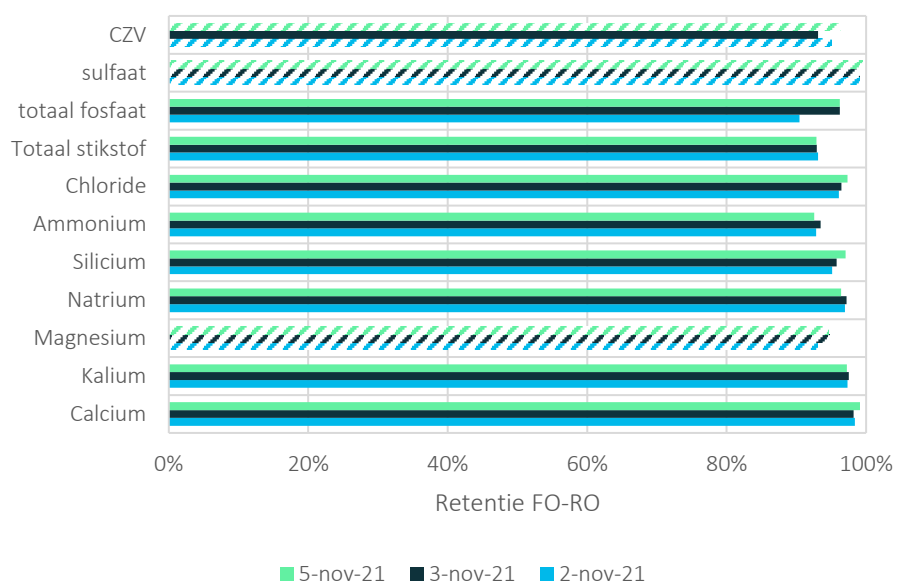
De retentie van alle componenten met FO-RO tijdens de periode met CIP is hoger dan 90% waarvan een aantal is begrensd door de analytische rapportagegrens (Figuur 6-17). Het is opvallend dat de ammoniumretentie (93% - 94%) hoger is dan tijdens de pilottesten in Wehl en Leusden, waar de ammoniumretentie een aandachtspunt was. De verklaring hiervoor is de lage CF-waarde ($CF < 5$) tijdens de pilottesten in Roermond in vergelijking met CF-waarden tijdens de testen in Wehl en Leusden ($CF > 5$). Door een lagere CF is de ammoniumconcentratie voor het FO-membraan lager wat leidt tot een lagere concentratie in de DS. Hierdoor is uiteindelijk ook na het RO-membraan de concentratie lager en daarmee de permeaatkwaliteit beter. Het is daarom ook de verwachting dat de ammoniumretenties bij hogere CF-instellingen lager zullen zijn.

De retentie van alle componenten met FO-RO tijdens de periode zonder CIP is eveneens hoger dan 90% waarvan een aantal is begrensd door de analytische rapportagegrens (Figuur 6-18). Door de analytische rapportagegrens is de FO en RO retentie van de componenten dus mogelijk nog hoger. Er is geen duidelijk verschil in retentie van de CZV en zouten tussen de periode met en zonder CIP. We kunnen stellen dat het CoRe-Water-concept een robuuste barrière vormt voor CZV en de bepaalde ionen.

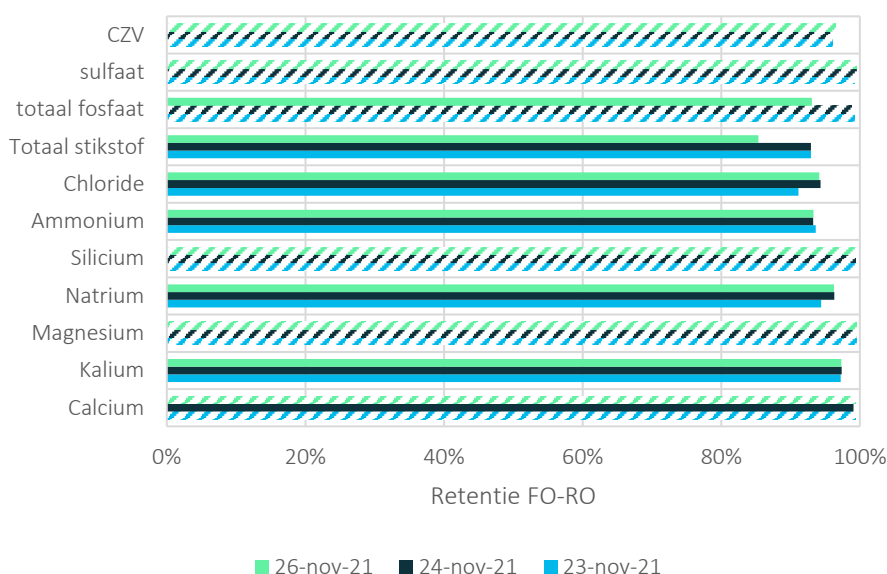
De FO-RO en RO retentie is op meerdere momenten bepaald, en is individueel bepaald voor de RO1 en RO2-membranen. Deze details (analyseresultaten, berekeningen, grafieken met uitkomsten) over het retentiegedrag van FO en RO-membranen zijn weergegeven in bijlage IV. Tenslotte bleek het niet mogelijk om een sluitende massabalans op te stellen met de meetdata over de verschillende stromen in de CoRe-pilot tijdens de afvalwatertesten. De reden hiervoor is dat (i) de samenstelling van het voedingswater verandert in de tijd en (ii) de samenstelling van de verschillende stromen verandert door wijzigingen in de bedrijfsvoering van de CoRe-pilot. De bedrijfsvoering van de pilot wordt deels ingesteld (bijvoorbeeld het instellen van de CF) en is deels het gevolg van membraanvervuiling en reiniging waardoor instellingen veranderen.

Tabel 6-6 Voeding- en permeaatconcentratie van CZV en ionen in de CoRe-pilot (week 44)

		Voeding	Permeaat
		2-nov-21	2-nov-21
Calcium	mg/L	49	0,8
Kalium	mg/L	30	0,8
Magnesium	mg/L	7,2	< 0,5
Natrium	mg/L	330	10
Silicium	µg/L	3900	190
Ammonium	mg N/L	32	2,3
Chloride	mg/L	410	16
Totaal stikstof	mg N/L	32	2,2
totaal fosfaat	mg P/L	2,2	0,21
sulfaat	mg/L	100	< 1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	64	
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5
CZV	mg/L	200	< 10
CZV (na filtratie)	mg/L	100	
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	85	



Figuur 6-17 De CZV en ionen retentie van FO-RO-membranen tijdens CIP regime (week 44). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage



Figuur 6-18 De CZV en ionen retentie van FO-RO-membranen tijdens het regime zonder CIP (week 47). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage

6.7.3 Retentie van organische microverontreinigingen

De concentraties van de meeste gemeten organische microverontreinigingen (OMV) in het permeaat liggen onder de rapportagegrens, behalve voor som PAK (10) en som PAK (EPA) die respectievelijk 0,12 µg/L en 0,25 µg/L bedragen (Tabel 6-7). Voor een ander OMV-pakket zijn de retentiewaarden bepaald van het FO-membraan. Het blijkt dat voor de meeste van deze stoffen een retentie wordt gevonden van >90%, behalve voor azitrimycine en amisulpride die voor 70-80% worden verwijderd (Figuur 6-19). Dit ligt aan de rapportagegrens van deze stoffen, wat blijkt uit de concentraties van deze stoffen in het verzameld permeaat (zie Tabel 6-6 tot en met

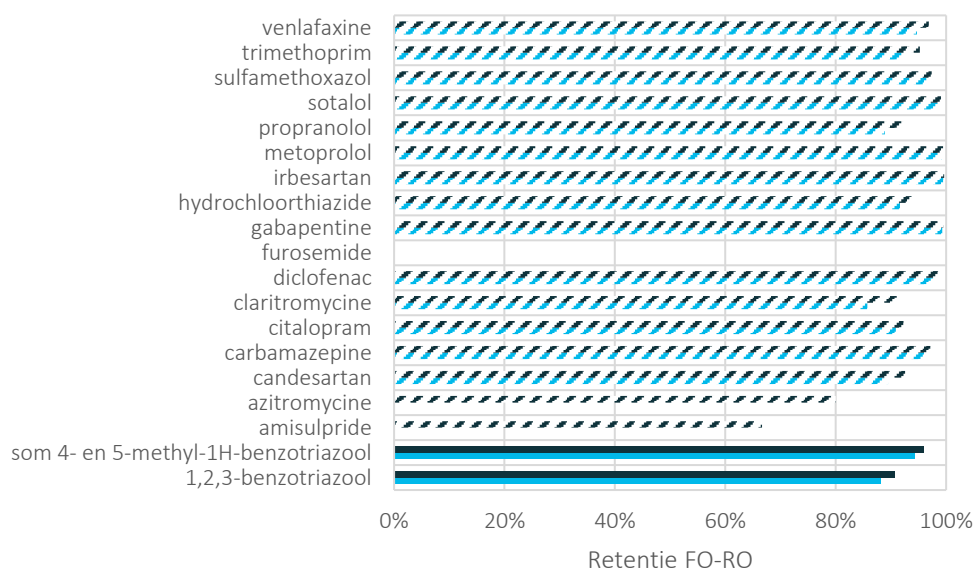
Tabel 6-8). Van alle stoffen ligt de concentratie na FO onder de rapportagegrens, behalve voor 1H-benzotriazool en 1,2,3-benzotriazool. Dat zijn kleine polaire stoffen waarvan bekend is dat de retentie laag is.

Voor een volledig overzicht van de uitgevoerde metingen aan OMV op de verschillende posities in de CoRe-pilot wordt verwezen naar bijlage IV.

Tabel 6-7 Voeding- en permeaatconcentratie van enkele zware metalen en PAKs in de CoRe-pilot (week 44)

			Voeding	Permeaat
			2-nov-21	2-nov-21
Arseen	µg/L			< 4
Cadmium	µg/L			< 1
Chroom	µg/L			< 5
Koper	µg/L			< 5
Lood	µg/L			< 5
Nikkel	µg/L			< 5
Zink	µg/L			< 20
Kwik	µg/L			< 0,02
acenafteen	µg/l			< 0,05

acenaftyleen	µg/l			< 0,05
anthraceen	µg/l			< 0,01
benzo(a)anthraceen	µg/l			< 0,01
benzo(a)pyreen	µg/l			< 0,01
benzo(b)fluoranteen	µg/l			< 0,02
benzo(ghi)peryleen	µg/l			< 0,02
benzo(k)fluoranteen	µg/l			< 0,01
chryseen	µg/l			< 0,01
dibenz(a, h)anthraceen	µg/l			< 0,01
fenantreen	µg/l			< 0,01
fluoranteen	µg/l			< 0,01
fluoreen	µg/l			< 0,05
indeno(1,2,3- cd)pyreen	µg/l			< 0,02
naftaleen	µg/l			< 0,05
pyreen	µg/l			< 0,01
som PAK (EPA)	µg/l		0,25	0,24
som PAK (10)	µg/l		0,12	0,11



Figuur 6-19 Retentie van OMV in de CoRe-pilot (week 44). Gearceerde balken: retentie hoger dan het aangegeven percentage.

Tabel 6-8 Voeding- en permeaatconcentratie van OMV in de CoRe-pilot (week 44)

		Voeding	Permeaat
		2-nov-21	2-nov-21
venlafaxine	ug/l	0,19	<0,01
trimethoprim	ug/l	0,13	<0,01
sulfamethoxazol	ug/l	0,29	<0,01
sotalol	ug/l	0,76	<0,01
1H-benzotriazool	ug/l	1,9	0,11
propranolol	ug/l	0,09	<0,01
metoprolol	ug/l	1,3	<0,01
irbesartan	ug/l	1,8	<0,01
hydrochloorthiazide	ug/l	1,2	<0,1
gabapentine	ug/l	2,8	<0,02
furosemide	ug/l	<1	<0,2
diclofenac	ug/l	0,44	<0,01
claritromycine	ug/l	0,07	<0,01
citalopram	ug/l	0,11	<0,01
carbamazepine	ug/l	0,27	<0,01
candesartan	ug/l	0,19	<0,02
azitromycine	ug/l	<0,5	<0,1
amisulpride	ug/l	<0,05	<0,01
1,2,3-benzotriazool	ug/l	2,2	0,26

6.8 Samenvatting CoRe pilotonderzoek RWZI Roermond

In 2020/2021 is onderzoek uitgevoerd met een 2 m³/h CoRe-pilot op afvalwater van WBL op de RWZI-locatie Roermond. Tijdens de commissioning van de CoRe-pilot is een SWP van 0,81 LMH/(mS/cm)) gemeten. Bij het begin van de schoonwatertesten bij RWZI Roermond is deze SWP van FO1 50% gedaald naar 0,4 LMH/(mS/cm)) ten gevolge van vervuiling door stilstaand water en biologisch groei in tussentanks.

De SWP daalde verder tijdens de schoonwatertesten in week 49 2020 t/m week 17 2021 naar een waarde van 0,16 LMH/(mS/cm)) voor FO1. Na het introduceren van afvalwater daalde de AWP naar 0,1 LMH/(mS/cm)) en 0,05 LMH/(mS/cm)) voor respectievelijk FO1 en FO2. De ingestelde CF_tot waarde van 28 kon in de praktijk niet gehaald worden en daalde van 17,5 naar 6 (week 18 t/m 28). Dit is toegeschreven aan membraanvervuiling tijdens deze 1^{ste} afvalwatertesten en aan de hoge zoutconcentratie in het afvalwater (zie H7). Ondanks de toegepaste curatieve vervuiliingsbeheersingsmethoden zoals SWF, OBW en CIP kon vervuiling niet worden beheerst.

Tijdens de zomer in 2021 (week 33 t/m 42) is de installatie uitvoerig gereinigd waarna de FO-membranen zijn bewaard in een oplossing van natriumbisulfiet, wat niet kon voorkomen dat de SWP na opstart zeer laag blijft. Er is onomkeerbare vervuiling opgetreden ondanks uitgebreide curatieve reinigingsmethoden (SWF, OBW en CIP). De 2^{de} afvalwatertesten zijn uitgevoerd met reeds sterk vervuilde membranen. Tijdens deze 2^{de} serie testen (week 43 t/m 46) daalt de AWP verder naar 0,07 LMH/(mS/cm) en 0,035 LMH/(mS/cm) voor respectievelijk de FO1 en FO2

membranen bij een CF_tot van 3. De sterke vervuiling is bevestigd door hoge drukvalwaarden en later door autopsie. Tijdens de 'crash-test' zonder CIP in week 47 zakte de AWP verder, wat duidt op (deels) beheersing van verstopping en vervuiling door SWP, OBW en CIP. De curatieve beheersmaatregelen hadden dus wel een positief effect op de bedrijfsvoering, maar konden geen stabiele bedrijfsvoering bewerkstelligen.

Membranautopsie bevestigde het optreden van extreme membraanvervuiling zowel visueel als met ATP en CH metingen. Uit gewichtsmetingen blijkt dat alle membranen gemiddeld 17% zwaarder zijn geworden ten gevolge van accumulatie van vuil. Dit vuil heeft aan het einde van de afvalwatertesten een totaal gewicht van 79 kg. Dit duidt op extreme membraanvervuiling. Ophopen van vuil treedt vooral op in de laatste membranen, zeer waarschijnlijk ten gevolge van het opconcentreren van het afvalwater.

Ondanks sterke vervuiling blijkt het CoRe-Water-concept robuust te werken bij te bestudeerde CF. De waterkwaliteit na de FO en RO membranen is goed, laag in geleidbaarheid ($<100 \mu\text{S}/\text{cm}$), geen of weinig CZV, tot-N, tot-P, ammonium en andere ionen. Verder zijn de FO-membranen een robuuste barrière voor de meeste organische microverontreinigingen. Kleine polaire OMV (1H-benzotriazool en 1,2,3-benzotriazool) worden iets minder goed tegengehouden. Het NaCl-zoutlek tijdens de bedrijfsvoering kon niet worden bestudeerd, maar kan een groot effect hebben op de hoeveelheid toe te voegen osmotische oplossing.

Vervuiling en verstopping van de membraanmodules tijdens de CoRe-pilottesten blijken een bottleneck te zijn voor de technische haalbaarheid van het CoRe-Water-concept. Er zijn meer preventieve methoden, zoals beter voorbehandeling, nodig voor vervuilingsbeheersing.

7 Evaluatie CoRe-Water-concept

7.1 Technische evaluatie

7.1.1 Aanleiding

Het CoRe-Water-concept is een innovatief modulair en adaptief zuiveringsconcept gebaseerd op fysisch chemische behandeling van communaal afvalwater. Het hart van het concept is een combinatie van FO en RO membraantechnologie die makkelijk schaalbaar is waarbij de scheiding en het hergebruik van water direct lokaal kunnen worden uitgevoerd en de concentraatbehandeling centraal. Dit is een unieke en geheel nieuwe zuiveringsaanpak, waarbij de grootste risico's qua haalbaarheid zitten in het bedrijven van de FO membraantechnologie. FO is een relatief nieuwe techniek die nog niet veel op grote schaal is toegepast. De ambitie in dit project was om FO gekoppeld aan RO op een relevante schaal (2 m³/h) toe te passen en dit voor een lange periode te bedrijven. Op basis van de resultaten zoals gepresenteerd in de hoofdstukken 3 tot en met 6 is in dit hoofdstuk een technische evaluatie uitgevoerd gericht op de haalbaarheid van FO (en RO) voor de behandeling van communaal afvalwater.

7.1.2 Doelstelling

Het doel is een technische evaluatie te doen van het CoRe-Water-concept, specifiek gericht op de haalbaarheid van FO (en RO) technologie voor de behandeling van communaal afvalwater. De technische haalbaarheid richt zich op de behaalde prestaties van de 2 m³/h CoRe-pilot (H6) in relatie tot de specifiek gestelde doelen, te weten (i) stabiele bedrijfsvoering, (ii) voldoende hoge flux van 5 L/m².h bij een relevante concentratiefactor van ≥ 20 en (iii) hoge verwijdering van nutriënten en OMV. Ook wordt een vergelijking gemaakt met de ervaringen met het labonderzoek (H4) en het pilotonderzoek in Wehl en Leusden (H5).

7.1.3 Technische evaluatie van CoRe-pilotonderzoek RWZI Roermond

De technische evaluatie van het CoRe-pilotonderzoek bij RWZI Roermond wordt gerelateerd aan de relevante doelstellingen van het project, te weten stabiele bedrijfsvoering, voldoende hoge flux bij relevante CF en verwijdering van nutriënten en OMV.

Stabiele bedrijfsvoering

Een stabiele bedrijfsvoering van de CoRe-pilot op beperkt voorbehandeld afvalwater bij RWZI Roermond kon niet worden gerealiseerd. Afvalwatertesten begonnen in week 18 met een stabiele permeabiliteit van 0,1 LMH/(mS/cm) bij CF = 17,5 en daalden uiteindelijk naar een stabiele permeabiliteit van 0,07 LMH/(mS/cm) bij CF = 3 aan het einde in week 46. Ondanks een uitgebreid arsenaal aan curatieve beheersmaatregelen tegen membraanvervuiling en verstopping, zoals AWF, OBW en CIP, kon geen stabiel bedrijfspunt worden bereikt op beperkt voorbehandeld afvalwater bij RWZI Roermond. Zonder deze curatieve beheersmaatregelen daalden de permeabiliteit en CF nog verder (zie paragraaf 6.5.3). De curatieve beheersmaatregelen hadden dus een positief effect, maar konden geen stabiel werkpunt bewerkstelligen.

De voornaamste oorzaak hiervan was onvoldoende voorbehandeling voor een dergelijk uitdagend afvalwater. Voorbehandeling werd uitgevoerd met een 40 µm trommelzeef. Er traden veel operationele problemen op tijdens het bedrijven van dit filter (zie 6.3.3) en dat heeft geresulteerd in het doorlaten van deeltjes groter dan de zeefgrootte. Ook toen het filter naar behoren werkte, vond er passage plaats van deeltjes kleiner dan de zeefgrootte van 40 µm. Het doorlaten van deeltjes naar de spiraalgewonden FO membranen resulteert in verstopping van de voedingswaterkanalen, dat wordt gemeten als een drukvaltoename. Er is geprobeerd om deze

verstopping tegen te gaan door een regelmatige luchtwaterspoeling (AWF), maar dit was niet succesvol (Cornelissen, Harmsen et al. 2021).

Daarnaast bevat afvalwater grote hoeveelheden (opgelost) organisch materiaal dat niet wordt tegengehouden door een (trommel)zeef. Dit organisch materiaal, uitgedrukt in (opgelost) CZV of DOC, kan resulteren in plakvervuiling op het membraanoppervlak (en op het spacermateriaal) (Mi and Elimelech 2010). Dit organische materiaal kan bovendien een bron zijn voor groei van bacteriën op het membraanoppervlak die zelf weer organisch materiaal kunnen uitscheiden (biofouling) (Zhang, Loong et al. 2012). De aanwezigheid van organisch materiaal op en in de FO membranen vergroot de kans dat aanwezige deeltjes worden ingevangen (Kim, Elimelech et al. 2014). Doordat de voorbehandeling onvoldoende goed in staat bleek deeltjes te verwijderen, ontstond er een situatie waarbij verschillende vormen van membraanvervuiling (organische vervuiling, biofouling en deeltjesvervuiling) elkaar versterken. Regelmatige AWF, OBW en CIP konden dit probleem niet oplossen.

Kader: Uitleg permeabiliteit en flux

Om de opbrengst van een membraaninstallatie uit te drukken wordt vaak gebruik gemaakt van de grootte flux (J) in liter per m² membraanoppervlak per uur (L/m².h). Deze grootte komt in feite overeen met de snelheid van gefilterd water door het membraan. Deze flux hangt sterk af van de drijvende kracht over het membraanproces, wat in FO het osmotische drukverschil is. Deze flux wordt in elk hoofdstuk van dit rapport gebruikt.

Hoe groter het osmotische drukverschil over het FO-membraan, des te groter is de gemeten flux. Het osmotische drukverschil over het membraan is een functie van de concentratie van de osmotische oplossing aan de draw-zijde van het FO-membraan (de DS-concentratie). Tijdens de verschillende lab- en pilottesten zijn de omstandigheden anders en worden er verschillende DS-concentraties toegepast, waardoor een vergelijking op basis van flux wordt bemoeilijkt. Een lagere flux in Leusden kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door vervuiling, maar ook door een lagere toegepaste DS-concentratie. Om de opbrengst onafhankelijk te maken van de DS-concentratie, wordt gebruik gemaakt van de permeabiliteit.

De permeabiliteit (P) is de flux gedeeld door het osmotische drukverschil tijdens de bedrijfsvoering en wordt idealiter uitgedrukt in liter per m² membraanoppervlak per uur per bar (osmotische druk) (L/m².h.bar). Een daling in permeabiliteit wordt nu alleen veroorzaakt door een toename in membraanweerstand, bijvoorbeeld door membraanvervuiling. De permeabiliteit is onafhankelijk van veranderingen in DS-concentratie tijdens het uitvoeren van het lab- en pilotonderzoek. De permeabiliteit kan daarom goed worden gebruikt om de opbrengst te vergelijken van de verschillende lab- en pilotexperimenten. In hoofdstuk 6 van dit rapport wordt gebruik gemaakt van het begrip permeabiliteit.

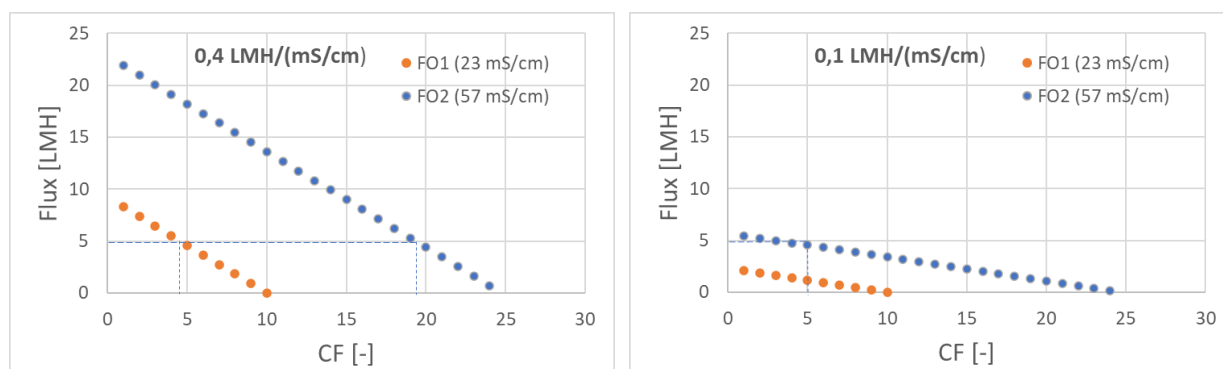
Een complicatie in het onderzoek is dat de DS-concentratie in de tijd verandert in samenstelling. Deze samenstelling is niet bepaald door bijvoorbeeld het uitvoeren van een regelmatig ICP-MS analyse. Bij aanvang van het experiment bestaat de DS-oplossing alleen uit NaCl, maar gedurende de FO-testen 'leken' er andere zouten en opgeloste stoffen uit de voeding naar de drawzijde van het FO-membraan. Hierdoor bestaat er geen eenduidige relatie meer tussen de DS-concentratie en het osmotische drukverschil. Daarom is de permeabiliteit berekend op basis van de flux gedeeld door de DS-concentratie gemeten als geleidbaarheid (L/m².h.(mS/cm)). Bij wijze van benadering kunnen we stellen dat een gemeten verschil in geleidbaarheid van 1 mS/cm ongeveer overeenkomt met 0,5 bar osmotische drukverschil. Een permeabiliteit van 1 L/m².h.(mS/cm) komt dus ongeveer overeen met een permeabiliteit van 2 L/m².h.bar.

Verder is getest met een relatief grote en complexe pilot met een capaciteit van 2 m³/h bestaande uit 2 FO en 2 RO trappen met respectievelijk 36 FO membranen en 4 RO membranen (zie 6.3). Het systeem is geplaatst in een 40-voets zeecontainer en zit bomvol met technologie (sturing, instrumentatie, pompen, leidingen,...). De complexiteit en omvang van het systeem belemmerden vaak de voortgang van het CoRe-pilotonderzoek. De benodigde aanpassingen van het systeem leidden verscheidene keren tot veel tijdsverlies. Ook zijn er veel operationele problemen geweest met veel tijdsverlies tot gevolg. Daarnaast kostte het bereiken van een stabiel bedrijfspunt relatief veel tijd, waardoor een effectieve afvalwatertest onder stabiele condities korter duurde dan gewenst.

Behalen van voldoende hoge flux bij relevante concentratiefactor

De opbrengst of flux van de FO membranen hangt af van de voedingswaterkwaliteit, het systeemontwerp en de procesinstellingen tijdens de bedrijfsvoering. De voedingswaterkwaliteit en systeemontwerp liggen vast door de keuze en het ontwerp van de voorbehandeling en de FO-RO installatie zelf. De geleidbaarheid van het afvalwater is relevant en bedraagt 2,3 mS/cm voor RWZI Roermond. De belangrijkste procesinstellingen voor het vastleggen van de initiële flux zijn (i) de concentraties van de osmotische oplossingen (in FO1 en FO2) en (ii) de ingestelde concentratiefactoren CF1 en CF2. Er is gestreefd naar een minimale flux van 5 L/m².h bij een CF = 20.

De CoRe-pilot is bedreven met draw-concentraties van ca. 23 mS/cm (0,5M NaCl) en ca. 57 mS/cm (0,8 M NaCl) voor respectievelijk FO 1 en FO2. Bij een SWP van 0,4 LMH/(mS/cm), zoals gehaald voor schoonwater (week 3), is het theoretisch mogelijk om een FO1 flux van 7,4 L/m².h te halen bij een CF1 = 2 en een FO2 flux van 13,6 L/m².h te halen bij een CF2 = 10 (Figuur 7-1 links). Dit is ruim boven de gestelde flux doelstellingen van het CoRe-pilotonderzoek bij CF_{tot} = 20.



Figuur 7-1 FO Flux in functie van de concentratiefactor voor FO1 en FO2 bij 0,4 LMH/(mS/cm) (links) en 0,1 LMH/(mS/cm) (rechts)

Dezelfde berekeningen zijn uitgevoerd voor AWP = 0,1 LMH/(mS/cm), zoals behaald tijdens het begin van de 1^{ste} serie afvalwatertesten (Figuur 7-1, rechts). Het blijkt dat een flux van 5 L/m².h niet haalbaar was voor FO1. Voor FO2 was het haalbaar, echter slechts bij CF2 = 3, wat ruim onder de doelstelling van het project lag. Deze berekeningen komen ruwweg overeen met de gemeten AWP en CF aan het einde van de 2^{de} serie afvalwatertesten.

Doordat de geleidbaarheid van het afvalwater bij RWZI Roermond relatief hoog is (2,3 mS/cm), kan worden berekend dat de CF begrensd is. De drijvende kracht van het FO proces is een osmotisch drukverschil over de FO membranen. Bij het concentreren van het afvalwater zal de geleidbaarheid van het afvalwater toenemen als functie van de CF. Om een osmotisch drukverschil te hebben, moet de draw concentratie van de osmotische oplossing aan het einde van de FO membranen hoger zijn dan de geleidbaarheid van dit geconcentreerde afvalwater. Dit is het geval bij CF = 20, maar bijvoorbeeld niet bij CF = 30 (Figuur 7-2). Bij een CF = 25 is het osmotische drukverschil exact 0 mS/cm, en worden de laatste FO membranen in de installatie niet meer benut.



Technische haalbaarheid CoRe-concept Concentratiefactoren

Typische gemiddelde waarden / waarden fluctueren

- Afvalwater heeft een conductiviteit van ca. 2,3 mS/cm
- DS1 heeft een conductiviteit van 22,5 mS/cm
- DS2 heeft een conductiviteit van 56,6 mS/cm

CF = 20 → 46 mS/cm : $\Delta\text{cond} = +10,6$ mS/cm

CF = 25 → 57 mS/cm : $\Delta\text{cond} = 0$ mS/cm

CF = 30 → 69 mS/cm : $\Delta\text{cond} = -12,4$ mS/cm

- CVF > 25 is niet mogelijk met dit afvalwater & gehanteerde DS concentratie

25

Figuur 7-2 Maximaal haalbare CF voor het afvalwater van RWZI Roermond

Verwijdering van nutriënten en OMV

Tijdens het CoRe-pilotonderzoek bij RWZI Roermond is een vergaande verwijdering gemeten van nutriënten en OMV. De verwijdering van CZV, tot-N, tot-P, ammonium en kalium is >90%, en mogelijk hoger door limieten van de onderste rapportagegrens. Verder worden de meeste organische microverontreinigingen tegengehouden door het FO membraan. Kleine polaire OMV (1H-benzotriazool en 1,2,3-benzotriazool) worden iets minder goed tegengehouden. De waterkwaliteit na het CoRe-proces is zeer goed, zelfs tijdens extreme membraanvervuiling en verstopping.

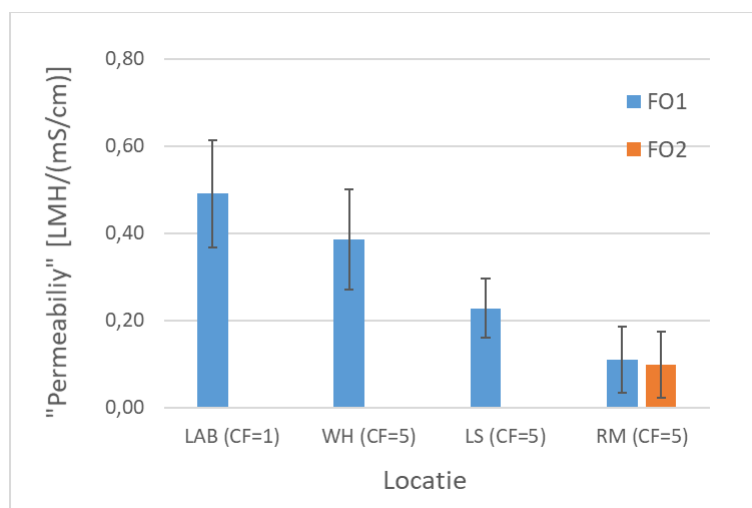
7.1.4 Vergelijking tussen labonderzoek en pilotonderzoek te Wehl en Leusden

In Figuur 7-3 zijn de AWP gegevens tijdens de FO labtesten en FO pilot runs bij RWZI Wehl, Gemaal Leusden en RWZI Roermond onderling vergeleken. De AWP is het hoogst tijdens de labtesten (ca 0,51 LMH/(mS/cm)) met de kanttekening dat is gemeten bij een CF_{tot} van 1. Tijdens deze labtesten is gebruik gemaakt van batchsamples van het afvalwater van RWZI Wehl. De AWP tijdens het pilotonderzoek bij RWZI Wehl is vergelijkbaar met de labresultaten (ca 0,39 LMH/(mS/cm) bij CF = 5). De goede prestatie hangt samen met een relatief goede afvalwaterkwaliteit bij RWZI Wehl (geleidbaarheid = 0,4 – 1,2 mS/cm, CZV = 650 mg/L, geen gegevens beschikbaar van ZS). De afvalwaterkwaliteit bij Gemaal Leusden (geleidbaarheid = 0,5 -1,1 mS/cm, CZV = 280 mg/L, ZS = 270 mg/L) is vergelijkbaar met die van Wehl, zodat een lagere AWP (ca 0,21 LMH/(mS/cm) bij CF = 5) tijdens het pilotonderzoek te Leusden niet verklaard kan worden uit de afvalwaterkwaliteit⁶. De AWP van het CoRe-pilotonderzoek bij RWZI Roermond (geleidbaarheid = 2,3 mS/cm, CZV = 250-350 mg/L, ZS = 40-80 mg/L) is teruggerekend naar CF = 5 en bedraagt ca 0,1 LMH/(mS/cm), en blijft ver achter bij de AWP gegevens van de andere testen.

Tabel 7-1 Overzicht van enkele afvalwaterparameters van de drie onderzocht RWZI locaties

	CZV (mg/L)	ZS (mg/L)	Geleidbaarheid (mS/cm)
RWZI Wehl (lab/pilot)	650	n.b.	0,4-1,2
Gemaal Leusden	280	270	0,5-1,1
RWZI Roermond	250-350	40-80	2,3

⁶ Een mogelijke verklaring is een verschil in het zwevend stof gehalte op beide onderzoekslocaties. Dit kan niet worden bevestigd omdat geen ZS gegevens beschikbaar zijn van RWZI Wehl.



Figuur 7-3 Stabiele AWP behaald tijdens labtesten (LAB), RWZI Wehl (WH), Gemaal Leusden (LS) en RWZI Roermond (RM) voor FO1 en FO2 (alleen voor RM) bij gegeven CF.

7.1.5 Conclusies technische haalbaarheid

Een stabiele bedrijfsvoering van de CoRe-pilot op beperkt voorbehandeld afvalwater (40 µm trommelzeef na de voorbezinker) bij RWZI Roermond bleek niet mogelijk ondanks een uitgebreid arsenaal aan curatieve beheersmaatregelen tegen membraanvervuiling en verstopping, zoals AWF, OBW en CIP. De voornaamste oorzaak moet gezocht worden in onvoldoende voorbehandeling resulterend in een complexe combinatie van deeltjesvervuiling, organische vervuiling en biofouling. Vervuiling van de membranen betekent dat het concept niet technisch haalbaar is.

Op basis van behaalde AWP waarden, is berekend dat een flux van 5 L/m².h niet haalbaar was voor FO1, en voor FO2 alleen bij een CF2 van 3, dat ruim onder de doelstelling van het project lag. Verder bleek de CF_{tot} begrensd te zijn tot 20 door de relatief hoge geleidbaarheid van het afvalwater van RWZI Roermond. De CoRe-pilot vormde een robuuste barrière voor nutriënten (CZV, tot-N, tot-P, NH₄ en zouten) en een uitgebreid mengsel van organische microverontreinigingen. De kwaliteit van het behandelde water was zeer goed. Vanwege de lage behaalde CF was de ammoniumretentie tijdens de pilottesten goed. Bij hogere CF is de verwachting dat het ammoniumgehalte in het permeaat gaat toenemen, maar dat is niet getest.

De CoRe-pilot scoorde slecht op basis van de AWP in vergelijking met het FO lab- en pilotonderzoek bij RWZI Wehl en Gemaal Leusden. Het afvalwater van Wehl en Leusden had een lagere geleidbaarheid zodat daar een CF van 20 wel haalbaar was.

Het CoRe-Water-concept biedt vele voordelen, maar is in de huidige vorm technisch niet haalbaar, vooral ten gevolge van het optreden van sterke membraanvervuiling en – verstopping. Als de membraanvervuiling beter kan worden beheerst, blijft de mogelijkheid open om te profiteren van de voordelen die het concept biedt.

7.2 Economische evaluatie

7.2.1 Aanleiding

Het CoRe-Water-concept is een nieuw concept dat nog niet op praktijkschaal toegepast is. Het betreft een totaalconcept (inname ruw afvalwater, concentratiestap, verwerking diverse stromen en afzet schoon water en teruggewonnen nutriënten). Met de uitkomsten van de lab- en pilottesten die uitgevoerd zijn in het CoRe TKI-project kan geëvalueerd worden hoe het CoRe-Water zuiveringsconcept zich verhoudt tot een conventionele manier van waterzuivering.

7.2.2 Doelstelling

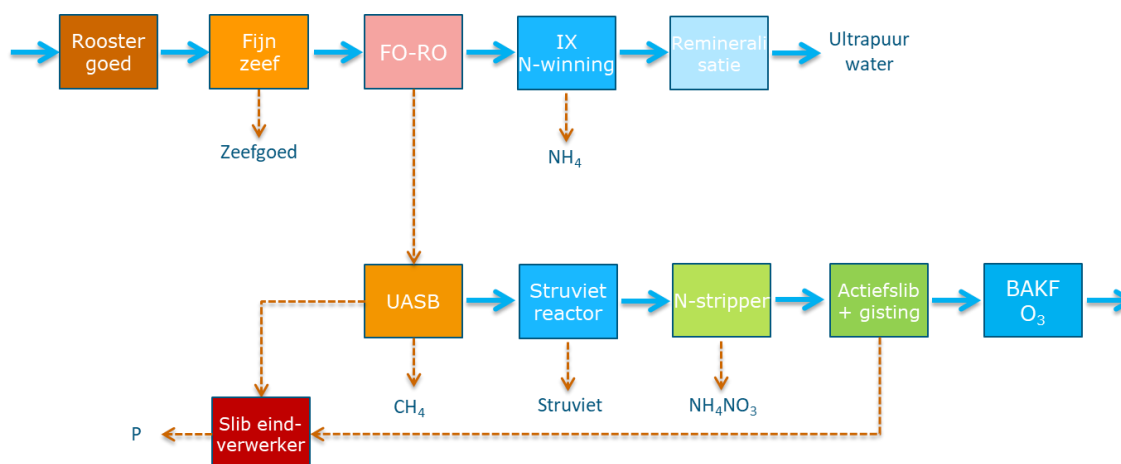
Een indicatieve economische evaluatie van het CoRe-Water-concept ten opzichte van een referentiescenario (conventioneel zuiveringsconcept) op kosten (operationeel en investering) en opbrengsten (afzet producten).

7.2.3 Methode en materialen

Op een schaalgrootte van 100.000 i.e. (middelgrootte RWZI in Nederland) zijn het CoRe-Water-concept als totaalconcept (CoRe scenario) en een conventioneel zuiveringsconcept (referentiescenario) uitgewerkt en met elkaar vergeleken. Beide zuiveringsconcepten bevatten zowel de waterlijn (inname ruw afvalwater tot lozing/afzet schoon water) als de sliblijn (productie, terugwinning en afzet van producten). Dit omvat dermate veel vrijheidsgraden en mogelijkheden voor alternatieve configuraties dat ervoor gekozen is de uitwerking van de zuiveringsconcepten op hoofdlijnen te doen. De vergelijking tussen beide concepten moet daarom als indicatief worden gezien, het betreft een vergelijking op hoofdlijnen, niet op details.

Opzet CoRe scenario

De uitwerking van het CoRe scenario is gebaseerd op de uitkomsten van de CoRe-Water lab- en pilottesten. Voor onderdelen van het zuiveringsconcept die niet in het CoRe TKI-project nader onderzocht zijn, zoals de sliblijn van CoRe-Water zijn kengetallen gebruikt van technologieën die anno 2022 op praktijkschaal bewezen zijn. In Figuur 7-4 is het processchema gegeven van het CoRe scenario.



Figuur 7-4 Processchema CoRe scenario als totaalconcept

In de eerste processtap wordt het roostergoed verwijderd. Met een fijnzeef wordt in de 2^e processtap zeefgoed uit het afvalwater gehaald. Vervolgens vindt de concentratiestap plaats in de Forward Osmosis – Reverse Osmosis membraaninstallatie (FO-RO). Hierin wordt het water en een gedeelte van de stikstof (ammonium) gescheiden van de overige vuillast. In een ionenwisselaar (IX N-winning) wordt de resterende stikstof uit het water (RO-permeaat) gehaald in herbruikbare vorm, bijvoorbeeld ammoniumsulfaat of ammoniumnitraat. Na eventuele remineralisatie is een ultrapuur water geproduceerd. Het concentraat van de FO-RO is een factor 30 maal geconcentreerd⁷ en kan, eventueel na een verdere indikstap behandeld worden in een gisting (UASB) voor de productie van methaan (CH₄)⁸. Met het geproduceerde methaan kan een ketel gestookt worden om de benodigde warmte te maken voor het

⁷ In de pilottesten op Roermond is een concentratiefactor van kleiner dan 5 behaald. Met deze concentratiefactor scoort het CoRe-Water-concept economisch gezien zeer slecht. Voor de economische evaluatie is daarom gekozen om gelijk aan de projectdoelstelling een factor 30 te hanteren.

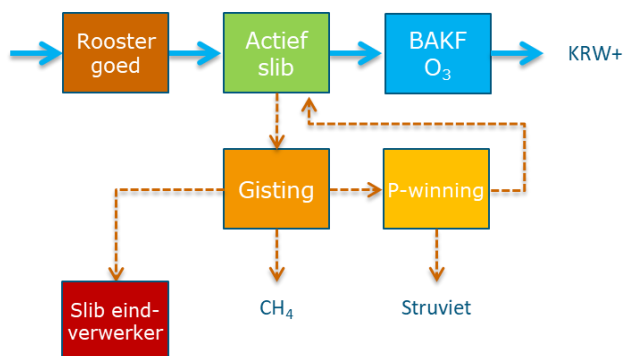
⁸ Een concentratiefactor van de FO-RO installatie lager dan 30 resulteert in een negatieve balans tussen warmtevrage en methaanproductie. Bij een concentratiefactor lager dan 30 zal externe energie aangewend moeten worden om het gistingsproces in de UASB op de vereiste temperatuur te houden.

gistingsproces. Alternatief kan het geproduceerde methaan ook ingezet worden voor een toepassing waarbij de koolstof uit methaan vastgelegd wordt (bijv. productie van grondstoffen) in dat geval zal er een externe energiebron aangewend moeten worden voor het opwarmen van het gistingsproces (bijv. restwarmte en/of warmtepomp). Ter indicatie, indien methaan in een ketel gestookt wordt, is er afhankelijk van de concentratiefactor en de verdere indikking van het FO-RO concentraat een overschot of tekort aan methaan om de UASB op temperatuur te houden. In de uitwerking is rekening gehouden met een nadere indikking van het concentraat van 0,3% naar 3% DS voordat het de UASB in gaat ⁹

Vooralsnog is voorzien dat na de gisting fosfor uit het concentraat gewonnen wordt in een struviet reactor. Daarna wordt stikstof (ammonium) gewonnen in een stripper. De laatste restanten organisch materiaal (CZV) en nutriënten (P en N) worden verwijderd in een kleine actiefslibinstallatie, dit lijkt vooralsnog de meest kosteneffectieve wijze van behandeling. Door een combinatie van biologisch actiefkoolfiltratie (BAKF) en ozonisatie (O₃) worden microverontreinigingen en restanten stikstof verregaand verwijderd om tot een KRW+ kwaliteit te komen. Uitgegist slib wordt afgevoerd naar de slibeindverwerker voor compostering of verbranding.

Opzet Referentie scenario

Het referentie scenario is een duurzame variant van de conventionele RWZI zoals deze in Nederland wordt toegepast. De uitwerking is gebaseerd op kengetallen. In Figuur 7-5 is het processchema van dit scenario weergegeven.



Figuur 7-5 Processchema Referentie scenario

In de eerste processtap wordt het roostergoed verwijderd. Stikstofverwijdering vindt plaats in het actiefslibproces waarbij gestuurd wordt op minimalisatie van N₂O-productie. Fosfor wordt via de bio-P route opgenomen in het slib. De deelstroombehandeling van stikstof is afwezig i.v.m. N₂O-productie en legionellaproblematiek. Fosfor wordt teruggewonnen in de deelstroom als struviet en mogelijk als vivianiet. Na het actiefslibproces worden microverontreinigingen en restanten stikstof verregaand verwijderd in een BAKF-O₃ stap om tot KRW+ kwaliteit te komen. Koolstof wordt grotendeels geoxideerd tot CO₂ en resulteert in de productie van spuislib. Slib (7% DS) wordt vergist en gedeeltelijk omgezet in methaan. Een gedeelte van het methaan is nodig voor warmteproductie om de gisting op temperatuur te houden, de rest kan worden ingezet ter vervanging van aardgas of als primaire chemicaliën voor de chemische industrie. Uitgegist slib wordt afgevoerd naar de slibeindverwerker voor compostering of verbranding.

7.2.4 Resultaten

Verbruiken

In Tabel 7-2 zijn de specifieke verbruiken per m³ influent gegeven van de meest belangrijke verbruiksposten in beide scenario's. Voor vrijwel alle verbruiksposten heeft het CoRe scenario een veel hoger verbruik dan het

⁹ Zonder de verdere indikking van 0,3% naar 3% DS is al het geproduceerde methaan nodig voor verwarming van de UASB

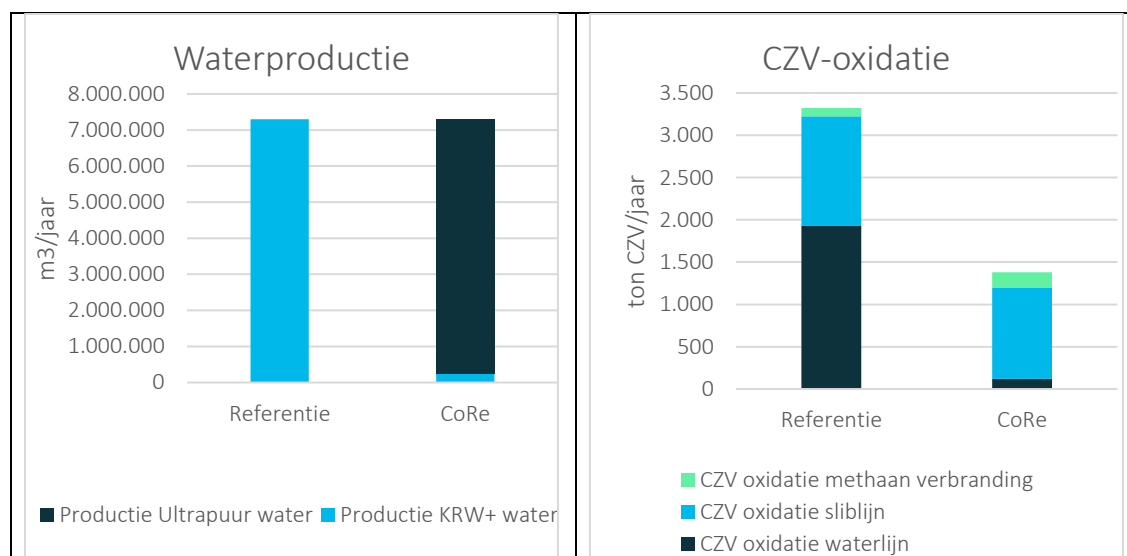
referentiescenario. Het hoge verbruik komt door de RO-installatie (elektriciteit), reinigen van de FO-membranen (base en zuur CIP), zoutlek FO (NaCl), regeneratie van de IX (NaCl), remineralisatie permeaat (CaCO_3), P-winning (MgCl_2) en N-stripper (NaOH en HNO_3).

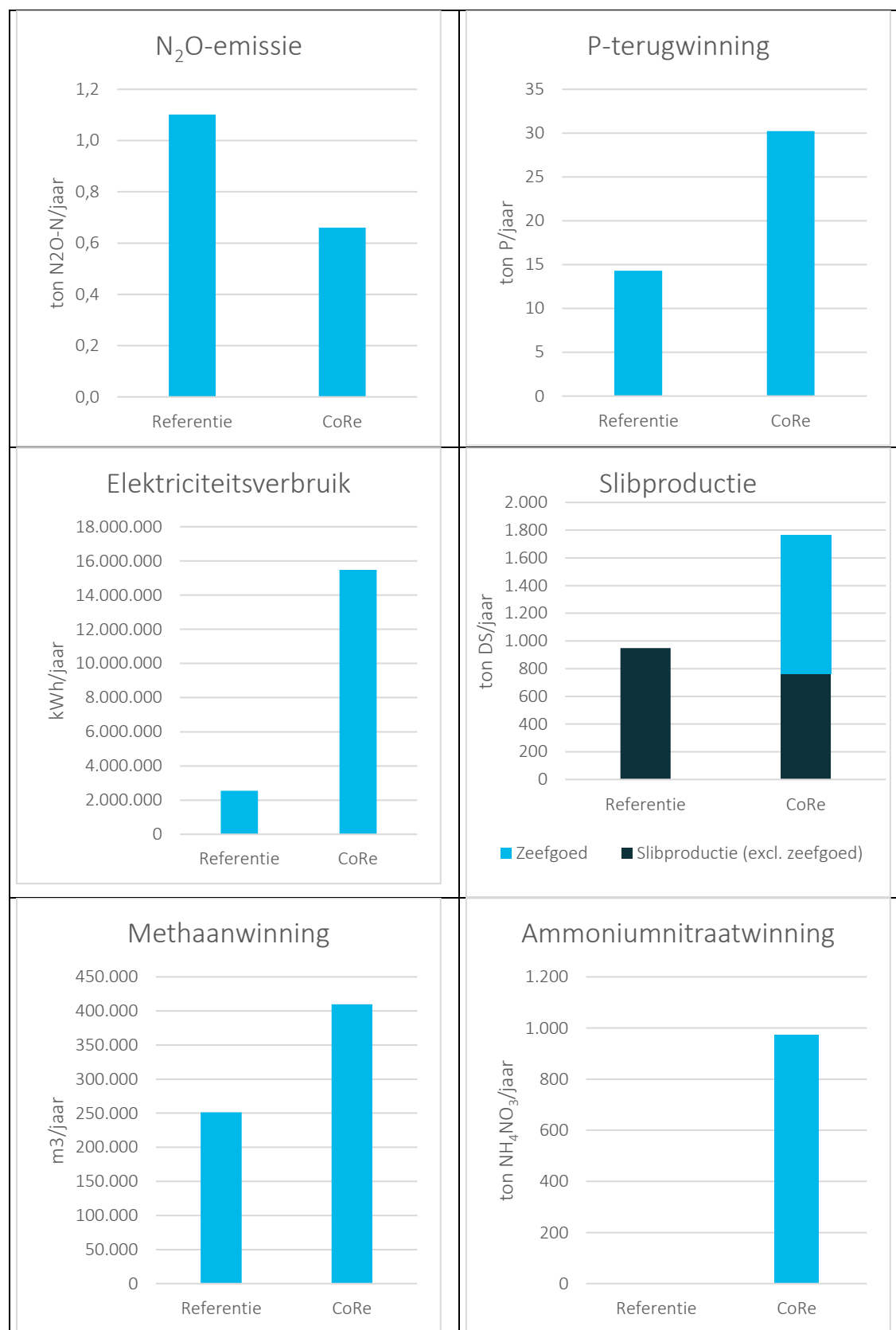
Tabel 7-2: Inschatting van specifieke verbruiken in beide scenario's

Verbruikspost	Eenheid	Referentie	CoRe
Elektriciteit	kWh/m ³	0,35	2,12
PE	g/m ³	2	1
FeCl ₃ 100%	g/m ³	22	0,1
base CIP	g/m ³		68
zuur CIP	g/m ³		152
NaCl 100%	g/m ³		617
CaCO ₃ 100%	g/m ³		48
MgCl ₂ 100%	g/m ³	7	18
NaOH 100%	g/m ³		201
HNO ₃ 100%	g/m ³		126

Technische parameters

Figuur 7-6 geeft de vergelijking tussen de scenario's CoRe en Referentie voor meerdere technische parameters, voor een deel ook gericht op de opbrengsten.





Figuur 7-6 Vergelijking op diverse parameters CoRe scenario en Referentie scenario

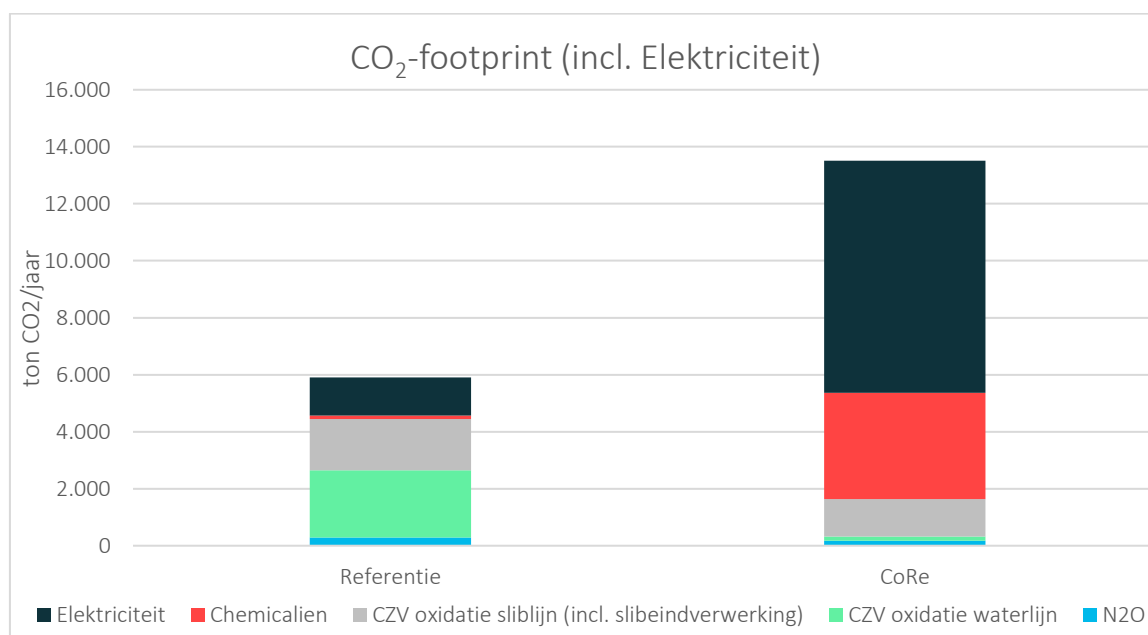
Enkele belangrijke verschillen tussen beide concepten:

- Met het CoRe-Water-concept wordt ca. 97% van het afvalwater gezuiverd tot een zeer hoge kwaliteit;

- CoRe resulteert in minder oxidatie van CZV tot CO₂. Met name in de waterlijn wordt het verschil gemaakt t.o.v. de Referentie waarbij middels het actiefslibproces veel CZV direct tot CO₂ geoxideerd wordt;
- De N₂O-emissies zijn in beide scenario's zeer laag, maar zijn bij het CoRe-concept wel de helft lager;
- Met CoRe kan ca. 60% van de aanwezige fosfor worden teruggewonnen (30 ton/jaar), de rest verlaat de zuivering richting slibeindverwerker. Voor de Referentie kan ca. 29% fosfor worden teruggewonnen (14 ton/jaar);
- De slibproductie verschilt voornamelijk door het al dan niet toepassen van een fijnzeef voor winning van zeefgoed. In het Referentiescenario is het gebruik van een fijnzeef niet noodzakelijk.
- Het elektriciteitsverbruik is voor CoRe ca. 6 maal meer dan voor de Referentie, dit komt vrijwel exclusief door het verbruik van de FO-RO installatie;
- CoRe heeft de potentie om meer methaan te winnen (productie – verbruik), dit is enkel mogelijk bij een concentratiefactor 30 in de FO-RO installatie en een nadere indikking van 0,3% naar 3% DS van het concentraat. Zonder deze nadere indikking is het methaanverbruik voor verwarming van de UASB ongeveer gelijk aan de productie waardoor de winning netto nul is;
- In de Referentie wordt alle stikstof omgezet in stikstofgas (N₂), bij CoRe wordt een aanzienlijk deel van de stikstof teruggewonnen, bijvoorbeeld als ammoniumnitraat.

CO₂-footprint

Met de inschatting van de verbruiken en de emissies van beide scenario's is de CO₂-footprint berekend, zie Figuur 7-7. De gehanteerde kengetallen voor de berekening van de CO₂-footprint zijn gegeven in Bijlage V.



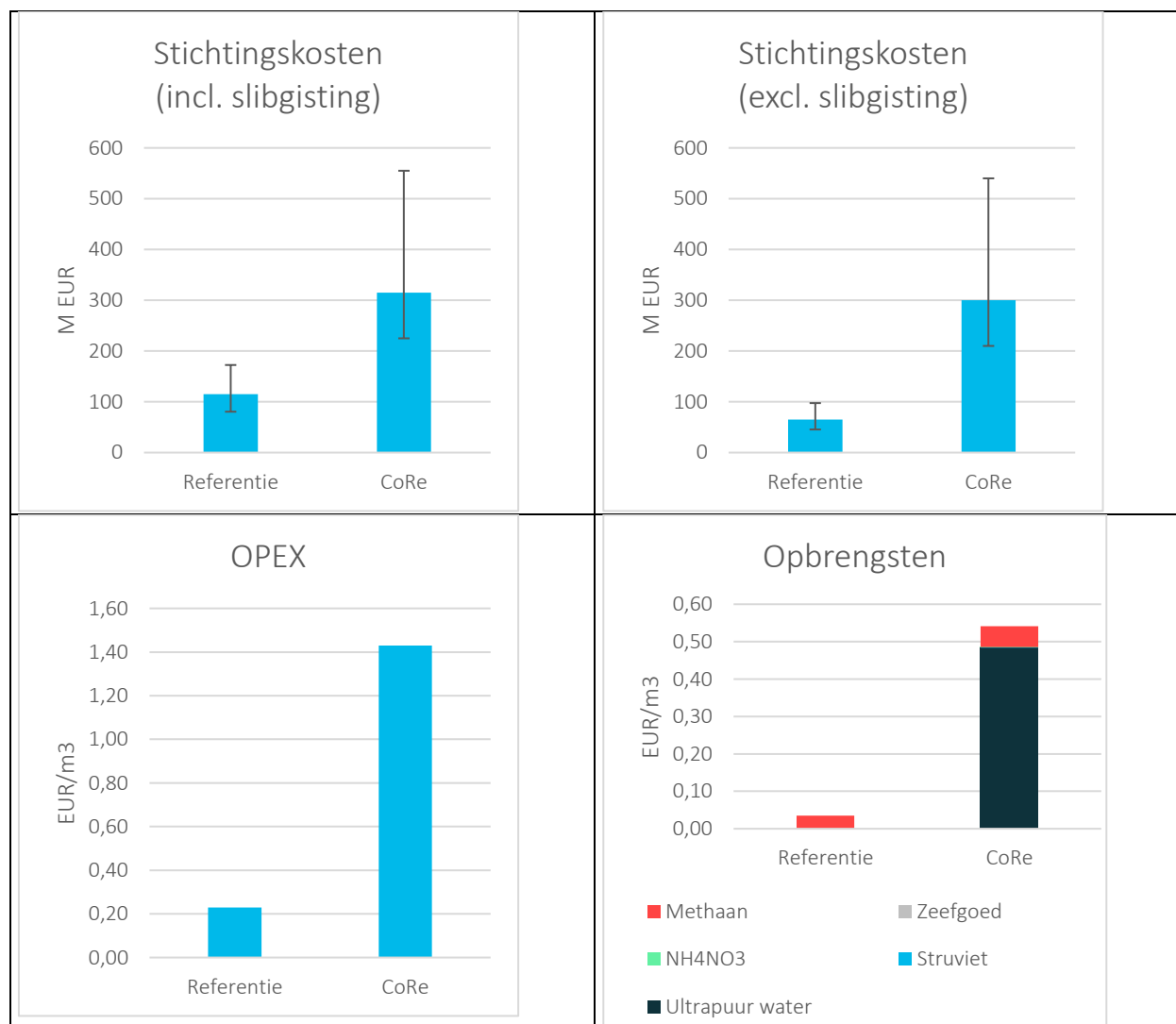
Figuur 7-7 CO₂-footprint CoRe en Referentie scenario's

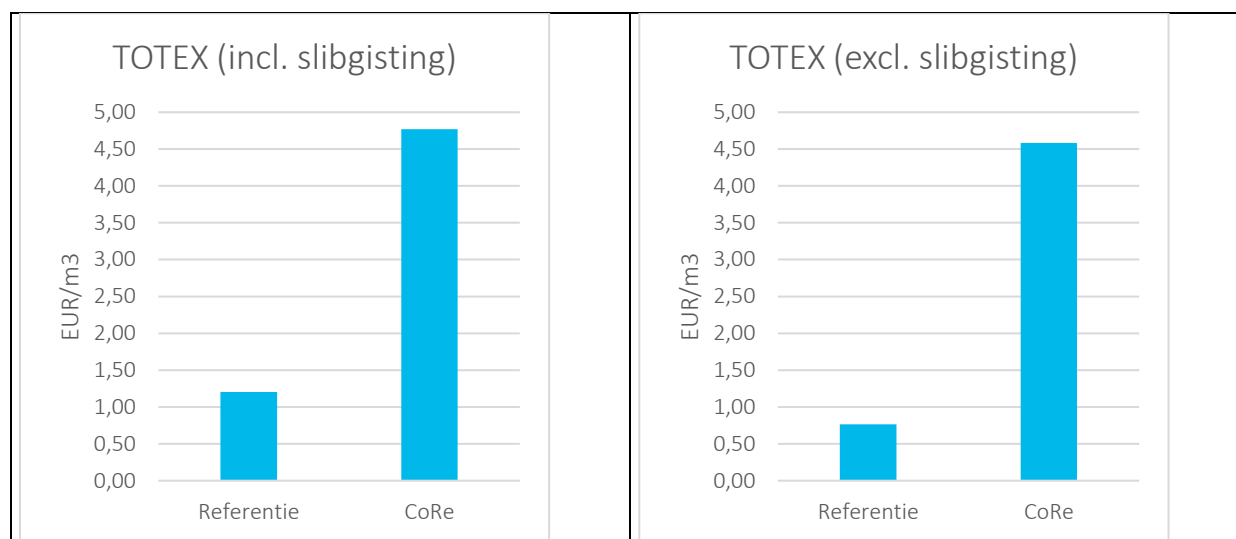
De CO₂-footprint van CoRe is ca. twee maal hoger dan van de Referentie. Dit komt voornamelijk door het hoge elektriciteitsverbruik van het CoRe-Water-concept. Hierbij moet worden opgemerkt dat is uitgegaan van een CO₂-footprint voor elektriciteit die past bij een Nederlandse mix (zie bijlage V). Naarmate het aandeel groene elektriciteit groter wordt in de mix, leidt dit tot een snelle daling van de totale CO₂-footprint. Daarnaast is de bijdrage in de CO₂-footprint van chemicaliën relatief groot voor het CoRe-Water-concept, terwijl de oxidatie van CZV in de waterlijn t.o.v. de Referentie zeer laag is.

Kosten

Voor beide scenario's is een indicatie gegeven van de kosten, zie Figuur 7-8. Hierbij zijn de stichtingskosten (investering), operationele kosten (verbruiken en onderhoud), opbrengsten (afzet producten) en totale kosten (operationele kosten + afschrijving stichtingskosten – opbrengsten) apart weergegeven. In de kostenraming zijn de kosten meegenomen van alle processtappen zoals opgenomen in Figuur 7-4 en Figuur 7-5. Voor de slibeindverwerking zijn alleen de OPEX voor de afzet van slib richting slibeindverwerking meegenomen in de berekeningen. *Voor alle genoemde bedragen geldt dat deze een indicatieve raming van de kosten betreffen welke tenzij anders aangegeven een onnauwkeurigheid kennen van $\pm 40\%$. Deze bedragen dienen derhalve niet voor budgetteringsdoeleinde aangewend te worden.*

Op een schaal van 100.000 i.e. is een slibgisting op locatie doorgaans niet kosteneffectief en wordt pas vanaf ca. 250.000 i.e. overwogen. Omdat voor CoRe en het Referentie scenario een totaalconcept wordt vergeleken is zowel een kostenraming inclusief als exclusief slibgisting uitgewerkt.





Figuur 7-8 Inschatting van de stichtingskosten, operationele kosten (OPEX), opbrengsten en totale kosten (TOTEX)

De stichtingskosten voor het CoRe-scenario kennen een zeer grote onnauwkeurigheid (-30% en +80%). De voornaamste oorzaak hiervan is het beperkte inzicht in de benodigde hoeveelheid (FO-)membraanoppervlak en de prijs van de FO-membranen. Deze bepalen het overgrote deel van de kosten in het CoRe scenario. Uit de pilottesten is niet eenduidig af te leiden welk membraanoppervlak er nodig is voor de behandeling van een eenheid afvalwater, de kostenraming is daarom slechts indicatief mogelijk. Gezien de sterke vervuiling van de FO-membranen in de pilot lijkt het verstandig het benodigd FO-membraanoppervlak niet te onderschatten.

De inschatting is dat de stichtingskosten voor CoRe een factor 3 tot 5 hoger liggen t.o.v. de Referentie afhankelijk of er met of zonder slibgisting op locatie wordt gerekend.

Voor CoRe zijn de OPEX een factor 6 hoger t.o.v. de Referentie. De OPEX bij CoRe worden bepaald door de verbruiken van CIP zuur (0,43 EUR/m³), elektriciteit (0,32 EUR/m³), CIP base (0,20 EUR/m³) en onderhoudskosten (0,21 EUR/m³). Voor de Referentie zijn de belangrijkste OPEX posten CO₂-certificaten voor compensatie van emissies (0,06 EUR/m³), slibeindverwerking en elektriciteitsverbruik (beide 0,05 EUR/m³) en onderhoud (0,04 EUR/m³).

De opbrengsten van CoRe worden vrijwel exclusief bepaald door de afzet van ultrapuur water. Bij een prijs van 0,5 EUR/m³ ultrapuur water is dit een aanzienlijke opbrengstenpost. De overige gewonnen grondstoffen representeren nauwelijks enige economische waarde. Dit komt doordat de volumina van de stromen gering zijn en de economische waarde (momenteel) laag is¹⁰.

7.2.5 Conclusies

Uit de indicatieve vergelijking tussen de scenario's CoRe-Water en Referentie blijkt dat op zowel stichtingskosten als operationele kosten het CoRe scenario aanzienlijk duurder is. De opbrengsten van CoRe zijn beduidend hoger, maar de opbrengsten zijn relatief gering t.o.v. de kosten. De totale kosten (stichtingskosten + operationele kosten – opbrengsten) van CoRe zijn een factor 4 tot 5 hoger dan van de Referentie. Dit leidt tot de conclusie dat het CoRe-Water-concept in de huidige vorm op deze schaal economisch niet haalbaar is.

¹⁰ Aangehouden uitgangspunten economische waarde reststromen (prijsspeil Q1-2022); struviet €20/ton, ammoniumnitraat €10/ton, zeefgoed €0/ton en methaan €1/m³

8 Discussie

8.1 Inleiding

In het CoRe-project (2018-2022) maken we gebruik van een innovatief zuiveringsconcept waarin afvalwater eerst fysisch-chemisch wordt geconcentreerd voordat het verder wordt behandeld. Op deze manier kan rioolwater energiezuinig en efficiënt worden gezuiverd met een hoog zuiveringsrendement (N,P en micro's) en vindt een optimale terugwinning plaats van resources zoals nutriënten, energie en vooral ook water: van RWZI naar duurzame waterfabriek. De beoogde waterkwaliteit is van zeer goede kwaliteit en kan worden toegepast in de glastuinbouw en industrie. Belangrijke beoogde CoRe waarden hierin zijn (1) een minimale voorbehandeling, (2) het fysisch-chemisch behandelen van afvalwater, (3) het sterk concentreren van het afvalwater voor het terugwinnen van resources en (4) de productie van een hoogwaardige waterkwaliteit.

De technologische route voor het concentreren van het afvalwater met een nieuwe membraantechnologie is gebaseerd op het principe van FO. Dit is de sleutelstap in de productie van schoon water zonder nutriënten, (pathogene) micro-organismen en organische microverontreinigingen (OMV) en een geconcentreerde afvalwaterstroom die energiezuiniger kan worden behandeld en waaruit resources gemakkelijker zijn terug te winnen (Lutchmiah, Cornelissen et al. 2011). De praktische en commercieel beschikbare uitvoeringsvorm van FO membranen is een spiraalgewonden membraanmodule waarbij het afvalwater door nauwe voedingskanalen langs verschillende FO membranen wordt getransporteerd (Xu, Peng et al. 2010). Spiraalgewonden FO membranen en modules worden in dit hoofdstuk verder afgekort tot SWFO.

Na vier jaar ervaring in het CoRe project met SWFO op afvalwater verdienen drie zaken een nadere discussie : (1) noodzaak van voldoende voorbehandeling voor SWFO (par. 8.2), (2) het hoge energieverbruik van de SWFO installatie (par. 8.3) en (3) grote benodigde CAPEX/OPEX voor een SWFO installatie (par 8.4). In dit hoofdstuk worden deze zaken bediscussieerd, met een voorstel voor een verbeterde en innovatief FO concept waarbij de CoRe waarden waarschijnlijk wel gerealiseerd kunnen worden. Dit verbeterde concept is – althans in de ogen van de onderzoekspartners – de toekomst van het CoRe-Water-concept.

8.2 Voorbehandeling

Afvalwater bestaat uit een complexe mix van zouten, organische stoffen, pathogenen en deeltjes die bovendien sterk varieert in de tijd en uniek is voor een specifieke locatie. Hierdoor vormt afvalwater een zeer uitdagende matrix voor een fysisch-chemische behandeling. Het FO proces is robuust, en is in staat om de verschillende componenten in grote mate te verwijderen uit het afvalwater (H6.7). De specifieke uitvoeringsvorm van SWFO is echter zeer gevoelig voor verstopping ten gevolge van deeltjes in het afvalwater (Wang, Wicaksana et al. 2010). Dit komt doordat de voedingskanalen van de SWFO membranen bestaan uit nauwe (ca 0,8mm) kanalen waarin zich voedingsspacers bevinden waaraan deeltjes kunnen blijven plakken. Om te voorkomen dat deeltjes in deze kanalen terechtkomen is er – in principe – een uitvoerige voorbehandelingstap nodig. In het CoRe project was voorbehandeling een belangrijk onderdeel van het onderzoek, met de insteek van een minimale voorbehandeling met een 40 µm trommelzeef vóór de SWFO membranen. Aangezien deze voorbehandeling beperkt is, zijn de testen met de CoRe-pilot gecombineerd met een periodieke reiniging van het SWFO systeem. Deze periodieke reiniging bestond uit een (1) regelmatige luchtwaterspoeling (AWF) (Cornelissen, Vrouwenvelder et al. 2007), (2) een regelmatige osmotische terugspoeling (OBW) (Motsa, Mamba et al. 2017) en (3) een chemische reiniging (CIP) met lagere frequentie om verstoppingseffecten en vervuiling van de FO membranen in de SWFO modules tegen te gaan. Deze curatieve aanpak van SWFO-vervuiling en verstopping heeft geleid tot een uitgebreid ontwerp en

sturing van de SWFO installatie. Desondanks bleek het niet mogelijk om een stabiele en voldoende hoge flux van 5 L/m².h te halen bij een relevante concentratiefactor van 20. De curatieve vervuiliingsbeheersingsmethoden hadden wel effect, aangezien de AWS en haalbare CF in de CoRe pilot sterk verslechterden als zonder CIP werd gewerkt, maar bleken onvoldoende.. Dit leidde tot de conclusie dat het CoRe-Water-concept in de huidige vorm technisch niet haalbaar was (Hoofdstuk 7).

Een betere voorbehandeling, waarbij alle deeltjes volledig worden verwijderd, is mogelijk via micro- of ultrafiltratie (MF/UF) membraantechnologie. Er zijn verschillende commerciële MF/UF-systemen beschikbaar die zouden kunnen worden gebruikt als voorbehandeling voor het SWFO-RO systeem in plaats van de 40 µm trommelzeef. Dit heeft als groot voordeel dat SWFO-deeltjesvervuiling en -verstopping volledig kan worden voorkomen, en de synergie tussen deeltjes, organische en biologisch vervuiling kan worden doorbroken (paragraaf 7.1.3). Er is (nog) niet onderzocht of de doelstellingen van het CoRe pilotonderzoek (stabiele en voldoende FO flux) op deze manier behaald kunnen worden. Het nadeel van het gebruik van MF/UF is dat het deeltjesvervuilingsprobleem verschuift naar het MF/UF-systeem. Bovendien zijn de kosten van een dergelijk systeem substantieel waardoor de economische haalbaarheid van het CoRe-Water-concept verder in het geding zou komen..

8.3 Energieverbruik

FO wordt gedreven door een concentratieverschil waarbij een osmotische oplossing wordt verdund en terug wordt opgeconcentreerd door een nageschakeld drukgedreven omgekeerde osmose (RO) proces. Het CoRe-Water-concept bestaat dus in feite uit een SWFO-RO combinatie. En alhoewel FO wordt gezien als een laag energetisch proces (<0,2 kWh/m³), is een FO-RO combinatie thermodynamisch gezien altijd ongunstiger dan een rechtstreekse RO toepassing (Shaffer, Werber et al. 2015). De rechtstreekse behandeling van afvalwater met drukgedreven RO is door de complexe samenstelling van het afvalwater momenteel niet mogelijk gezien extreme vervuiliings- en verstoppingsproblemen. Van FO is bekend dat membraanvervuiling minder problematisch is in vergelijking met RO (Lee, Boo et al. 2010).

Door het uitgebreide ontwerp van de SWFO installatie in het CoRe project ter voorkoming van verstopping (zie par. 8.2), is het energieverbruik veel hoger dan normaal. De regelmatige hydraulische, osmotische en chemische reiniging maken gebruik van recirculatiepompen, waardoor het uiteindelijke energieverbruik van de SWFO installatie oploopt tot wel 0,5 kWh/m³. Inclusief het energieverbruik van het rondpompsysteem van de osmotische oplossing wordt het totale energieverbruik van de SWFO geschat op 0,8 kWh/m³. Het RO terugwinsysteem maakt gebruik van hoge drukpompen om de osmotische oplossing her te gebruiken, en dit systeem heeft een energieverbruik van ongeveer 1,2 kWh/m³_{influent}. In totaal is het energieverbruik van het SWFO-RO combinatie dan ca. 2,0 kWh/m³.

Kortom, het energieverbruik is hoog vanwege de complexe uitvoeringsvorm van SWFO.

8.4 Vaste en variabele kosten

Uit de economische evaluatie in paragraaf 7.2 volgt dat het CoRe-Water-concept een factor 4 tot 5 meer kost (kosten – opbrengsten) dan een conventionele zuivering (de Referentie). De voornaamste oorzaak van dit verschil zijn de hoge stichtingskosten van CoRe. De stichtingskosten van het SWFO-RO proces worden voor een groot deel bepaald door de hoge kosten van de FO membranen, voor SWFO membraan ca. 150 €/m². Dat wordt vooral veroorzaakt door de dure constructie van de membraanmodules, door het feit dat de hoeveelheid wereldwijd geproduceerde modules nog relatief laag is en er nog weinig leveranciers actief zijn op de FO markt (Cornelissen, Harmsen et al. 2011). De modulekosten voor RO membranen zijn aanzienlijk lager (ca. 20€/m²), doordat de RO markt al tientallen jaren groot en groeiende is, het een volwassen technologie betreft en er vele leveranciers op die markt actief zijn. De kosten van het SWFO-RO concept zijn ook hoog doordat de behaalde flux voor FO relatief

gering is (ca. 5 L/m².h). Tenslotte is de complexiteit hoog van de uitvoeringsvorm met periodieke reiniging, waardoor veel piping, instrumentatie en sturing nodig is, die de kosten opdrijven. Om het CoRe-Water-concept meer competitief te maken zal deze kostenpost (stichtingskosten) sterk moeten afnemen. Naar verwachting nemen de kosten van de FO-membranen af als de markt verder groeit.

Ook de operationele kosten van CoRe zijn hoog t.o.v. een conventionele zuivering. Dit komt voornamelijk door het hoge verbruik aan chemicaliën voor de membraanreinigingen en het elektriciteitsverbruik van de FO-RO installatie.

De relatief lage prijs van enkele grondstoffen die bij CoRe worden teruggewonnen, o.a. zeefgoed, ammoniumnitraat en struviet betekenen dat de opbrengsten de hoge kosten niet compenseren (McCarty, Bae et al. 2011). Het is te verwachten dat grondstoffen in de toekomst een hogere economische waarde krijgen. De opbrengsten van CoRe zouden hierdoor hoger worden. Een toename van grondstofprijzen betekent ook dat de kosten van het CoRe-Water-concept (aanzienlijk) zullen toenemen door het hoge verbruik aan basischemicaliën. Het zal om die reden vooral afhangen van het verschil in marktwaarde tussen teruggewonnen grondstoffen en basischemicaliën of een algemene stijging van grondstofprijzen zal leiden tot een significante daling van de totale kosten (kosten – opbrengsten) van het CoRe-Water-concept. In een conventionele zuivering worden relatief weinig grondstoffen verbruikt en ook weinig gewonnen. De kosten voor dit zuiveringsconcept zijn daardoor minder afhankelijk van fluctuaties in grondstofprijzen.

Samenvattend kan gesteld worden dat de geschatte kosten van het CoRe-Water-concept hoog zijn en de opbrengsten op dit moment nog onvoldoende economische waarde representeren. De kosten zijn hoog vanwege dure FO membranen met een lage flux gecombineerd met de complexe uitvoeringsvorm. Vooral een substantiële verlaging van de membraankosten (minder membranen door hogere flux en/of goedkopere membranen) en een verlaging van het chemicaliënverbruik (zie par. 8.5) zijn de richtingen waarop een eventuele toekomstige doorontwikkeling zich moet concentreren.

8.5 Een nieuw concept - Ondergedompelde FO platen en Capillaire FO

Op basis van de bevindingen in dit onderzoek is gezocht naar een FO alternatief dat minder vervuils- en verstoppingsgevoelig is, minder energie verbruikt en goedkoper is dan het huidige SWFO-RO concept. Het alternatief is om FO te bedrijven als een combinatie van (i) een ondergedompeld systeem, waarbij FO membranen worden toegepast als ondergedompelde platen en/of door (ii) een capillair/tubulair FO systeem waarbij de voeding van binnen naar buiten wordt aangevoerd (Figuur 8-1) (Wang, Shi et al. 2010, Chen, Gu et al. 2014). Ondergedompelde en capillaire/tubulaire FO membranen en modules zijn in dit document verder afgekort tot respectievelijk sub-FO (submerged FO) en cap-FO/TFO (capillaire/tubulaire FO).

Zowel sub-FO als cap-FO/TFO maken geen gebruik van voedingsspacers waarin zich vervuiling kan ophopen zoals bij SWFO membranen. Het exacte ontwerp en de afstand tussen sub-FO platenpakket of de exacte diameter van de cap-FO/TFO moet nog worden geoptimaliseerd. Wel is duidelijk dat een dergelijk sub-FO of cap-FO/TFO systeem robuuster is ten opzichte van het SWFO ontwerp, minder gevoelig voor verstopping en een minder uitgebreide voorzuivering behoeft. De maaswijdte van de voorbehandelingsscreens zal een fractie moeten bedragen van de afstand tussen de ondergedompelde platen (sub-FO) of de diameter van de holle vezels (cap-FO/TFO), bijvoorbeeld een max. 0,5 mm screen als voorbehandeling bij een FO plaatafstand of cap-FO/TFO diameter van 1 mm. Dit betekent een eenvoudiger voorbehandeling, dat zal leiden tot lagere stichtingskosten in vergelijking met het SWFO-RO systeem. Om onvermijdelijke verstopping tegen te gaan tussen de sub-FO platen of cap-FO/TFO kan gebruik worden gemaakt van (periodieke) bellenbeluchting of een ondergedompelde recirculatiepomp, die eenvoudiger en energetische gunstiger uit te voeren is dan de reiniging van een SWFO systeem (zie hieronder *een innovatief beluchtingssysteem*).



Figuur 8-1 Spiraalgewonden membranen, ondergedompelde plaatmembranen, capillaire/tubulaire membranen en een capillaire membraansysteem (van linksboven naar rechtsonder). Let wel, dit zijn geen FO membranen

Sub-FO heeft veel minder energie nodig voor het recirculeren van het afvalwater in de voedingstank in vergelijking met het recirculatiesysteem in het SWFO systeem. De benodigde langsstroming langs de sub-FO platen kan worden geleverd door een beluchtingssysteem en/of een ondergedompeld recirculatiesysteem. Naar schatting daalt de energiebehoefte voor het voedingsrecirculatiesysteem hierdoor met 50 %. Het totale sub-FO-RO systeem zal dan naar verwachting 12,5% minder energie verbruiken ($1,75 \text{ kWh/m}^3$) ten opzichte van het totale SWFO-RO systeem ($2,0 \text{ kWh/m}^3$). Dit is nog wel aanzienlijk hoger dan bij een conventioneel actief slibstelsel (ca. $0,5\text{-}0,6 \text{ kWh/m}^3$). Echter de waterkwaliteit van het geproduceerde water na een FO-RO systeem is vele malen beter dan na een CAS. Voor cap-FO is de energiebehoefte naar verwachting vergelijkbaar met het recirculatiesysteem in het SWFO systeem. Het grote voordeel voor het cap-FO systeem zit in een minder striktere voorbehandeling in vergelijking met een SWFO systeem (zie hierboven).

De stichtingskosten van een sub-FO systeem (50€/m^2) zijn lager dan de kosten van een SWFO systeem (150€/m^2). De flux van de FO membranen zal in beide systemen naar verwachting vergelijkbaar zijn ($5 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$). De flux wordt in belangrijke mate bepaald door de intensiteit van de langsstroomsnelheid. Het ingewikkelde en dure recirculatiesysteem in de SWFO voor periodieke hydraulische, osmotische en chemische reiniging kan worden vervangen door een goedkopere variant voor het reinigen van sub-FO membranen. Hierdoor is minder piping,

instrumentatie en sturing nodig in het sub-FO systeem dat zal leiden tot lagere kosten. De exacte uitvoeringsvorm van chemische reiniging in een sub-FO systeem zal moeten worden uitgezocht in vervolgonderzoek, bijvoorbeeld met pilottesten. Verder is het ruimtegebruik van een sub-FO systeem wellicht groter dan voor een SWFO-RO systeem dat een mogelijk nadeel is. Voor een cap-FO systeem zijn de kosten voor de membranen nog niet geheel duidelijk, maar zullen vergelijkbaar zijn met SWFO membranen en bij massaproductie ook goedkoper kunnen worden.

Kortom, een sub-FO-RO systeem is minder complex dan een SWFO-RO systeem, en heeft hierdoor minder voorbehandeling nodig en de periodieke reiniging is minder ingewikkeld en goedkoper. Dit zal leiden tot minder energieverbruik en een lagere CAPEX. Een cap-FO systeem is vergelijkbaar in complexiteit met een SWFO-RO, maar behoeft veel minder voorbehandeling en zal daarom in totaal lager uitkomen in CAPEX. Om uiteindelijk te kunnen vaststellen of sub-FO-RO danwel cap-FO een beter alternatief is voor het hier onderzochte SWFO-systeem, is verder onderzoek nodig naar het permeabiliteits-, drukval- en retentiegedrag van deze type configuraties.

Een innovatief beluchtingssysteem

Om verstopping van ondergedompelde platen (sub-FO) of capillaire/tubulaire membranen (cap-FO/TFO) te voorkomen moet gebruik gemaakt worden van voldoende turbulentie langs het membraanoppervlak. Dit wordt traditioneel uitgevoerd door voedingswater met een hoog debiet (langs) de ondergedompelde platen of capillaire/tubulaire membranen te voeren. Dit hoge debiet zorgt voor voldoende turbulentie en het voorkomen van verstopping en opruimen van vervuiling. Het te verpompen debiet is proportioneel met het energieverbruik, waardoor deze systemen traditioneel een hoog energieverbruik hebben. Een bekend alternatief is het gebruik van (grove) bellenbeluchting, waarbij de bellen zorgen voor turbulentie aan het membraanoppervlak. Dit is een gebruikelijk uitvoeringsvorm voor traditionele ondergedompelde of capillaire/tubulaire membraansystemen, waarbij meestal gebruik wordt gemaakt van lucht. De grootte van de luchtbellen in relatie tot de plaatafstand of diameter van de membranen zijn van invloed op de effectiviteit van het schoonhouden van het membraanoppervlak. Gebruikmaking van bellenbeluchting levert naar verwachting een aanzienlijk besparing op in energieverbruik.

Deze vorm van bellenbeluchting is voor sub-FO en cap-FO/TFO in principe uitermate geschikt. In het geval van het CoRe-Water-concept kan geen gebruik worden gemaakt van lucht omdat zuurstof in lucht zal leiden tot een ongewenste aerobe afbraak van CZV en nutriënten in het ruwe afvalwater, zodat zowel biogasvorming uit het concentraat als terugwinning van deze nutriënten gereduceerd worden. Er kan wel gebruik worden gemaakt van alternatieve gassen, zoals stikstof, kooldioxide of methaan om hetzelfde gewenste turbulente effect te krijgen (Luo, Hai et al. 2015). Kooldioxide is een in water onder druk oplosbaar gas dat bij ontspanning sterk expandeert en een sterke turbulente veroorzaakt. Het effect is vergelijkbaar met het openen van een fles frisdrank of champagne, dat kan worden ingezet voor het schoonspoelen van membranen. Dit concept is bekend en gepatenteerd in 2013 (NL1038905C2 WERKWIJZE VOOR HET REINIGEN VAN MEMBRANEN). In het gepatenteerde concept wordt het kooldioxide echter volledig verbruikt, waardoor er grote hoeveelheden gecarboniseerd water nodig is. Dit maakt de technische uitvoering van dit concept voor sub-FO en cap-FO lastig.

9 Conclusies en vervolgonderzoek

9.1 Conclusies

Inzichten uit de bureaustudies (voorafgaand aan de lab- en pilottesten)

- Na anaerobe behandeling van het concentraat uit het CoRe-proces lijkt struvietprecipitatie een logische eerste stap. Hiermee kan fosfaat grotendeels worden teruggewonnen en ongeveer 10 % van het ammonium worden gebonden. Voor het resterende ammonium lijken elektrolyse en ionenwisseling de meest voor de hand liggende technieken.
- Het permeaat uit de FO-RO installatie voldoet op vrijwel alle parameters aan de eisen voor gebruik als koelwater, het ammoniumgehalte verdient wel nadere evaluatie. Uit de bureaustudie komt naar voren dat dit gehalte mogelijk te hoog is. Voor hoogwaardiger toepassingen zoals halffabrikaat voor stoomketelwater, demiwater, lozing op oppervlaktewater of infiltratie in de bodem is een extra behandelingsstap vereist om het ammoniumgehalte verder te verlagen.

Labtesten met FO testcellen en anaerobe omzetting (KWR)

- Uit labtesten met vlakke plaat FO membranen was een stabiele flux van 10 L/m².h bij CF = 1 haalbaar. De curatieve maatregelen (AWF, OBW en CIP) hebben allen een positief effect op de beheersing van vervuiling en verstopping. Extra voorbehandeling met ijzerdosering bleek niet succesvol.
- Het laboratoriumonderzoek gericht op anaerobe vergisting van het FO-concentraat liet geen verschil zien tussen de methaanproductiepotentieel bij 20 en 35 °C. Dit betekent dat het FO-concentraat bij een relatief lage temperatuur kan worden vergist. Verder moet bij zoutconcentraties boven 0,6 M rekening worden gehouden met remming en een verminderde methaanopbrengst.

On-site pilottesten met SWFO

- Tijdens het FO-pilotonderzoek bij RWZI Wehl (2018/2019) werd een stabiele flux van 4 tot 5 L/m².h bereikt bij een CF = 28 gedurende een continue bedrijfsvoering. CIP zorgde voor een vrijwel volledig herstel van de flux. OBW bleek effectiever in het reinigen van het membraan dan in het beheersen van optredende verstopping.
- Tijdens het FO-pilotonderzoek bij Gemaal Leusden (2019/2020) varieerde de voedingswatersamenstelling en bevatte meer zwevende stoffen dan bij RWZI Wehl, wat resulteerde in meer verstopping en vervuiling (hogere drukval en lagere AWP). Deze problemen waren niet beheersbaar met alleen AWF en OBW, en een betere voorbehandeling bleek noodzakelijk. Zeer hoge retenties werden gemeten voor organische microverontreinigingen, echter de retentie van ammonium bleek een aandachtspunt.
- Tijdens het CoRe-pilotonderzoek bij RWZI Roermond (2020/2021) is onderzoek uitgevoerd met een 2 m³/h CoRe-pilot op beperkt voorbehandeld (40 µm trommelzeef) afvalwater. Sterke membraanvervuiling en verstopping traden op tijdens de afvalwatertesten ondanks de toegepaste curatieve vervuiliingsbeheersingsmethoden zoals SWF, OBW en CIP. Dit bleek uit de operationele parameters tijdens de testen en werd bevestigd door een membraanautopsie met visuele waarnemingen, ATP en CH metingen. In totaal nam het gewicht van de installatie toe met 79 kg als gevolg van accumulatie van vuil. Ondanks sterke vervuiling blijkt het CoRe-Water-concept robuust en bleek een goede barrière voor nutriënten (incl. ammonium) en OMV.
- De CoRe-pilot bij RWZI Roermond scoorde slechter door meer vervuiling/verstopping in vergelijking met het FO lab- en pilotonderzoek bij RWZI Wehl en Gemaal Leusden. Het afvalwater van Wehl en Leusden bleek vooral beter van kwaliteit in relatie tot de geleidbaarheid, wat een belangrijk rol speelt bij het behalen van de gewenste CF.

Technische en economische haalbaarheid

- Het CoRe-Water-concept in de huidige vorm (SWFO-RO) is technisch niet haalbaar door een onvoldoende hoge flux door de FO-membranen en een onvoldoende hoge CF.. De belangrijkste oorzaak hiervan was onvoldoende voorbehandeling resulterend in een complexe combinatie van deeltjesvervuiling, organische vervuiling en biofouling van de FO-modules. Verder bleek de CF begrensd te zijn tot 20, vanwege de relatief hoge geleidbaarheid van het afvalwater (RWZI Roermond).
- De CoRe-pilot vormt een robuuste barrière voor nutriënten (CZV, tot-N, tot-P, NH₄ en zouten) en een uitgebreid mengsel van organische microverontreinigingen (OMV). De kwaliteit van het geproduceerde water (RO-permeaat) was zeer goed.
- De opbrengsten van CoRe worden vrijwel exclusief bepaald door de afzet van ultrapuur water. Bij een prijs van 0,5 EUR/m³ ultrapuur water is dit een aanzienlijke opbrengstenpost. De overige gewonnen grondstoffen representeren nauwelijks enige economisch waarde. Dit komt doordat de volumina van de stromen gering zijn en de economische waarde (momenteel) laag is.
- Uit de indicatieve vergelijking tussen de scenario's CoRe-Water en Referentie blijkt dat op zowel stichtingskosten als operationele kosten het CoRe scenario aanzienlijk duurder is. De opbrengsten van CoRe zijn beduidend hoger, maar de waarde van die opbrengsten zijn relatief gering t.o.v. de kosten. De totale kosten (stichtingskosten + operationele kosten – opbrengsten) van CoRe zijn een factor 4 tot 5 hoger dan van de Referentie. Dit leidt tot de conclusie dat het CoRe-Water-concept in de huidige vorm (SWFO-RO) op deze schaal economisch niet haalbaar is.

Een nieuw perspectief voor het CoRe-Water-concept

- Het CoRe-Water-concept is haalbaar als vervuiling en verstopping kunnen worden beheerst.
- Een alternatief FO module-ontwerp biedt een oplossing voor (i) vervuilingsgevoeligheid, (ii) hoog energieverbruik en (iii) hoge CAPEX/OPEX. Wij stellen een nieuw CoRe-Water-concept voor als een combinatie van (i) een ondergedompeld systeem, waarbij FO membranen worden toegepast als ondergedompeelde platen of holle vezels en/of door (ii) een capillair/tubulair FO systeem waarbij de voeding van binnen naar buiten wordt aangevoerd. Een dergelijk systeem is minder vervuilingsgevoelig, is beter te reinigen, heeft minder energie nodig, eenvoudiger qua ontwerp en de membranen zijn goedkoper dan de SWFO membranen.
- Het huidige CoRe-Water-concept (met SWFO-membranen) is mogelijk wel interessant voor het behandelen van minder vervuilende afvalwaterstromen (bv. in de industrie) waar een modulair en robuust systeem veel voordelen zou kunnen leveren.

9.2 Vervolgonderzoek

In het CoRe-project is een innovatief fysisch-chemisch afvalwaterzuiveringsconcept voorgesteld gebaseerd op bestaande SWFO technologie (Toray). Het totaalconcept staat in principe nog overeind, maar het CoRe project werd de afgelopen jaren gehinderd door de nadelen die kleven aan SWFO membranen. Recente nieuwe FO membraanontwikkelingen hebben geresulteerd in commercieel beschikbare capillaire/tubulaire FO-membranen (Aquaporin/Berghof Membranes). In een vervolgproject zouden we deze nieuwe membranen willen gebruiken voor het nieuwe CoRe-Water-concept. Voor dit nieuwe CoRe-Water-concept is inmiddels een octrooi aangevraagd. Deze cap-FO/TFO membranen laten het toe om de CoRe-pilot te vereenvoudigen, zonder concessies te hoeven doen aan (minimale) voorbehandeling. De doelstelling van het vervolgproject zou vergelijkbaar zijn aan het huidige project (bijv. stabiele bedrijfsvoering te halen bij een flux van 5 L/m².h bij een CF van 20), en de lessen uit het huidige project kunnen meegenomen worden. Een belangrijke vraag daarbij is of deze nieuwe TFO-membranen qua robuustheid ten aanzien van de verwijdering van nutriënten en OMV vergelijkbaar of zelfs beter zijn dan de SWFO in het huidige project. Verder is (lange termijn) onderzoek nodig naar het permeabiliteits-, drukval- en retentiegedrag van deze alternatieve FO-configuraties.

In een eventueel vervolgproject zal het onderzoek naar de anaerobe vergisting van het FO-concentraat een meer prominente plaats moeten krijgen. In het huidige CoRe-project is digestieonderzoek alleen op labschaal uitgevoerd. In een eventueel vervolgproject zou dit onderzoek op een meer representatieve (pilot)schaal moeten worden uitgevoerd.

10 Literatuur

1. Cath, T. Y., A. E. Childress and M. Elimelech (2006). "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments." *Journal of Membrane Science* **281**(1-2): 70-87.
2. Chen, L., Y. Gu, C. Cao, J. Zhang, J. W. Ng and C. Tang (2014). "Performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor with forward osmosis membrane for low-strength wastewater treatment." *Water Research* **50**: 114-123.
3. Coday, B. D., P. Xu, E. G. Beaudry, J. Herron, K. Lampi, N. T. Hancock and T. Y. Cath (2014). "The sweet spot of forward osmosis: Treatment of produced water, drilling wastewater, and other complex and difficult liquid streams." *Desalination* **333**(1): 23-35.
4. Cornelissen, E. R., D. Harmsen, E. F. Beerendonk, J. J. Qin, H. Oo, K. F. De Korte and J. W. M. N. Kappelhof (2011). "The innovative Osmotic Membrane Bioreactor (OMBR) for reuse of wastewater." *Water Science and Technology* **63**(8): 1557-1565.
5. Cornelissen, E. R., D. J. H. Harmsen, B. Blankert, L. P. Wessels and W. G. J. van der Meer (2021). "Effect of minimal pre-treatment on reverse osmosis using surface water as a source." *Desalination* **509**.
6. Cornelissen, E. R., J. S. Vrouwenvelder, S. G. J. Heijman, X. D. Viallefont, D. Van Der Kooij and L. P. Wessels (2007). "Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements." *Journal of Membrane Science* **287**(1): 94-101.
7. D'Haese, A., J. C. O. Bravo, D. Harmsen, L. Vanhaecke, A. R. D. Verliefde, D. Jeison and E. R. Cornelissen (2021). "Analysing organic micropollutant accumulation in closed loop FO–RO systems: A pilot plant study." *Journal of Membrane Science* **626**.
8. De-Bashan, L. E. and Y. Bashan (2004). "Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003)." *Water Research* **38**(19): 4222-4246.
9. Geissdoerfer, M., P. Savaget, N. M. P. Bocken and E. J. Hultink (2017). "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?" *Journal of Cleaner Production* **143**: 757-768.
10. Hijnen, W. A. M., C. Castillo, A. H. Brouwer-Hanzens, D. J. H. Harmsen, E. R. Cornelissen and D. van der Kooij (2012). "Quantitative assessment of the efficacy of spiral-wound membrane cleaning procedures to remove biofilms." *Water Research* **46**(19): 6369-6381.
11. Jenicek, P., J. Kutil, O. Benes, V. Todt, J. Zabranska and M. Dohanyos (2013). "Energy self-sufficient sewage wastewater treatment plants: Is optimized anaerobic sludge digestion the key?" *Water Science and Technology* **68**(8): 1739-1743.
12. Kim, Y., M. Elimelech, H. K. Shon and S. Hong (2014). "Combined organic and colloidal fouling in forward osmosis: Fouling reversibility and the role of applied pressure." *Journal of Membrane Science* **460**: 206-212.
13. Lay, W. C. L., J. Zhang, C. Tang, R. Wang, Y. Liu and A. G. Fane (2012). "Factors affecting flux performance of forward osmosis systems." *Journal of Membrane Science* **394-395**: 151-168.
14. Lee, S., C. Boo, M. Elimelech and S. Hong (2010). "Comparison of fouling behavior in forward osmosis (FO) and reverse osmosis (RO)." *Journal of Membrane Science* **365**(1-2): 34-39.
15. Luo, W., F. I. Hai, W. E. Price and L. D. Nghiem (2015). "Water extraction from mixed liquor of an aerobic bioreactor by forward osmosis: Membrane fouling and biomass characteristics assessment." *Separation and Purification Technology* **145**: 56-62.
16. Luo, Y., W. Guo, H. H. Ngo, L. D. Nghiem, F. I. Hai, J. Zhang, S. Liang and X. C. Wang (2014). "A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment." *Science of the Total Environment* **473-474**: 619-641.
17. Lutchmiah, K., E. R. Cornelissen, D. J. H. Harmsen, J. W. Post, K. Lampi, H. Ramaekers, L. C. Rietveld and K. Roest (2011). "Water recovery from sewage using forward osmosis." *Water Science and Technology* **64**(7): 1443-1449.
18. Lutchmiah, K., A. R. D. Verliefde, K. Roest, L. C. Rietveld and E. R. Cornelissen (2014). "Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review." *Water Research* **58**: 179-197.
19. McCarty, P. L., J. Bae and J. Kim (2011). "Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved?" *Environmental Science and Technology* **45**(17): 7100-7106.
20. Mi, B. and M. Elimelech (2010). "Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents." *Journal of Membrane Science* **348**(1-2): 337-345.

21. Motsa, M. M., B. B. Mamba, J. M. Thwala and A. R. D. Verliefde (2017). "Osmotic backwash of fouled FO membranes: Cleaning mechanisms and membrane surface properties after cleaning." Desalination **402**: 62-71.
22. Shaffer, D. L., J. R. Werber, H. Jaramillo, S. Lin and M. Elimelech (2015). "Forward osmosis: Where are we now?" Desalination **356**: 271-284.
23. Tiraferri, A., N. Y. Yip, A. P. Straub, S. Romero-Vargas Castrillon and M. Elimelech (2013). "A method for the simultaneous determination of transport and structural parameters of forward osmosis membranes." Journal of Membrane Science **444**: 523-538.
24. Verstraete, W., P. Van de Caveye and V. Diamantis (2009). "Maximum use of resources present in domestic "used water"." Bioresource Technology **100**(23): 5537-5545.
25. Wang, R., L. Shi, C. Y. Tang, S. Chou, C. Qiu and A. G. Fane (2010). "Characterization of novel forward osmosis hollow fiber membranes." Journal of Membrane Science **355**(1-2): 158-167.
26. Wang, Y., F. Wicaksana, C. Y. Tang and A. G. Fane (2010). "Direct microscopic observation of forward osmosis membrane fouling." Environmental Science and Technology **44**(18): 7102-7109.
27. Xu, Y., X. Peng, C. Y. Tang, Q. S. Fu and S. Nie (2010). "Effect of draw solution concentration and operating conditions on forward osmosis and pressure retarded osmosis performance in a spiral wound module." Journal of Membrane Science **348**(1-2): 298-309.
28. Zhang, J., W. L. C. Loong, S. Chou, C. Tang, R. Wang and A. G. Fane (2012). "Membrane biofouling and scaling in forward osmosis membrane bioreactor." Journal of Membrane Science **403-404**: 8-14.

11 Lijst met afkortingen

ATP	Adenosine trifosfaat/ maat voor gehalte aan biomassa
AWF	Air Water Flush/Luchtwaterspoeling
CAPEX	Capital expenditures/investeringskosten, ook wel stichtingskosten of kapitaallasten genoemd
Cap-FO	Capillair FO membraan
CF/VCF	Concentratiefactor/Volumetrische concentratiefactor
CH	Carbo hydrates/koolhydrate, maat voor gehalte aan biomassa
CIP	Cleaning in Place
CMP	Cumulative methane production potential/cumulatief methaan productiepotentieel
CoRe	CoRe concept: Concentrate, Recover & Reuse
CZV/COD	Chemische zuurstofverbruik/ Chemical Oxygen Demand
dP/ ΔP	Drukval (over membraan of over membraanmodule)
DS	Draw Solution
FO	Forward Osmosis
LMH	Afkorting voor membraan flux in liter per m ² membraanoppervlak per uur (l/m ² *h)
M	Molair (mol per liter)
NH ₄ -N	Ammonium-stikstof
OBW	Osmotic Backwash/osmotische terugspoeling
OMV	Organische microverontreinigingen
OPEX	Operational expenditures/operationele kosten (vaak uitgedrukt in €/m ³)
PO ₄ -P	Ortho-fosfaat
RO	Omgekeerde osmose (reversed osmosis)
RSF	Reversed salt flux/omgekeerde zoutflux of zoutlek
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
SMA	Specific methanogenic activity/specifieke methanogene activiteit van anaeroob slib
STD	Standaarddeviatie
Sub-FO	Submerged FO membrane (vlakke plaat)
SWF	Schoonwaterflux
SWFO	Spiral Wound FO membraan
TFO	Tubulair FO membraan
TOC	Total organic carbon/totaal organisch koolstof
TOTEX	Totale kosten = CAPEX + OPEX
WP	Werkpakket

Bijlagen

I CIP procedures CoRe pilot Roermond

Overzicht set-points CIP-acties CoRe									
Onderdeel									
1A	Water flush			CIP-Base			CIP-Acid		
1B	CIP-tank level	1,4	m3	CIP-tank level	1,0	m3	CIP-tank level	1	m3
	Volume set-point	0,8	m3	Dosing flow	100	%	Dosing flow	100	%
	Flow-set-point	12,8	m3/h	Dosing duration	417	sec.	Dosing duration	2880	sec.
				Pre-soak flow	12,8	m3/h	Pre-soak flow	12,8	m3/h
	Water Rinse			Pre-soak duration	1200	sec.	Pre-soak duration	1200	sec.
	CIP-tank level	1,0	m3	Soak duration	2400	sec.	Soak duration	2400	sec.
	Duration	1800	sec.	Post soak flow	12,8	m3/h	Post soak flow	12,8	m3/h
	Flow-set-point	12,8	m3/h	Post Soak duration	1200	sec.	Post Soak duration	1200	sec.
				Duur Spoelen vat	1800	sec.	Duur Spoelen vat	1800	sec.
				aantal WF	2x		aantal WF	2x	
1A1	Water flush			CIP-Base			CIP-Acid		
1A2	CIP-tank level	0,7	m3	CIP-tank level	0,5	m3	CIP-tank level	0,5	m3
1B1	Volume set-point	0,4	m3	Dosing flow	100	%	Dosing flow	100	%
1B2	Flow-set-point	6,4	m3/h	Dosing duration	209	sec.	Dosing duration	1440	sec.
				Pre-soak flow	6,4	m3/h	Pre-soak flow	6,4	m3/h
	Water Rinse			Pre-soak duration	1200	sec.	Pre-soak duration	1200	sec.
	CIP-tank level	0,5	m3	Soak duration	2400	sec.	Soak duration	2400	sec.
	Duration	1800	sec.	Post soak flow	6,4	m3/h	Post soak flow	6,4	m3/h
	Flow-set-point	0	m3/h	Post Soak duration	1200	sec.	Post Soak duration	1200	sec.
2A	Water flush			CIP-Base			CIP-Acid		
2B	CIP-tank level	0,5	m3	CIP-tank level	0,3	m3	CIP-tank level	0,3	m3
	Volume set-point	0,3	m3	Dosing flow	100	%	Dosing flow	100	%
	Flow-set-point	1,6	m3/h	Dosing duration	125	sec.	Dosing duration	864	sec.
				Pre-soak flow	1,6	m3/h	Pre-soak flow	1,6	m3/h
	Water Rinse			Pre-soak duration	1200	sec.	Pre-soak duration	1200	sec.
	CIP-tank level	0,3	m3	Soak duration	2400	sec.	Soak duration	2400	sec.
	Duration	1800	sec.	Post soak flow	1,6	m3/h	Post soak flow	1,6	m3/h
	Flow-set-point	1,6	m3/h	Post Soak duration	1200	sec.	Post Soak duration	1200	sec.
				Duur Spoelen vat	1800	sec.	Duur Spoelen vat	1800	sec.
				aantal WF	2x		aantal WF	2x	
Draw 1	Water flush			CIP-Base			CIP-Acid		
	CIP-tank level	1,1	m3	CIP-tank level	0,8	m3	CIP-tank level	0,8	m3
	Volume set-point	0,6	m3	Dosing flow	100	%	Dosing flow	100	%
	Flow-set-point	9,6	m3/h	Dosing duration	334	sec.	Dosing duration	2304	sec.
				Pre-soak flow	9,6	m3/h	Pre-soak flow	9,6	m3/h
	Water Rinse/Osmotic Backwash			Pre-soak duration	1200	sec.	Pre-soak duration	1200	sec.
	CIP-tank level	0,8	m3	Soak duration	2400	sec.	Soak duration	2400	sec.
	Duration	1800	sec.	Post soak flow	9,6	m3/h	Post soak flow	9,6	m3/h
	Flow-set-point	9,6	m3/h	Post Soak duration	1200	sec.	Post Soak duration	1200	sec.
				Duur Spoelen vat	1800	sec.	Duur Spoelen vat	1800	sec.
				aantal WF	2x		aantal WF	3x	
Draw 2	Water flush			CIP-Base			CIP-Acid		
	CIP-tank level	0,3	m3	CIP-tank level	0,3	m3	CIP-tank level	0,3	m3
	Volume set-point	0,1	m3	Dosing flow	100	%	Dosing flow	100	%
	Flow-set-point	1,2	m3/h	Dosing duration	125	sec.	Dosing duration	864	sec.
				Pre-soak flow	1,2	m3/h	Pre-soak flow	1,2	m3/h
	Water Rinse/Osmotic Backwash			Pre-soak duration	1200	sec.	Pre-soak duration	1200	sec.
	CIP-tank level	0,3	m3	Soak duration	2400	sec.	Soak duration	2400	sec.
	Duration	1800	sec.	Post soak flow	1,2	m3/h	Post soak flow	1,2	m3/h
	Flow-set-point	1,2	m3/h	Post Soak duration	1200	sec.	Post Soak duration	1200	sec.
				Duur Spoelen vat	1800	sec.	Duur Spoelen vat	1800	sec.
				aantal WF	2x		aantal WF	2x	

II Analysepakketten

Tabel II-11-1 Uitgevoerde analyses tijdens tweede serie afvalwatertesten

Eurofins/Omegam			Aqualysis
Standaard pakket	ICPMS	PAK	OMV
Calcium	Arseen	acenafteen	1,2,3-benzotriazool
Kalium	Cadmium	acenaftyleen	som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool
Magnesium	Chroom	anthraceen	amisulpride
Natrium	Koper	benzo(a)anthraceen	azitromycine
Silicium	Lood	benzo(a)pyreen	candesartan
Ammonium	Nikkel	benzo(b)fluoranteen	carbamazepine
Chloride	Zink	benzo(ghi)peryleen	citalopram
Totaal stikstof	Kwik	benzo(k)fluoranteen	claritromycine
totaal fosfaat		chryseen	diclofenac
sulfaat		dibenz(a, h)anthraceen	furosemide
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)		fenantreen	gabapentine
Totaal Organisch Koolstof (TOC)		fluoranteen	hydrochloorthiazide
CZV		fluoreen	irbesartan
CZV (na filtratie)		indeno(1,2,3-cd)pyreen	metoprolol
Fosfaat		naftaleen	propranolol
Onopgeloste bestanddelen		pyreen	sotalol
		som PAK (EPA)	sulfamethoxazol
		som PAK (10)	trimethoprim
			venlafaxine

III Bevindingen en analyseresultaten test met trommelzeef

Opzet test met water na voorbezinktank Trumma filter 3 februari 2021

Voor de start van de test is de Trumma trommelzeef inclusief doek eerst schoongemaakt met drinkwater.

Vervolgens is de Trumma gedurende 8 uur in bedrijf genomen bij een debiet van 1 m³/uur. Het debiet is gecheckt op basis de toename in vloeistof niveau in de IBC tank. Daarnaast is er voor en na de Trumma iedere 2 uur (0, 2, 4, 6 uur) een monster genomen. Van de monsters voor en na Trumma is een mengmonster gemaakt en de monsters zijn geanalyseerd op

- deeltjestellingen
- ICPMS
- Droogrest en gloeirest om de verhouding organisch/anorganisch te bepalen
- Koolhydraten, eiwitten, TOC
- ATP

Daarnaast is er een monster van het bedrijfswater en een monster van het RWZI influent genomen waar ook bovenstaande analyses op worden uitgevoerd.

Ook is 10 liter water na de Trumma opgevangen en na 0, 2, 4, 6, 8 en 24 uur visueel beoordeeld om te checken of er naar verloop van tijd coagulatie en/of flocculatie plaatsvindt.

Tevens is een zeef van 45 µm in de afvoer na de Trumma geplaatst om te kijken of er ook doorslag plaatsvindt van deeltjes > 45 µm door het filterdoek en is de achtergebleven vaste stof van het doek verzameld zodat het eventueel in een later stadium kon worden geanalyseerd.

Bevindingen

Tabel III11-1 Data test Trumma 3-2-2021

Tijd	Looptijd	Debiet na Trumma			Afvoer		Opmerkingen
		Volume	Tijd	Debiet	Debiet	Verlies	
		L	sec	m ³ /uur	L/uur		
08:25	00:00	94					Start test
08:37	00:12	94	307	1,10			Spoeling tijdens uitliteren
10:25	02:00	94	329	1,03	72	7%	Spoeling tijdens uitliteren
12:25	04:00	94	345	0,98	20	2%	Spoeling aan het einde van het uitliteren (enkele seconde)
14:15	05:50	94	322	1,05	15	1%	Spoeling tijdens uitliteren
15:23	06:58	94	338	1,00	20	2%	Spoeling tijdens einde uitliteren



T = 0



T = 2 uur



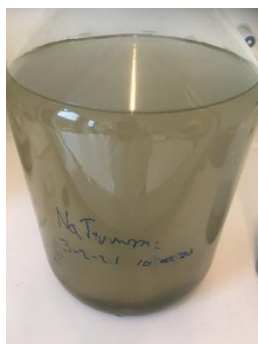
T = 4 uur



T = 5 uur

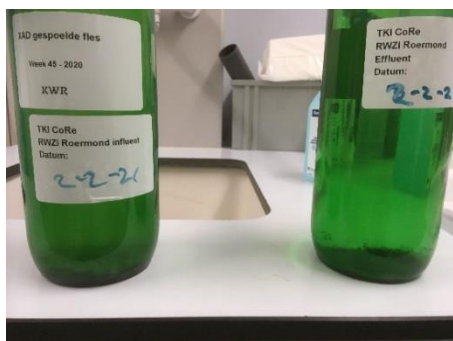


T = 22 uur



T = 24 uur

Figuur III-11-1 Monster na Trumma in de tijd



Figuur III11-2 In en effluent RWZI Roermond na 20 uur



Figuur III-11-3 Na Trumma 40 µm zeef (Na 5 – 10 minuten geen water meer door filter)

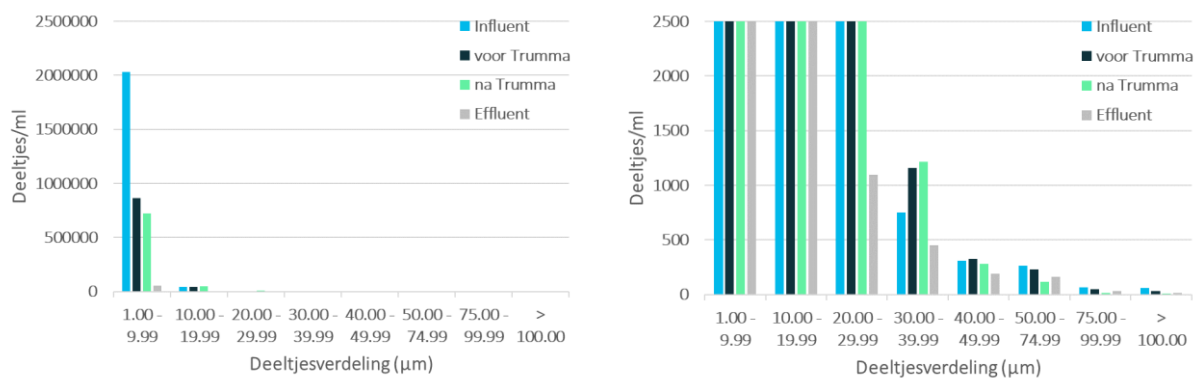


Figuur III11-4 Voor Trumma na 7 uur bedrijfsvoering (1 m³/uur)

Analyseresultaten

Tabel III11-2 Analyseresultaten Trumma test

		Influent	Voor Trumma	Na Trumma	Effluent
ATP	pg/ml	49000	26000	25000	6000
Eiwitten als BSA	mg/l	14	5,4	6,4	2,4
Koolhydraten als D(+)-glucose	mg/l	120	29	21	8,8
totaal organisch koolstof (TOC mg C/L)	mg C/l	110	47	35	30
onopgeloste bestanddelen	mg/l	185	67,4	36	19
gloeirest	%	22	24	32	27
silicium (Si)	mg/L	10	7,3	7,2	8,3
aluminium (Al)	µg/l	9300	4000	4000	630
calcium (Ca)	µg/l	37000	17000	17000	47000
ijzer (Fe)	µg/l	3400	2500	2400	2300
kalium (K)	µg/l	17000	7600	7700	25000
magnesium (Mg)	µg/l	4500	2200	2100	6300
natrium (Na)	µg/l	140000	49000	49000	230000
borium (B)	µg/l	130	52	59	180
broom (Br)	µg/l	660	510	490	580
mangaan (Mn)	µg/l	170	110	110	200
zink (Zn)	µg/l	270	180	180	110
barium (Ba)	µg/l	69	160	110	27
koper (Cu)	µg/l	55	33	32	12
strontium (Sr)	µg/l	83	44	43	100
titaan (Ti)	µg/l	36	41	41	6



Figuur III-11-5 Resultaten deeltjestelling Trumma test

IV Retentie zouten/organica

Tabel IV-1 Voeding- en permeaatconcentratie van enkele zware metalen en PAKs in de CoRe-pilot (week 44)

		Voeding	Permeaat	Permeaat
		2-nov-21	2-nov-21	5-nov-21
Arseen	µg/L		< 4	< 4
Cadmium	µg/L		< 1	< 1
Chroom	µg/L		< 5	< 5
Koper	µg/L		< 5	< 5
Lood	µg/L		< 5	< 5
Nikkel	µg/L		< 5	< 5
Zink	µg/L		< 20	< 20
Kwik	µg/L		< 0,02	< 0,02
acenafteen	µg/l		< 0,05	< 0,05
acenaftyleen	µg/l		< 0,05	< 0,05
anthraceen	µg/l		< 0,01	< 0,01
benzo(a)anthraceen	µg/l		< 0,01	< 0,01
benzo(a)pyreen	µg/l		< 0,01	< 0,01
benzo(b)fluoranteen	µg/l		< 0,02	< 0,02
benzo(ghi)peryleen	µg/l		< 0,02	< 0,02
benzo(k)fluoranteen	µg/l		< 0,01	< 0,01
chryseen	µg/l		< 0,01	< 0,01
dibenz(a, h)anthraceen	µg/l		< 0,01	< 0,01
fenantreen	µg/l		< 0,01	0,01
fluoranteen	µg/l		< 0,01	< 0,01
fluoreen	µg/l		< 0,05	< 0,05
indeno(1,2,3- cd)pyreen	µg/l		< 0,02	< 0,02
naftaleen	µg/l		< 0,05	< 0,05
pyreen	µg/l		< 0,01	< 0,01
som PAK (EPA)	µg/l	0,25	0,24	0,25
som PAK (10)	µg/l	0,12	0,11	0,12

Tabel IV-2 Concentraties OMV,s in verschillende monsterpunten 2-11-2021

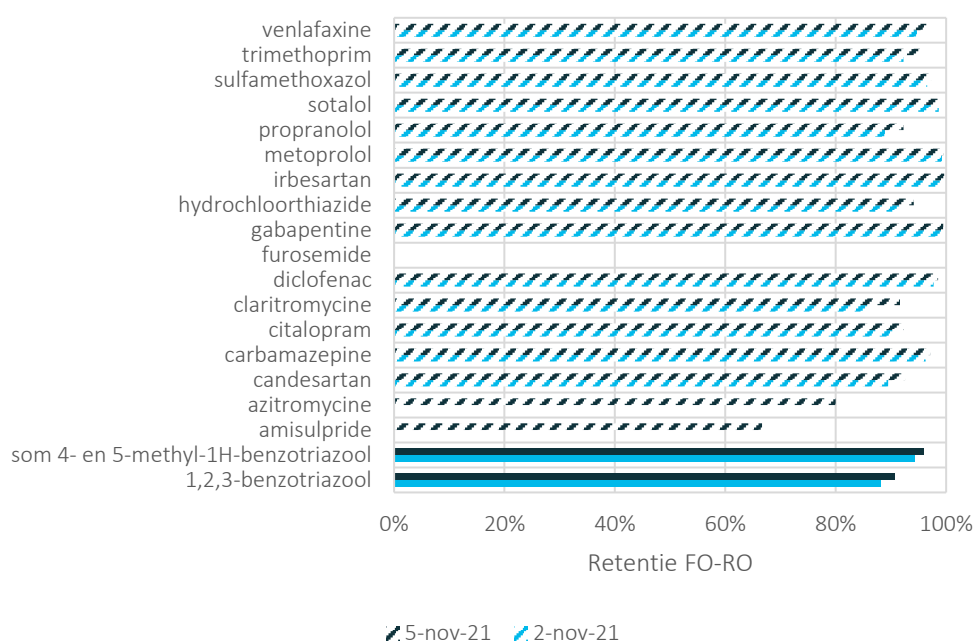
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
1,2,3-benzotriazool	ug/l	2,2	0,26	10	6,6	7,5	15	0,83
som 4- en 5-methyl- 1H-benzotriazool	ug/l	1,9	0,11	8,6	5,1	5,6	12	0,29
amisulpride	ug/l	<0.05	<0.01	0,08	0,06	0,03	0,07	<0.01
azitromycine	ug/l	<0.5	<0.1	1,7	1,4	0,3	0,9	<0.1
candesartan	ug/l	0,19	<0.02	0,89	0,48	0,07	0,19	<0.02
carbamazepine	ug/l	0,27	<0.01	1,2	0,83	0,36	0,73	<0.01
citalopram	ug/l	0,11	<0.01	0,26	0,24	0,05	0,09	<0.01
claritromycine	ug/l	0,07	<0.01	0,39	0,29	0,03	0,08	<0.01
diclofenac	ug/l	0,44	<0.01	1,4	1,1	0,27	0,64	<0.01
furosemide	ug/l	<1	<0.2	2,5	1,5	0,5	1,1	<0.2
gabapentine	ug/l	2,8	<0.02	14	8	3,3	7	<0.02
hydrochloorthiazide	ug/l	1,2	<0.1	5,8	3,7	1,8	3,6	<0.5
irbesartan	ug/l	1,8	<0.01	7,2	4,2	0,66	1,9	<0.01
metoprolol	ug/l	1,3	<0.01	5,7	4,1	3,1	6,4	<0.01
propranolol	ug/l	0,09	<0.01	0,25	0,18	0,09	<0.2	<0.01
sotalol	ug/l	0,76	<0.01	3,9	2,4	1,6	3,4	<0.01
sulfamethoxazol	ug/l	0,29	<0.01	1,5	0,9	0,45	1,1	<0.01
trimethoprim	ug/l	0,13	<0.01	0,53	0,45	0,25	0,47	<0.01
venlafaxine	ug/l	0,19	<0.01	0,82	0,67	0,31	0,53	<0.01

Tabel IV-3 Concentraties OMV,s in verschillende monsterpunten 5-11-2021

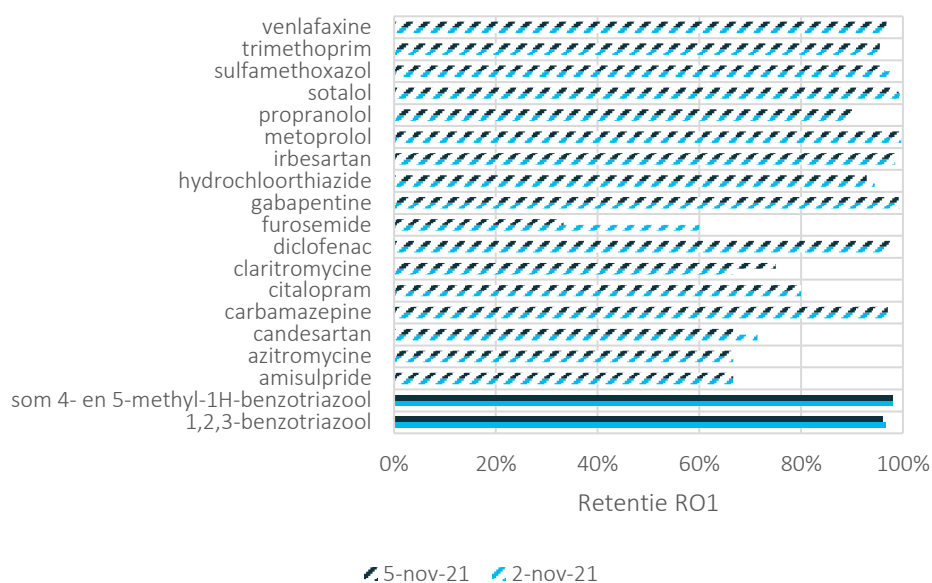
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
1,2,3-benzotriazool	ug/l	3,4	0,32	14	6,5	8	14	0,68
som 4- en 5-methyl- 1H-benzotriazool	ug/l	2,4	0,1	9,4	4,5	5,1	9,8	0,23
amisulpride	ug/l	0,03	<0.01	0,13	0,08	0,03	0,04	<0.01
azitromycine	ug/l	0,5	<0.1	3,1	1,2	0,3	<1	<0.1
candesartan	ug/l	0,27	<0.02	1,4	0,53	0,06	0,13	<0.02
carbamazepine	ug/l	0,35	<0.01	1,5	0,89	0,34	0,56	<0.01
citalopram	ug/l	0,13	<0.01	0,47	0,24	0,05	0,1	<0.01
claritromycine	ug/l	0,12	<0.01	0,48	0,25	0,04	<0.1	<0.01
diclofenac	ug/l	0,68	<0.01	2	1,4	0,42	0,65	<0.01
furosemide	ug/l	<2	<0.2	4,1	1,9	0,3	0,5	<0.2
gabapentine	ug/l	3,7	<0.02	18	7,4	2,5	3,4	<0.02
hydrochloorthiazide	ug/l	1,7	<0.1	8,3	3,9	1,4	2,1	<0.1
irbesartan	ug/l	2,7	<0.01	10	5,5	1,1	1,9	<0.01
metoprolol	ug/l	1,8	<0.01	8,1	4	2,3	4	0,02
propranolol	ug/l	0,13	<0.01	0,39	0,18	0,1	0,15	<0.01
sotalol	ug/l	1,1	<0.01	5,3	2,3	1,2	2	<0.01
sulfamethoxazol	ug/l	0,38	<0.01	2	0,92	0,28	0,62	<0.01
trimethoprim	ug/l	0,21	<0.01	0,81	0,38	0,22	0,33	<0.01
venlafaxine	ug/l	0,32	<0.01	1,4	0,67	0,31	0,51	<0.01

Tabel IV-4 Retenties OMV's week 44

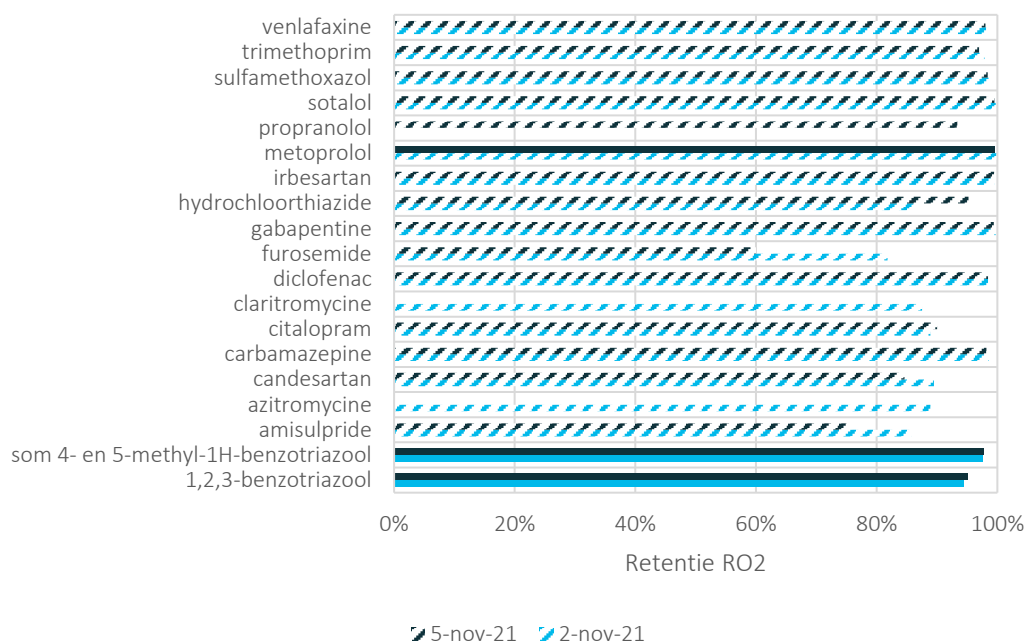
	2-11-21	5-11-21	2-11-21	5-11-21	2-11-21	5-11-21
	Retentie FO		Retentie RO1		Retentie RO2	
1,2,3-benzotriazool	88,2%	90,6%	96,5%	96,0%	94,5%	95,1%
som 4- en 5-methyl-1H-benzotriazool	94,2%	95,8%	98,0%	98,0%	97,6%	97,7%
amisulpride		66,7%	66,7%	66,7%	85,7%	75,0%
azitromycine		80,0%	66,7%	66,7%	88,9%	
candesartan	89,5%	92,6%	71,4%	66,7%	89,5%	84,6%
carbamazepine	96,3%	97,1%	97,2%	97,1%	98,6%	98,2%
citalopram	90,9%	92,3%	80,0%	80,0%	88,9%	90,0%
claritromycine	85,7%	91,7%	66,7%	75,0%	87,5%	
diclofenac	97,7%	98,5%	96,3%	97,6%	98,4%	98,5%
furosemide			60,0%	33,3%	81,8%	60,0%
gabapentine	99,3%	99,5%	99,4%	99,2%	99,7%	99,4%
hydrochloorthiazide	91,7%	94,1%	94,4%	92,9%	86,1%	95,2%
irbesartan	99,4%	99,6%	98,5%	99,1%	99,5%	99,5%
metoprolol	99,2%	99,4%	99,7%	99,6%	99,8%	99,5%
propranolol	88,9%	92,3%	88,9%	90,0%		93,3%
sotalol	98,7%	99,1%	99,4%	99,2%	99,7%	99,5%
sulfamethoxazol	96,6%	97,4%	97,8%	96,4%	99,1%	98,4%
trimethoprim	92,3%	95,2%	96,0%	95,5%	97,9%	97,0%
venlafaxine	94,7%	96,9%	96,8%	96,8%	98,1%	98,0%



Figuur IV-1 Retentie van OMV van FO-RO-membranen (week 44). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV11-2 Retentie van OMV van RO-membranen Draw 1 (week 44). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV-3 Retentie van OMV van RO-membranen Draw 2 (week 44). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.

Tabel IV-5 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 2-11-2021

Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	49	0,8	290	180	380	1000	1,8
Kalium	mg/L	30	0,8	150	97	160	380	3,5
Magnesium	mg/L	7,2	< 0,5	38	27	39	81	< 0,5
Natrium	mg/L	330	10	3900	2100	3900	13000	69
Silicium	µg/L	3900	190				21000	
Ammonium	mg N/L	32	2,3	180	120	180	470	9
Chloride	mg/L	410	16			8200	23000	
Totaal stikstof	mg N/L	32	2,2	180	120	180	470	11
totaal fosfaat	mg P/L	2,2	0,21	13	11	2,3	5,7	0,075
sulfaat	mg/L	100	< 1	510	260	96	350	4
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	64		300	60			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		170			
CZV	mg/L	200	< 10	900	540	230	630	27
CZV (na filtratie)	mg/L	100		700	480			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	85		99	69			

Tabel IV-6 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 3-11-2021

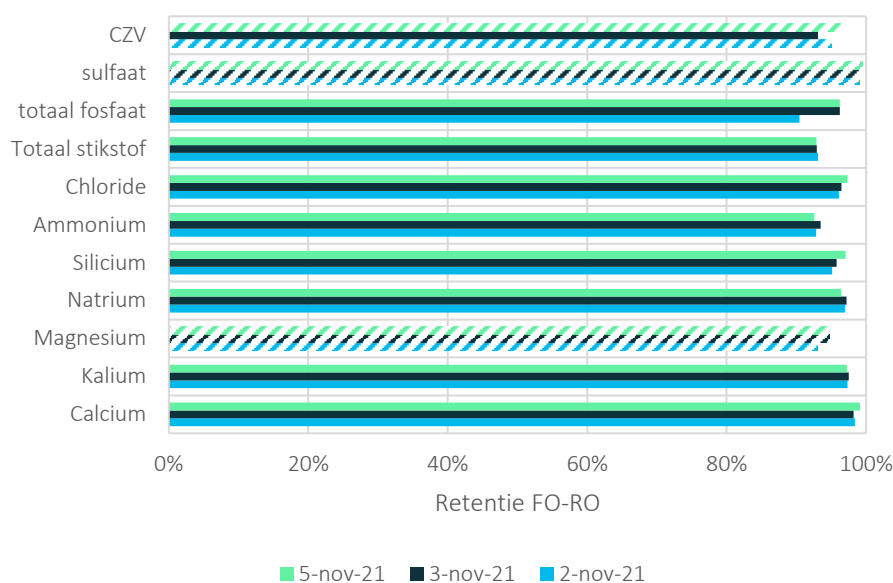
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	67	1,2	380	310	330	910	4,3
Kalium	mg/L	40	1	200	150	180	450	6,9
Magnesium	mg/L	9,4	< 0,5	52	40	31	73	< 0,5
Natrium	mg/L	430	12	5000	4000	5000	15000	130
Silicium	µg/L	5200	220					
Ammonium	mg N/L	46	3	2,8	2,9	200	2,7	17
Chloride	mg/L	510	18			9000	24000	
Totaal stikstof	mg N/L	41	2,9	230	180	210	520	15
totaal fosfaat	mg P/L	4,5	0,17	21	15	2,4	6,2	0,052
sulfaat	mg/L	110	< 1	570	350	82	310	< 1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	89		49	30			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		350			
CZV	mg/L	320	22	1520	1180	440	950	110
CZV (na filtratie)	mg/L	240		1330	990			
Onopgeloste bestanddelen	mg/L	74		120	92			

Tabel IV11-7 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 5-11-2021

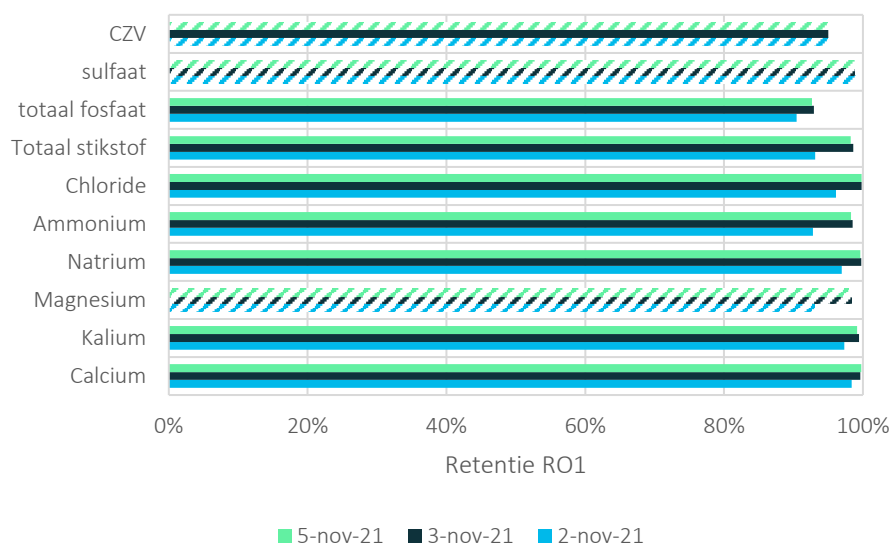
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	76	0,67	460	140	260	570	0,74
Kalium	mg/L	40	1,1	200	76	130	320	1,9
Magnesium	mg/L	9,3	< 0,5	52	21	24	41	< 0,5
Natrium	mg/L	420	15	5800	1700	3800	16000	45
Silicium	µg/L	5100	150				13000	
Ammonium	mg N/L	39	2,9	200	84	170	340	4,7
Chloride	mg/L	490	13			7600	24000	
Totaal stikstof	mg N/L	42	3	190	85	170	310	4,6
totaal fosfaat	mg P/L	2,9	0,11	12	8,5	1,5	2,8	0,077
sulfaat	mg/L	170	< 1	890	360	87	190	< 1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	120		63	85			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		180			
CZV	mg/L	270	< 10	1290	560	210	660	13
CZV (na filtratie)	mg/L	150		1090	460			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	100		60	38			

Tabel IV-8 Retenties CZV en ionen week 44

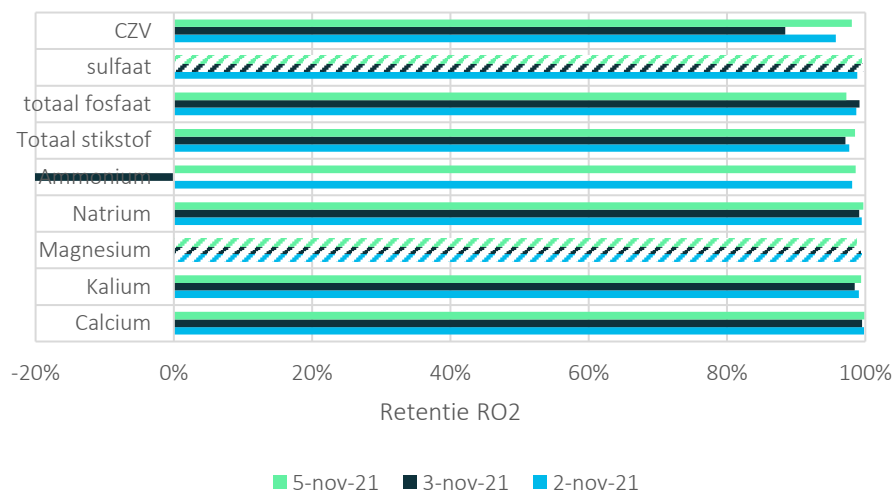
	2-11-21	3-11-21	5-11-21	2-11-21	3-11-21	5-11-21	2-11-21	3-11-21	5-11-21
	Retentie FO			Retentie RO1			Retentie RO2		
Calcium	98,4%	98,2%	99,1%	99,8%	99,6%	99,7%	99,8%	99,5%	99,9%
Kalium	97,3%	97,5%	97,3%	99,5%	99,4%	99,2%	99,1%	98,5%	99,4%
Magnesium	93,1%	94,7%	94,6%	98,7%	98,4%	97,9%	99,4%	99,3%	98,8%
Natrium	97,0%	97,2%	96,4%	99,7%	99,8%	99,6%	99,5%	99,1%	99,7%
Silicium	95,1%	95,8%	97,1%						
Ammonium	92,8%	93,5%	92,6%	98,7%	98,5%	98,3%	98,1%	-529,6%	98,6%
Chloride	96,1%	96,5%	97,3%	99,8%	99,8%	99,8%			
Totaal stikstof	93,1%	92,9%	92,9%	98,8%	98,6%	98,2%	97,7%	97,1%	98,5%
totaal fosfaat	90,5%	96,2%	96,2%	90,9%	92,9%	92,7%	98,7%	99,2%	97,3%
sulfaat	99,0%	99,1%	99,4%	99,0%	98,8%	98,9%	98,9%	99,7%	99,5%
CZV	95,0%	93,1%	96,3%	95,7%	95,0%	95,2%	95,7%	88,4%	98,0%



Figuur IV-4 De CZV en ionen retentie van FO-RO-membranen (week 44). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV-5 De CZV en ionen retentie van RO-membranen Draw 1 (week 44). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV-6 De CZV en ionen retentie van RO-membranen Draw 2 (week 44). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.

Tabel IV-9 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 16-11-2021

Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	70	0,81	170	210	310	530	1,6
Kalium	mg/L	44	0,97	93	110	170	450	3,1
Magnesium	mg/L	10	< 0,5	25	29	29	37	< 0,5
Natrium	mg/L	490	10	2100	2800	6200	15000	59
Silicium	µg/L	5000	< 30					
Ammonium	mg N/L	45	2,6	110	120	170	2,9	7,1
Chloride	mg/L	600	13			12000	24000	
Totaal stikstof	mg N/L	58	3,7	100	110	160	380	6,6
totaal fosfaat	mg P/L	5,8	0,12	9,4	11	1,9	2,7	0,063
sulfaat	mg/L	120	< 1	280	300	60	84	< 1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	100		66	53			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		380			
CZV	mg/L	300	< 10	750	920	240	360	13
CZV (na filtratie)	mg/L	240		640	840			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	56		65	75			

Tabel IV11-10 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 17-11-2021

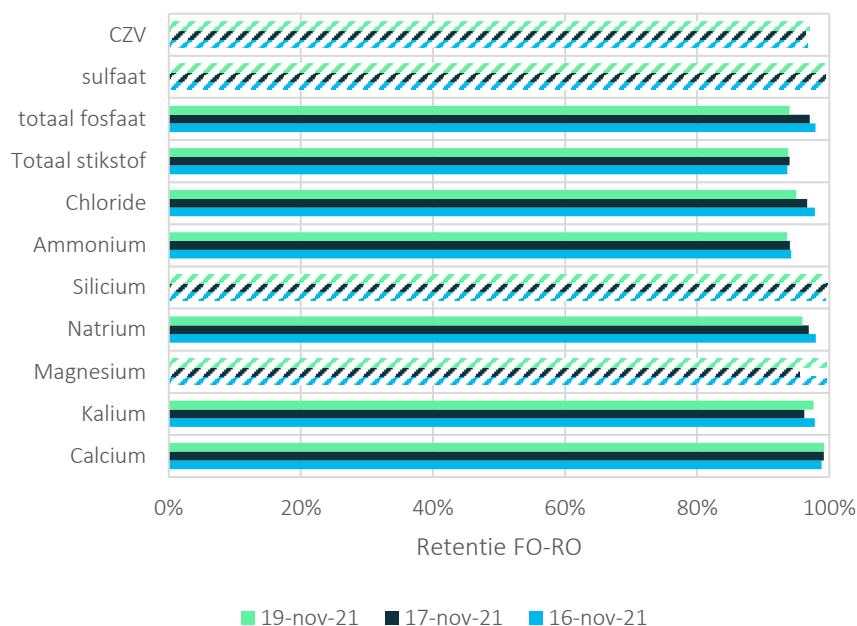
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	81	0,66	230	180	230	540	2,1
Kalium	mg/L	53	2	140	100	170	470	4,2
Magnesium	mg/L	11	< 0,5	33	25	20	39	< 0,5
Natrium	mg/L	610	19	3200	2300	4100	14000	73
Silicium	µg/L	12000	< 30					
Ammonium	mg N/L	47	2,8	130	120	190	2,9	7,6
Chloride	mg/L	720	24			8000	24000	
Totaal stikstof	mg N/L	45	2,7	140	120	180	360	6,7
totaal fosfaat	mg P/L	2,4	0,071	8,5	8,8	1	3,1	0,056
sulfaat	mg/L	190	< 1	530	370	54	96	< 1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	120		45	73			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		290			
CZV	mg/L	280	< 10	820	590	230	350	18
CZV (na filtratie)	mg/L	210		680	580			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	82		54	42			

Tabel IV-11 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 19-11-2021

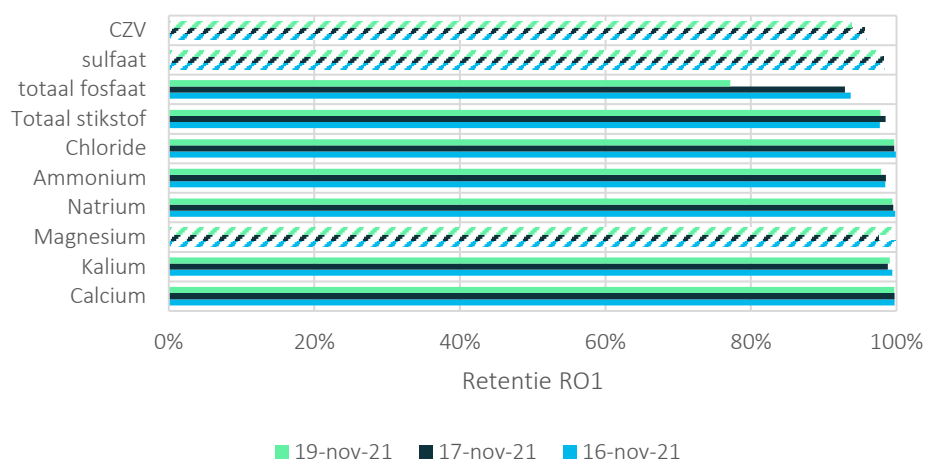
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	90	0,72	310	260	220	580	1,7
Kalium	mg/L	50	1,2	140	140	130	450	5,9
Magnesium	mg/L	12	< 0,5	40	34	19	37	< 0,5
Natrium	mg/L	490	20	3900	3600	3400	16000	120
Silicium	µg/L	5100	< 30					
Ammonium	mg N/L	50	3,2	150	160	150	2,6	14
Chloride	mg/L	520	26			8300	25000	
Totaal stikstof	mg N/L	50	3,1	150	160	140	420	14
totaal fosfaat	mg P/L	3,5	0,21	8,7	8,5	0,92	1,7	0,2
sulfaat	mg/L	190	1,2	590	370	47	100	1,3
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	120		49	44			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		290			
CZV	mg/L	340	< 10	880	620	160	330	39
CZV (na filtratie)	mg/L	270		660	580			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	63		87	47			

Tabel IV-12 Retenties CZV en ionen week 46

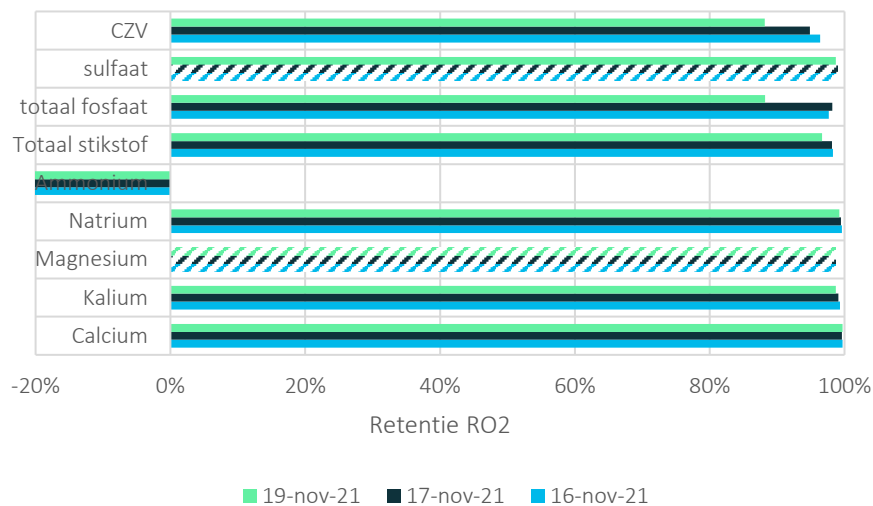
	16-11-21	17-11-21	19-11-21	16-11-21	17-11-21	19-11-21	16-11-21	17-11-21	19-11-21
	Retentie FO			Retentie RO1			Retentie RO2		
Calcium	98,8%	99,2%	99,2%	99,7%	99,7%	99,7%	99,7%	99,6%	99,7%
Kalium	97,8%	96,2%	97,6%	99,4%	98,8%	99,1%	99,3%	99,1%	98,7%
Magnesium	99,5%	95,5%	99,6%	99,8%	97,5%	99,7%	98,6%	98,7%	98,6%
Natrium	98,0%	96,9%	95,9%	99,8%	99,5%	99,4%	99,6%	99,5%	99,3%
Silicium	99,4%	99,8%	99,4%						
Ammonium	94,2%	94,0%	93,6%	98,5%	98,5%	97,9%	-144,8%	-162,1%	-438,5%
Chloride	97,8%	96,7%	95,0%	99,9%	99,7%	99,7%			
Totaal stikstof	93,6%	94,0%	93,8%	97,7%	98,5%	97,8%	98,3%	98,1%	96,7%
totaal fosfaat	97,9%	97,0%	94,0%	93,7%	92,9%	77,2%	97,7%	98,2%	88,2%
sulfaat	99,2%	99,5%	99,4%	98,3%	98,1%	97,4%	98,8%	99,0%	98,7%
CZV	96,7%	96,4%	97,1%	95,8%	95,7%	93,8%	96,4%	94,9%	88,2%



Figuur IV-7 De CZV en ionen retentie van FO-RO-membranen (week 46). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV-8 De CZV en ionen retentie van RO-membranen Draw 1 (week 46). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV-9 De CZV en ionen retentie van RO-membranen Draw 2 (week 46). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.

Tabel IV-13 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 23-11-2021

Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	73	< 0,5	170	100	210	550	2
Kalium	mg/L	40	1,1	75	53	150	450	3,5
Magnesium	mg/L	10	<0,5	25	15	17	43	< 0,5
Natrium	mg/L	250	14	1800	830	3600	16000	72
Silicium	µg/L	5100	< 30					
Ammonium	mg N/L	44	2,8	84	58	180	2,9	8,7
Chloride	mg/L	260	23			6800	24000	
Totaal stikstof	mg N/L	44	3,1	100	58	170	440	9,6
totaal fosfaat	mg P/L	6,7	< 0,05	15	8,8	0,69	2	< 0,05
sulfaat	mg/L	120	< 1	250	190	8,1	120	< 1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	90		40	42			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		170			
CZV	mg/L	250	< 10	700	430	180	290	14
CZV (na filtratie)	mg/L	180		560	400			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	78		110	56			

Tabel IV-14 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 24-11-2021

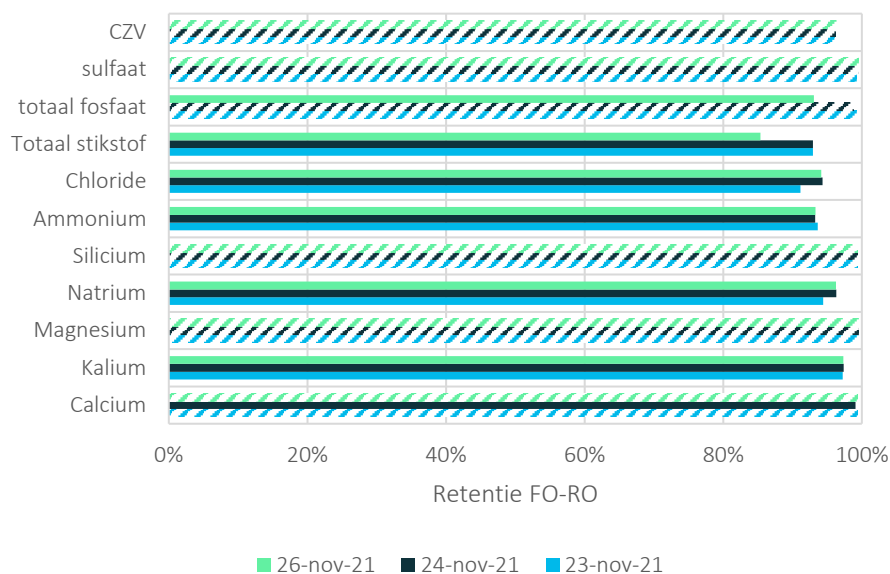
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	76	0,71	160	97	170	490	1,7
Kalium	mg/L	42	1,1	81	50	140	350	4,6
Magnesium	mg/L	11	<0,5	22	14	14	41	< 0,5
Natrium	mg/L	460	17	2200	1100	4400	14000	97
Silicium	µg/L	4600	< 30					
Ammonium	mg N/L	43	2,9	94	55	190	470	9,7
Chloride	mg/L	510	29			8000	24000	
Totaal stikstof	mg N/L	41	2,9	99	50	230	470	10
totaal fosfaat	mg P/L	4,4	< 0,05	9	5,3	1	2,6	< 0,05
sulfaat	mg/L	210	< 1	380	290	25	140	< 1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	95		34	56			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		110			
CZV	mg/L	260	< 10	570	340	160	430	< 10
CZV (na filtratie)	mg/L	200		520	240			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	98		76	44			

Tabel IV-15 Concentraties CZV en ionen verschillende monsterpunten 26-11-2021

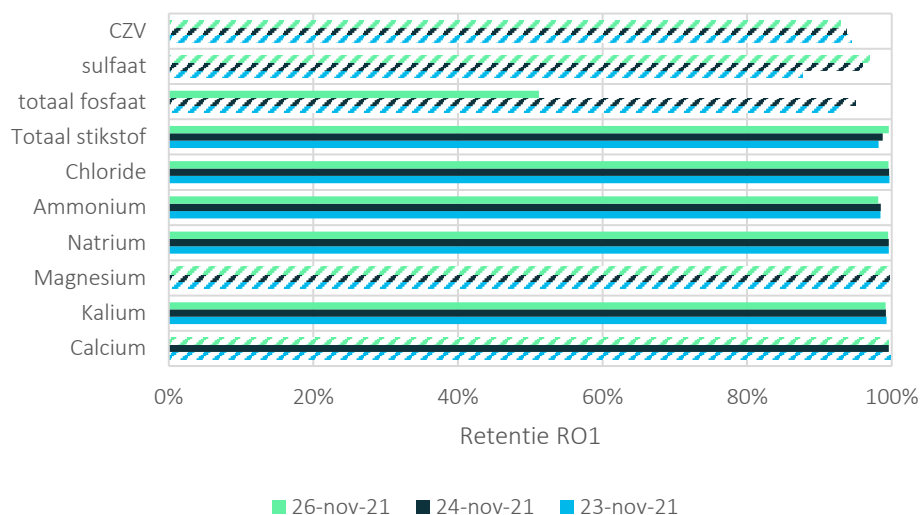
Parameter	eenheid	monsterpunten						
		Voeding (RWZI inf na Trumma)	Verzameld Permeaat	verzameld Concentraat	V400 (concentraat FO1)	V304 (Voeding RO1)	V438 (Voeding RO2)	V639 (permeaat RO2)
Calcium	mg/L	79	< 0,5	140	120	120	590	2,4
Kalium	mg/L	45	1,2	75	62	140	400	3,9
Magnesium	mg/L	12	< 0,5	20	17	11	50	< 0,5
Natrium	mg/L	560	21	1900	1400	4100	15000	99
Silicium	µg/L	4800	< 30					
Ammonium	mg N/L	45	3	77	66	160	440	8,1
Chloride	mg/L	630	37			7900	25000	
Totaal stikstof	mg N/L	41	6	120	78	1550	410	8,7
totaal fosfaat	mg P/L	2,9	0,2	5,8	4,5	0,41	2,4	0,19
sulfaat	mg/L	200	< 1	340	300	32	150	<1
Totaal Anorganisch Koolstof (TIC)	mg C/L	120		29	31			
Totaal Organisch Koolstof (TOC)	mg C/L		< 5		110			
CZV	mg/L	280	< 10	450	460	140	320	11
CZV (na filtratie)	mg/L	240		440	440			
Onopgeloste bestandsdelen	mg/L	72		34	36			

Tabel IV-16 Retenties CZV en ionen week 47

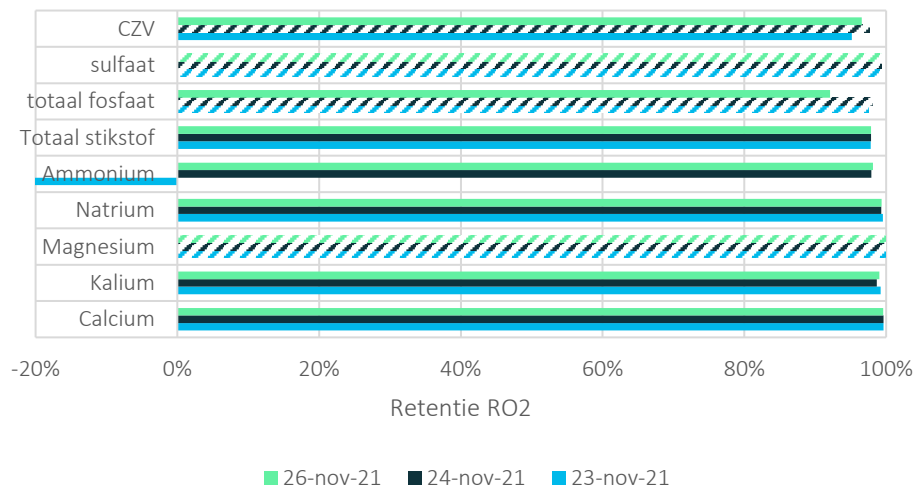
	23-11-21	24-11-21	26-11-21	23-11-21	24-11-21	26-11-21	23-11-21	24-11-21	26-11-21
	Retentie FO			Retentie RO1			Retentie RO2		
Calcium	99,3%	99,1%	99,4%	99,8%	99,6%	99,6%	99,6%	99,7%	99,6%
Kalium	97,3%	97,4%	97,3%	99,3%	99,2%	99,1%	99,2%	98,7%	99,0%
Magnesium	99,5%	99,5%	99,6%	99,7%	99,6%	99,5%	99,9%	99,9%	99,9%
Natrium	94,4%	96,3%	96,3%	99,6%	99,6%	99,5%	99,6%	99,3%	99,3%
Silicium	99,4%	99,3%	99,4%						
Ammonium	93,6%	93,3%	93,3%	98,4%	98,5%	98,1%	-200,0%	97,9%	98,2%
Chloride	91,2%	94,3%	94,1%	99,7%	99,6%	99,5%			
Totaal stikstof	93,0%	92,9%	85,4%	98,2%	98,7%	99,6%	97,8%	97,9%	97,9%
totaal fosfaat	99,3%	98,9%	93,1%	92,8%	95,0%	51,2%	97,5%	98,1%	92,1%
sulfaat	99,2%	99,5%	99,5%	87,7%	96,0%	96,9%	99,2%	99,3%	99,3%
CZV	96,0%	96,2%	96,4%	94,4%	93,8%	92,9%	95,2%	97,7%	96,6%



Figuur IV-10 De CZV en ionen retentie van FO-RO-membranen (week 47). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV-11 De CZV en ionen retentie van RO-membranen Draw 1 (week 47). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.



Figuur IV-12 De CZV en ionen retentie van RO-membranen Draw 2 (week 47). Gearceerde balken retentie > aangegeven percentage.

V Kengetallen CO₂-footprint

Voor de berekening van de CO₂-footprint zijn onderstaande kengetallen gebruikt.

Parameter	kg CO ₂ /eenheid	Eenheid	Bron ¹¹
Elektriciteit	0,526	kWh	STOWA
PE	3,90	kg	STOWA
FeCl ₃ 100%	0,38	kg	STOWA
base CIP	0,20	kg	berekend o.b.v. SDS en STOWA
zuur CIP	0,50	kg	berekend o.b.v. SDS en STOWA
NaCl 100%	0,19	kg	STOWA
CaCO ₃ 100%	0,25	kg	ingeschat o.b.v. STOWA
MgCl ₂ 100%	0,12	kg	STOWA
NaOH 100%	1,33	kg	STOWA
HNO ₃ 100%	0,10	kg	ingeschat o.b.v. STOWA
Diesel	2,21	kg	STOWA
Droging en verbranding van ontwaterd slib	0,05	kg	STOWA

¹¹ Bron 'STOWA' refereert naar de kengetallen die STOWA voorschrijft voor het Innovatieprogramma Medicijnresten Verwijdering waarvoor een standard model (*Model CO₂-footprint RWZI's micro's 100000 beveiligd versie 5*) is opgezet gebaseerd op eerdere STOWA studies.

'SDS' refereert naar de Safety Data Sheet, hierin staat de compositie van een product beschreven. O.b.v. de productcompositie is met de STOWA kengetallen een CO₂-footprint berekend