



KWR 2019.056 | Mei 2019

Forward osmose in de glastuinbouw

Voorkomen en bestrijden emissies kasteelten, WP2

Forward osmose in de glastuinbouw

Vorkomen en bestrijden emissies kasteelten,
WP2

KWR 2019.056 | Mei 2019

Opdrachtnummer

401419

Projectmanager

Luc Palmen

Opdrachtgever

Kwaliteitsborger(s)

Emile Cornelissen

Auteur(s)

Nienke Koeman, Emile Cornelissen (KWR)

Jim van Ruijven (WUR)

Verzonden naar

projectteam

Jaar van publicatie

2019

Meer informatie

Nienke Koeman
E nienke.koeman@kwrwater.nl

Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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

The logo for KWR (Knowledge and Water Research Institute) features the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font. The 'K' and 'W' are connected, and the 'R' is slightly separated. The letters are blue with a white outline.

KWR 2019.056 | Mei 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

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

Samenvatting

In het project 'Voorkomen en bestrijden emissies kasteelten' is in vier werkpakketten onderzoek gedaan naar het toewerken naar nul-emissie door telers. Dit rapport gaat in op het toepassen van forward osmose (FO) in de glastuinbouw als stap in weg naar een emissieloze kas. Ten eerste om de efficiëntie van zuivering te vergroten (door terugbrengen van omvang van spui- en waterstromen), en ten tweede om aanvullende gietwaterbronnen beschikbaar te maken via een duurzame ontzoutingsmethodiek.

FO is een innovatieve membraan technologie die nog niet wordt toegepast in de glastuinbouw. FO is het transport van water van een verdunde naar een geconcentreerde oplossing. Naarmate het concentratieverschil groter is, zal het transport van water sneller gaan. Het proces stopt wanneer het concentratieverschil is verdwenen. Wanneer het membraan niet alleen semi-permeabel is voor water maar ook ionen doorlaat, zal er ook zouttransport plaatsvinden van osmotische oplossing naar feed. Dit is ongewenst omdat het de drijvende kracht van het watertransport vermindert. Dit zouttransport wordt ook wel zoutlek genoemd. Vervuiling van het membraan kan beide processen vertragen doordat de doorlaatbaarheid verminderd wordt.

Uit een inventarisatie van beschikbare waterbronnen bleek dat het gebruik van aanvullende waterbronnen zoals oppervlaktewater of grondwater het beste ingezet kunnen worden als voedingswater (feed) voor forward osmose, terwijl de geconcentreerde nutriëntenoplossing het beste gebruikt kan worden als osmotische oplossing.

De grootte van een FO systeem is gemodelleerd door gebruik te maken van drie modellen: Ten eerste een massabalansmodel gebaseerd op meestroom. Zoutlek wordt hierin meegenomen. Ten tweede een analytisch model wat zowel meestroom als tegenstroom configuratie kan berekenen maar geen zoutlek meeneemt. En als derde een model genaamd Forward Osmose System Analysis (FOSA) wat het systeem in meestroom berekent en ook een zoutlek meeneemt. Er zijn twee scenarios berekend: ten eerste een bedrijf van 30ha waarbij het doel is om de spuistroom 80% in te dikken. Ten tweede een bedrijf van 30ha waarbij het doel was om 17 m³/uur verdunde voedingsoplossing maken vanuit grondwater. Het berekende aantal modules staat in Tabel 1-1. Een indikking van 80% bleek niet mogelijk maar 75% wel. Voor het indikken van een spuistroom van 1000 m³/ha/jr bij een bedrijf van 30ha met 75% water recovery 5 modules nodig zullen zijn van 8 inch.

Tabel 1-1: aantal benodigde modules bij spuiwaterbehandeling van een bedrijf, berekend met 3 modules en 1 geëxtrapoleerd

Meestroom met zoutlek (massabalansmodel)	8 modules
Meestroom zonder zoutlek (analytisch model)	5 modules
Tegenstroom zonder zoutlek (analytisch model)	3 modules
Tegenstroom met zoutlek (geëxtrapoleerd massabalans model)	5 modules

Wanneer brak grondwater gebruikt wordt voor de bereiding van gietwater, kan geen voldoende groot debiet verkregen worden om aan de vraag te voldoen. Er kan echter wel 6,5 m³/uur geproduceerd worden, wat dan verder verdund kan worden met een andere waterbron zoals regenwater. Dit is ongeveer 20% van de waterbehoefte van 10.000 m³/ha/jaar voor een bedrijf van 30ha.

U-buis testen met geconcentreerde nutriëntenoplossing als osmotische oplossing, en demi-water of brak water als voedingsoplossing lieten een waterflux zien van 13,8 l/m²/uur bij een osmotische drukverschil van 23,9 bar, wat neerkomt op 6.7 LMH. De aanwezige ionen in de osmotische oplossing lekten naar de voedingskant. Voor nitraat was het zoutlek bij 23,9 bar osmotisch drukverschil 327 mmol/m²/uur. Het tweewaardige calcium lekte slechts 4,5 mmol/m²/h. Een zoutlek is ongewenst aangezien het een verlies van nutriënten betekent die voor de plant bedoeld zijn. Dit geeft extra kosten voor de teler. Er werd transport gemeten van 4 van de 11 gedoseerde actieve stoffen uit gewasbeschermingsmiddelen, van de feed-kant door het membraan naar de geconcentreerde nutriëntenoplossing. Dit waren iprodion, boscalid, spinosad en pymetrozine.

Experimenten met pressure assisted osmose zijn ook gedaan. Hierbij is onderzocht of het toevoegen van een hydraulische druk aan de voedingszijde van het membraan een effect heeft op het zoutlek. Hoewel het gebruikte membraan geen osmotisch transport van water liet zijn bij de gebruikte hydraulische drukken (0 - 2 bar), werd het zouttransport wel verminderd door de hydraulische druk. Verdere ontwikkeling van pressure assisted osmosis is nodig om te onderzoeken of bij het gebruik van een FO membraan dit ook gevonden wordt.

De technische economische analyse liet zien dat voor een bedrijf waarbij gedurende 6 maanden per jaar 20% van het gietwater wordt bereid uit een aanvullende bron, en ook nog spuiwater wordt behandeld, financiële ruimte is voor het vervangen van de RO installatie door een FO installatie. Door het vervangen van de RO installatie door een FO installatie, en door het vervangen van een spuiwaterbehandeling met een grote capaciteit, door een systeem met een kleine capaciteit, ontstaat er financiële ruimte om een FO installatie te gebruiken. Wanneer een bedrijf alleen spuiwaterbehandeling toepast, en geen aanvullende waterbron gebruikt, is een FO installatie voor een klein bedrijf niet aantrekkelijk, maar voor een groot bedrijf kan het een besparing opleveren ten opzichte van de huidige kosten voor spuiwaterbehandeling. De financiële ruimte en kosten voor 6 bedrijfssituaties staan weergegeven in Tabel 1-2

Tabel 1-2: financiële ruimte en kosten van een FO systeem voor 6 bedrijfssituaties.

Bedrijf	Financiële ruimte	Kosten FO
	€/m ³	€/m ³
5 ha, gietwaterbereiding EN spuiwaterbehandeling	0,88	0,40
5 ha, gietwaterbereiding GEEN spuiwaterbehandeling	0,80	0,30
30 ha, gietwaterbereiding EN spuiwaterbehandeling	0,76	0,35
30 ha, gietwaterbereiding GEEN spuiwaterbehandeling	0,60	0,30
5 ha spuiwaterbehandeling	0,15	0,20
30 ha spuiwaterbehandeling	0,31	0,20

Inhoud

1	Inleiding	5
1.1	Voorkomen en bestrijden emissies kasteelten	5
1.2	Forward osmose in de glastuinbouw	6
2	Inventarisatie waterstromen	11
3	Modelleren van FO voor de glastuinbouw	13
4	Forward Osmose experimenten	19
4.1	Waterflux	20
4.2	Zouttransport	21
4.3	Gebruik andere oplossing	23
4.4	Transport van gewasbeschermingsmiddelen (GBM)	24
4.5	Schoonwater flux	25
5	Pilot experimenten	27
5.1	Pressure assisted osmosis	27
5.2	Materiaal en methode	27
5.3	Berekeningen	28
5.4	Resultaten	29
6	Technisch economische evaluatie	32
6.1	Technische evaluatie	32
6.2	Economische evaluatie	32
7	Conclusies en aanbevelingen	39
8	Referenties	41
	Bijlage I Proces Flow diagram pilot	43
	Process Flow Diagram van Pressure Assisted Osmosis pilot	43

1 Inleiding

1.1 Voorkomen en bestrijden emissies kasteelten

Naar aanleiding van de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) heeft de overheid met de glastuinbouwsector afgesproken naar een (nagenoeg) nul-emissie voor nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen (GBM) in 2027 toe te werken. Hiervoor zijn sinds 2013 stikstof-emissionormen (substraatteelten) en verbruiksnormen (grondgebonden teelten) afgesproken, waarmee in principe ook de emissies van GBM worden teruggedrongen. Voor GBM is echter een snellere afname van het aantal overschrijdingen van de waterkwaliteitsnormen noodzakelijk (in 2018 75% en in 2023 99,7% minder emissies; *(Gezonde Groei, Duurzame Oogst, Tweede nota duurzame gewasbescherming periode 2013 tot 2023.*, mei 2013)) Dit is niet alleen een voorwaarde om verdere inkrimping van het middelenpakket te voorkomen, maar ook om maatschappelijk draagvlak voor kasteelten en hun 'license to operate' te behouden.

In 2016 volgde hieruit dat overheid en sector overeenkwamen dat alle tuinbouwbedrijven met teelt(en) onder glas die drain- of drainagewater lozen, verplicht worden zuiveringstechnieken te installeren per 2018 waarmee de GBM voor tenminste 95% kunnen worden verwijderd. Dit geldt ook voor bedrijven die bijvoorbeeld container- of trayvelden combineren met een kasteelt (ondersteunend glas), indien het overtollige drain(age)water uit de kasteelt niet doelmatig kan worden toegepast op eigen perceel. Er is ook een mogelijkheid om de zuivering gezamenlijk uit te voeren door een collectief van bedrijven, met maximaal uitstel tot 2021. Door deze aanstaande zuiveringsverplichting zijn telers zich (al dan niet als collectief) op verschillende zuiveringsmogelijkheden aan het oriënteren, en krijgen substraatbedrijven in toenemende mate interesse in (meer) gesloten telen.

1.1.1 Onderzoek tot nu toe en kennisvragen

Het onderzoek heeft samen met de sector de afgelopen jaren met twee verschillende sporen op deze ontwikkelingen ingespeeld: 1) ontwikkeling van zuiveringstechnieken en -strategieën (met een bijbehorende beoordelingsprocedure), en 2) ontwikkeling van innovaties en strategieën om minder of niet meer te lozen. Glastuinbouwbedrijven en toeleveranciers lopen echter tegen een aantal belangrijke kennisvragen en knelpunten aan, die implementatie van deze oplossingen en de noodzakelijke verbetering van de oppervlaktewaterkwaliteit in de weg staan.

De belangrijkste kennisvragen bij het eerste onderzoekspoor hebben betrekking op waterstromen die qua samenstelling en volume sterk afwijken van het Standaard Water (water representatief voor afvalwater van substraat- en grondgebonden teelt) waarmee de effectiviteit van zuiveringstechnieken is beoordeeld. Dit kan grote en mogelijk negatieve gevolgen hebben voor het zuiveringsresultaat. Dit speelt bijvoorbeeld rond de teeltwisseling als het water verontreinigd wordt met ontsmettings- en reinigingsmiddelen, bij lekwater, bij collectieven die een gemeenschappelijke zuivering willen realiseren, en bij bedrijven met ondersteunend glas vanwege vermenging van waterstromen uit kasteelt en openteelt.

Met betrekking tot het tweede onderzoekspoor, waarbij naar een emissieloze teelt wordt toegewerkt, zijn knelpunten rond natrium en andere ongewenste stoffen die

kunnen ophopen in het recirculatiewater bij (langdurig) recirculeren nog niet opgelost. Natriumgehalten boven gewas-afhankelijke grenswaarden leiden tot sterke productieafname en kwaliteitsverlies en zullen door telers worden voorkomen door drainwater te verversen (lozen). Daarnaast kunnen door het gebruik van bijvoorbeeld ontsmettingsmiddelen ook ballaststoffen en andere ongewenste stoffen ophopen en reden tot lozen zijn, terwijl het gebruik van ontsmettingsmiddelen juist belangrijk is in recirculerende systemen om het verspreiden van ziekten te voorkomen.

1.1.2 Doel

De hierboven genoemde kennisvragen zijn in het project 'Voorkomen en bestrijden emissies kasteelten' opgepakt door in 4 verschillende werkpakketten de volgende innovaties en wetenschappelijke inzichten te ontwikkelen:

- 1) Concepten voor het optimaal beheren van waterstromen, en robuuste zuiverings- en feedbackprocedures voor het vergroten van de betrouwbaarheid van GBM-zuiveringstechnologie voor tuinbouwsituaties met afwijkende watersamenstelling;
- 2) Ontwikkeling van forward osmose voor de tuinbouw als alternatieve duurzame ontzoutingstechniek, en om de omvang van spui- en waterstromen terug te brengen;
- 3) Nieuwe kennis over de natriumopname en -gevoeligheid van kasteelten en hoe deze is te beïnvloeden door innovatieve teeltstrategieën;
- 4) Inzicht in de effecten van het gebruik van ontsmettingsproducten op de waterkwaliteit in recirculerende teelten.

Het overkoepelende doel is om oplossingen te ontwikkelen waarmee de tuinbouwsector kan voldoen aan de noodzaak om de emissies van gewasbeschermingsmiddelen (en nutriënten) naar het oppervlaktewater te minimaliseren, om daarmee maatschappelijk draagvlak en license to operate te behouden. Het project Voorkomen en bestrijden emissies kasteelten heeft gelopen in 2017 en 2018. Dit rapport bevat de resultaten van het tweede werkpakket waarbij de toepassing van forward osmose in de glastuinbouw is onderzocht. De resultaten van andere werkpakketten zijn beschreven in andere rapporten.

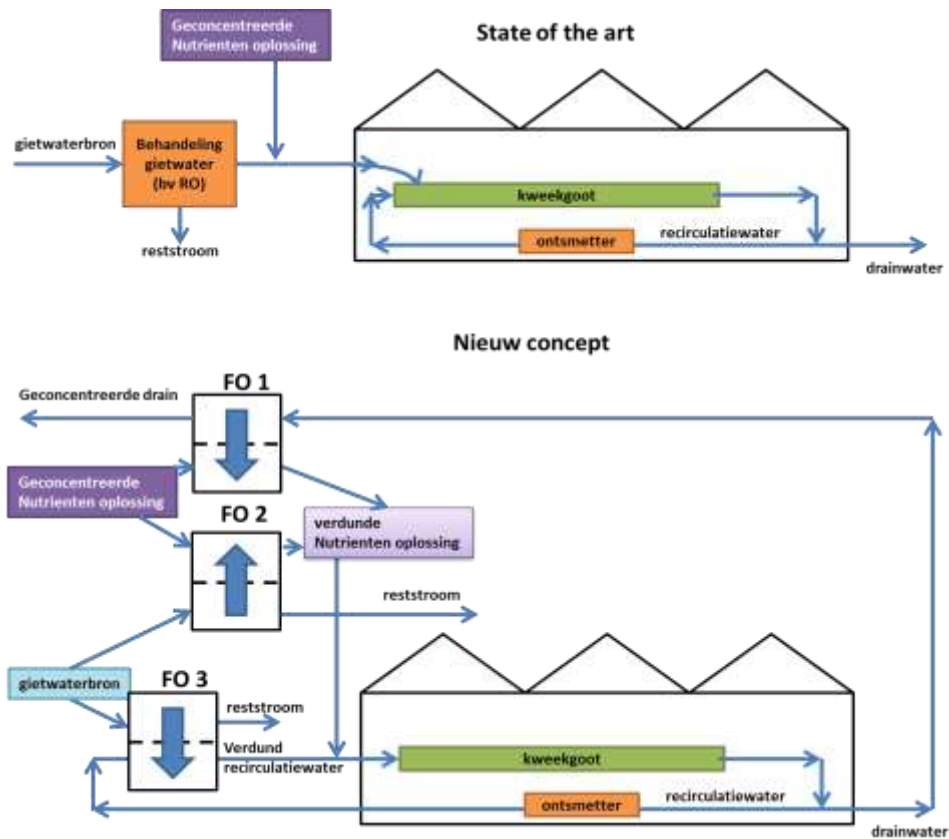
1.2 Forward osmose in de glastuinbouw

Doel van dit werkpakket is de toepassing van forward osmose in de tuinbouw te onderzoeken. Ten eerste om de efficiëntie van zuivering te vergroten (door terugbrengen van omvang van spui- en waterstromen), en ten tweede om aanvullende gietwaterbronnen beschikbaar te maken via een duurzame ontzoutingsmethodiek.

Forward osmosis (FO) is een innovatieve technologie die voor verschillende toepassingsgebieden kan worden ingezet. In de tuinbouwsector is deze technologie nog niet bekend. Onderzoek en commercialisatie van FO heeft zich in eerste instantie vooral gericht op zeewaterontzouting en daar zijn nu 2 full scale applicaties in gebruik (Gibraltar, Oman; Modern Water, 2014). Daarnaast lopen veel pilot studies in de voedingsmiddelenindustrie maar hier wordt de techniek nog niet commercieel toegepast. Op laboratoriumschaal wordt FO voor uiteenlopende doelstellingen getest, en sinds 2017 werden er verschillende studies gedaan op dit gebied (fertilizer drawn forward osmosis (Awad et al., 2019; Chekli et al., 2017; Kim, Phuntsho, Lotfi, & Shon,

2015; Phuntsho et al., 2016). Belangrijkste punten die commercialisatie op dit moment in de weg staan zijn het ontbreken van lange termijn praktijkstudies.

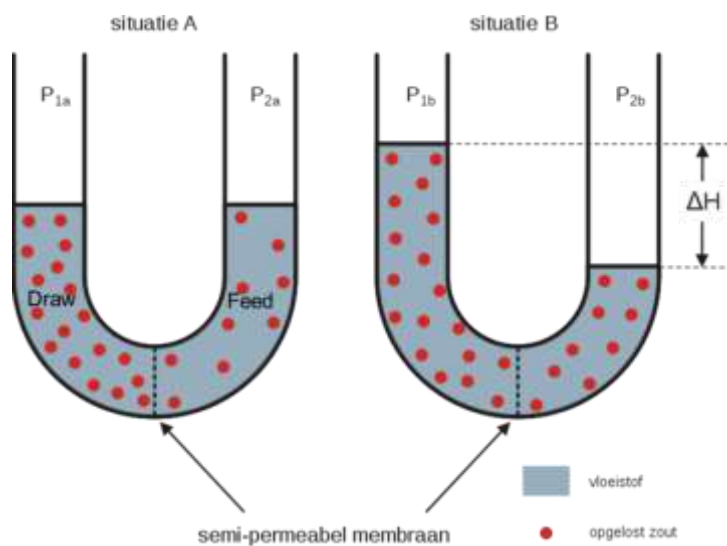
Osmotisch gedreven membraan processen zoals FO zijn zeer innovatief en staan de afgelopen jaren sterk in de belangstelling. De mogelijkheden van deze membraanprocessen zijn zeer divers, uiteenlopend van osmotische verdunning en concentratie, hoge kwaliteit water productie tot energie opwekking. Het voordeel is dat FO in vergelijking met een veelgebruikte technologie zoals omgekeerde osmose (RO) praktisch geen energie kost ((Cath, Childress, & Elimelech, 2006)). Met name twee toepassings-mogelijkheden binnen de watercyclus van de (glas)tuinbouw (zie Figuur 1-1) lijken perspectief te bieden: (1) indikken van spuistroom of collectieve waterstroom, die eventueel gezuiverd moet worden (FO1 in Figuur 1-1), en (2) benutten van alternatieve gietwaterbronnen (FO2 en FO3 in Figuur 1-1).



Figuur 1-1: Huidige situatie met ontzouting gietwaterbronnen en het in dit project te ontwikkelen nieuw concept waarin forward osmose op drie verschillende wijzen toegepast kan worden op een tuinbouwbedrijf.

Forward osmose is het transport van water van een verdunde naar een geconcentreerde oplossing. De geconcentreerde oplossing wordt 'osmotische oplossing' genoemd, de verdunde oplossing 'feed', zie Figuur 1-2. Naarmate het concentratieverschil groter is, zal het transport van water sneller gaan. Het proces stopt wanneer het concentratieverschil is verdwenen. Wanneer het membraan niet alleen semi-permeabel is voor water maar ook ionen doorlaat, zal er ook zouttransport plaatsvinden van

osmotische oplossing naar feed. Dit is ongewenst omdat het de drijvende kracht van het watertransport vermindert. Dit zouttransport wordt ook wel zoutlek genoemd. Vervuiling van het membraan kan beide processen vertragen doordat de doorlaatbaarheid verminderd wordt.



Figuur 1-2: Schematische weergave van forward osmose. In situatie A is een concentratieverschil, en daarmee een osmotisch drukverschil. Water wordt getransporteerd van feed naar osmotische oplossing. In situatie B is zoveel water getransporteerd dat het osmotisch drukverschil is opgeheven en het proces van transport stopt.

1.2.1 Aanpak

Er zijn twee toepassingsmogelijkheden onderzocht:

- (1) Is FO toe te passen voor het indikken van de spuiwaterstroom, met als osmotische oplossing de geconcentreerde nutriëntenoplossingen? (Figuur 1-1, FO1)
Het principe is dat het zuivere water uit de spuiwaterstroom (of collectieve waterstroom) door FO wordt teruggewonnen met behulp van de geconcentreerde nutriëntenoplossing, en dat tijdens dit proces de voor het gewas benodigde voedingsoplossing wordt gemaakt. De spuiwaterstroom wordt daarbij ingedikt en kan beter en goedkoper verwerkt worden. Oxidatieve technieken die nu hiervoor gebruikt worden, werken vaak effectiever bij een grotere concentratie. Een kleinere installatie is over het algemeen goedkoper. Daarnaast kan een hoeveelheid hoogwaardig (natriumarm) water worden uitgespaard omdat het water dat uit het spuiwater wordt onttrokken de geconcentreerde nutriënt-oplossing zal verdunnen en opnieuw wordt gebruikt in de kas.
- (2) Kan oppervlaktewater, leidingwater of grondwater als secundaire gietwaterbron worden benut?
Hierbij wordt de geconcentreerde nutriëntenoplossingen (Figuur 1-1, FO2) of het recirculatiewater (Figuur 1-1, FO3) gebruikt als osmotische oplossing om water te onttrekken aan een gietwaterbron. Oppervlaktewater bevat een hoge concentratie aan zouten (<6 mmol/l Cl in het Westland; (Appelman et al., 2014)) waardoor het

niet geschikt is voor teelten die (nagenoeg) volledig recirculeren (Beerling, Blok, Van Der Maas, & Van Os, 2014). Recirculatiewater heeft een hogere zoutconcentratie waardoor het als osmotische tegenoplossing gebruikt kan worden in FO processen. Alternatief is dat ook hiervoor de geconcentreerde voedingsoplossing wordt gebruikt. Door een FO membraan te plaatsen tussen het oppervlaktewater en recirculatiewater, gaat gezuiverd water van uit het oppervlaktewater naar het recirculatiewater, zonder dat ongewenste stoffen zoals zouten of pathogenen in het recirculatiewater terecht komen. Ook het gebruik van leidingwater (1.5 – 1.9 mmol/l Na) als alternatieve gietwatervoorziening behoort tot de mogelijkheden. Oppervlaktewater en leidingwater kunnen een belangrijk alternatief zijn voor het gebruik van grondwater als secundaire gietwaterbron, waarmee productie van brijn en lozing van brijn in het grondwater voorkomen wordt.

Op dit moment wordt veel grondwater ingezet als secundaire gietwaterbron. Gezien de verzilting van het grondwater in West Nederland, voldoen veel omgekeerde osmose (RO)-installaties die nu gebruikt worden voor ontzouting van het grondwater, niet meer. Een andere installatie die een hogere zoutconcentratie aankan, kan dan de oplossing bieden. Er wordt ook onderzocht of FO een geschikt alternatief voor RO kan zijn.

De opzet van werkpakket 2 is als volgt:

2017

- Een inventarisatie maken van relevante waterstromen waarbij vooral is gekeken naar de zoutconcentraties van de stromen, andere aanwezige componenten en de debieten.
- Vervolgens is er een berekening gemaakt waarbij de verschillende waterstromen aan elkaar gekoppeld zijn om te berekenen wat de potentie is van forward osmosis met betrekking tot het brengen van schoon water in het systeem. Hierbij is gekeken naar de gietwaterbronnen grondwater, oppervlaktewater en leidingwater, naar recirculatiewater van 2 teelten (zout intolerant en zouttolerant), naar Standaardwater (als representatief drain en drainage water) en naar (geconcentreerde) voedingsoplossingen die representatief zijn voor de glastuinbouw. Ook zijn berekeningen gemaakt van ontwerpparameters, zoals het benodigde membraanoppervlak.
- Uit bovenstaande berekeningen volgde een selectie van een aantal combinaties van stromen waarvoor de potentie van forward osmosis nader onderzocht is.
- In kortdurende laboratoriumexperimenten met modeloplossingen zijn een aantal combinaties van stromen getest. De nadruk lag hierbij op watertransport, zoutlekkage. Voor de behandeling van spuistromen is onderzocht of gewasbeschermingsmiddelen door het membraan transporteren. Afhankelijk van de gekozen configuratie kan dit zowel een voordeel zijn (wanneer het aan het spui onttrokken wordt en het water in de teelt wordt hergebruikt) of een nadeel (bij transport van recirculatiewater naar de reststroom van de gietwaterbron).

2018

- Pilot studie. In het IDC Water (Wageningen UR Glastuinbouw, semi-praktijk) zijn pilottesten uitgevoerd om de lange-termijn technische haalbaarheid van FO in kasteelten aan te tonen. Voor de pilot is gebruik gemaakt van pressure assisted osmosis, een configuratie waarbij er behalve een osmotische druk, ook een hydraulische druk op het systeem is gezet aan de voedingszijde (feed, verdunde kant)

van de FO. Er is gebruik gemaakt van een membraan dat speciaal voor deze studie is gemaakt.

- Een technisch economische evaluatie is uitgevoerd op basis van eerder verzamelde data.

2 Inventarisatie waterstromen

Om een goed beeld te krijgen over de potentie van forward osmose in de glastuinbouw is eerst een inventarisatie gemaakt van de aanwezige stromen. Dit betreft zowel de debieten als de samenstelling.

De volgende waterstromen zijn bekeken (Tabel 2-1):

Tabel 2-1: Onderzochte waterbronnen in dit project. De osmotische druk is berekend op basis van de samenstelling.

bron	Debiet m ³ /ha/jaar	Osmotische druk Bar	Bron
regenwater	7664	0,005	(Boogerd & Graaf, 2013)
oppervlaktewater (Rijnwater 1975)	-	0,35	("Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit," 2017)
zeewater	-	24,9	("Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit," 2017)
leidingwater Wateringen, gemeente Westland	-	0,17	Evides
grondwater	-	Uitgaande van 500- 3000 mg/l Cl: 0,67 – 3,94	(Sanchez, Klein, Oude Essink, Raat, & Paalman, 2012)
gietwater	10000-16000	0,20	(Jurgens et al., 2010)
Spuiwater zoals beschreven als Standaard Water	1000	1,24	(Ruijven, Os, Blok, & Beerling, 2016)

Uit een snelle berekening is gebleken dat voor het gebruik van recirculatiewater als 'osmotische oplossing' en oppervlaktewater als 'feed' een membraanoppervlak van enkele hectares nodig is. Dat is geen haalbare situatie. Op dat moment is besloten om de volgende 2 concepten verder te onderzoeken:

- Feed: alternatieve gietwaterbron, osmotische oplossing: geconcentreerde nutriënten oplossing (FO1 in Figuur 1-1)
- Feed: spuiwater, osmotische oplossing: geconcentreerde nutriënten oplossing (FO2 in Figuur 1-1)

Als geconcentreerde nutriënten oplossing is een recept van tomaat genomen (Tabel 2-2). Hierbij is aangenomen dat het meststoffen verbruik bij de tomatenteelt, geheel jaar, normale productie (vruchtproductie 80 kg /m²), hergebruik drainwater, ongeveer 10.000 - 15.000 kg meststoffen/ha is.

Tabel 2-2: Samenstelling van de geconcentreerde nutriëntenoplossing

A-bak		B-bak	
mmol/l		mmol/l	
Ca ²⁺	295.021	K ⁺	419.0119
NH ₄ ⁺	165.5814	Mg ²⁺	217.1502
Fe ³⁺	226.492	Mn ²⁺	1.062374
K ⁺	219.979	Zn ²⁺	0.424956
		Na ⁺	0.743455
		Cu ²⁺	0.079692
		H ⁺	265.4571
NO ₃ ⁻	975.6024	NO ₃ ⁻	180.0083
DTPA	226.492	SO ₄ ²⁻	271.8547
		PO ₄ ³⁻	132.7286
		B ₄ O ₇	0.530999
		MoO ₄	0.053114
osmotische druk			
47.9	bar	30.9	bar

De nutriënten worden als geconcentreerde nutriëntenoplossingen in 2 bakken bereid. Hierbij is de samenstelling zodanig dat geen neerslag in de voorraadtank (A-bak of B-bak) vormt. Na verdunning worden de twee stromen samengebracht in de kas en vormt zich door de lage concentraties ook geen neerslag. De oplossingen in de A-bak en B-bak worden 100x verdund voordat ze aan de planten worden gegeven.

3 Modelleren van FO voor de glastuinbouw

De potentie van FO voor de glastuinbouw wordt in eerste instantie bepaald met een modelleerstudie, waarin de verschillende waterstromen aan elkaar gekoppeld worden voor het produceren van schoon water. De berekeningen gaan uit van massabalansberekeningen gebaseerd op beschikbare hoeveelheid en samenstelling van de waterstromen gekoppeld aan de doelstelling van het watersysteem. Verder zijn beschikbare membraanparameters - gebaseerd op type FO en dimensies FO module - van belang om het benodigd membraanoppervlak te kunnen berekenen. Het benodigde membraanoppervlak geeft een eerste indicatie over de haalbaarheid van FO in de glastuinbouw.

Er zijn twee scenario's geselecteerd voor het bepalen van de mogelijkheid van forward osmose in de glastuinbouw. In het eerste scenario wordt gebruikgemaakt van drainwater als feed en een nutriëntoplossing voor de tomatenkweek als osmotische oplossing. Het doel van dit scenario is om een maximale indikking te bereiken van het drainwater met een richtgetal van 5x indikking of 80% recovery. In het tweede scenario wordt gebruik gemaakt van brak grondwater als feed en dezelfde nutriëntoplossing als osmotische oplossing, met als doel het onttrekken van schoonwater uit brak grondwater (meer details in Tabel 3-1). Beide zijn berekend voor een kas van 30ha.

Tabel 3-1: Uitgangspunten en doelstellingen van twee FO scenario's in de glastuinbouw

	Scenario 1	Scenario 2
Bedrijfs grootte	30 ha	30 ha
Feed	Drain	Grondwater (1500 mg/l Cl)
Feed flow	1000 m ³ /ha/jr = 3,4 m ³ /uur	Zoveel als nodig
Feed osmotische druk	1,2 bar	1,95 bar
Osmotische oplossing-oplossing	A-bak tomaat	A-bak tomaat
Osmotische oplossing_flow	0,34 m ³ /uur	0,34 m ³ /uur
Osmotische oplossing_osmotische druk	47,9 bar	47,9 bar
Doel	Maximale indikking bereiken van de drain	17 m ³ /uur verdunde voedingsoplossing maken

Aangezien dit een unieke studie is waarvoor nog geen referenties beschikbaar zijn, is er voor de zekerheid gekozen voor drie verschillende aanpakken om tot het benodigde membraanoppervlak te komen voor de twee scenario's. Verder is aangenomen dat de osmotische oplossing alleen bestaat uit NaCl om de complexiteit van de berekeningen te beperken. De drie gevolgde aanpakken zijn:

- Een analytische berekening ((Mondal, Field, & Wu, 2017))

- FOSA systeemontwerp ((Kim, Phuntsho, Ali, Choi, & Shon, 2018))
- Zelfontwikkeld numeriek model in Excel

In de analytische berekening wordt gebruik gemaakt van een exacte oplossing voor het dimensioneren van FO systemen waarin de FO elementen zowel in mee- en tegenstroom kunnen worden geschakeld. Het nadeel van deze methode is dat het zoutlek onterecht wordt verwaarloosd om tot een analytische oplossing te komen. Hierdoor zal het benodigde membraanoppervlak kleiner berekend worden dan in werkelijkheid nodig is.

Een tweede berekening gaat uit van een numeriek mathematisch model waarin complete FO systemen kunnen worden gedimensioneerd. Deze methode is ontwikkeld door de onderzoeksgroep van prof. Hokyong Shon (UTS, Sydney, Australië) en wordt FOSA (Forward Osmose System Analysis) genoemd. Een nadeel is dat FO elementen alleen in meestroom kunnen worden doorberekend. Het zoutlek wordt hierin wel meegenomen.

Tenslotte een zelfontwikkeld numeriek mathematisch model in Excel waarmee FO systemen kunnen worden doorgerekend. Ook in dit model kunnen FO elementen voorlopig alleen in meestroom worden berekend. Het zoutlek wordt hierin wel meegenomen.

Alle modellen maken gebruik van drie membraanparameters gebaseerd op de waterflux (A-factor), het zoutlek (B-factor) en een membraanstructuurparameter (S-factor). Verschillende FO membraanelementen zijn commercieel beschikbaar, en we hebben gekozen voor het grootst beschikbare element (8040FO-MS-P) (zie Figuur 3-1). Voor de berekeningen is gebruikt gemaakt van een Toray membraan met een A-factor van $A = 6,76$ LMHbar, een B factor van $1,84$ LMH en een S-factor van $215,1$ μm . Voor de berekeningen met het FOSA model is gebruikt gemaakt van het HTI membraan met een lagere waterflux dan in het analytische model $A=0.51$ LMH, $S=684$ μm . (Sauchelli, Pellegrino, D'Haese, Rodríguez-Roda, & Gernjak, 2018)

FO in de glastuinbouw

Twee scenario's → Drie aanpakken

Berekenen benodigde membraanoppervlak in functie van indikkingsgraad (doel : 5x)

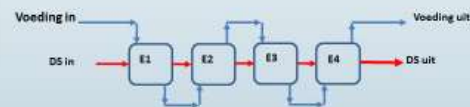
Aannames

- We kiezen een membraan (A, B en S)
- We gebruiken NaCl als draw oplossing

Drie aanpakken

1. Analytische opl. (Mondal et al, 2017)
2. FOSA (prof Hokyong Shon, UTS, Sydney)
3. Eigen massabalans in Excel (co-current)

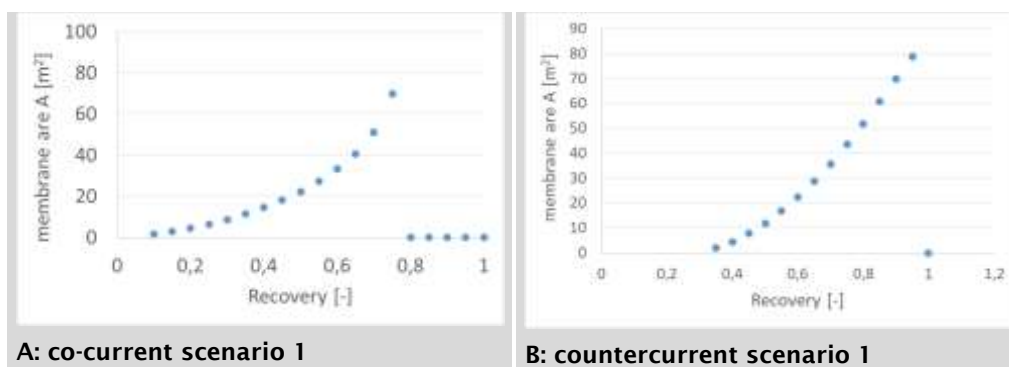
HTI Element	M. Area (m ²)	Q _{feed} (m ³ /h)	Q _{draw} (L/h)
8040FO-MS-P	14,4	8,4	0,78
8040FO-CS-P	9.0	31,2	0,528
4040FO-MS	3.2	1,8	0,174
4040FO-CS	1.5	5,4	0,09



KWR Watercycle Research Institute

Figuur 3-1: Drie aanpakken voor het dimensioneren van full-scale FO systemen met gebruikmaking van membraanparameters en FO elementdimensies.

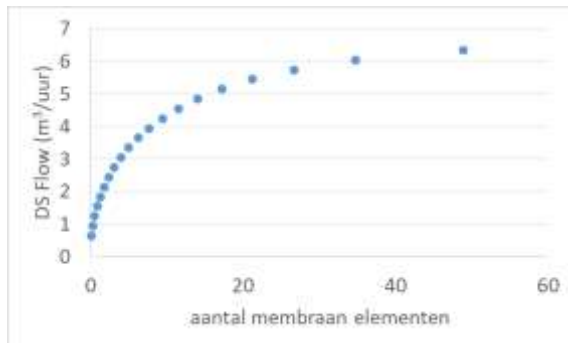
Het benodigd membraanoppervlak (en FO elementen) is berekend in functie van de recovery met de analytische berekening ((Mondal et al., 2017)) voor de twee scenario's voor zowel een mee- en tegenstroomschakeling van FO elementen (zie Figuur 3-2). Bij het eerste scenario bij de meestroomconfiguratie (co-current) is het niet mogelijk om 80% recovery te bereiken. 75% recovery kan met 5 elementen met in totaal 72 m² (waarvan 69.7 m² minimaal nodig is) membraan oppervlak bereikt worden. Bij tegenstroomconfiguratie (counter current) kan wel 80% recovery bereikt worden. Bij een recovery van 75% zijn 3 elementen nodig met een oppervlak van 43,4 m². Bij 80% recovery is een vierde element nodig. Een maximale indikking van 95% kan bereikt worden met 5 elementen.



Figuur 3-2: Membraanoppervlak in functie van de recovery voor de twee scenario's met mee- en tegenstroom schakeling van FO elementen

Het tweede scenario waarbij schoonwater wordt onttrokken uit brakgrondwater geeft aan dat er geen verdunde oplossing bereikt kan worden van 17 m³/uur. Er is dan niet

voldoende drijvende kracht. Wel kan een oplossing met een flow van ruim 6,5 m³/uur verkregen worden. Boven de 20 elementen neemt het aantal elementen wel sterk toe ten opzichte van de geproduceerde hoeveelheid verdunde oplossing.

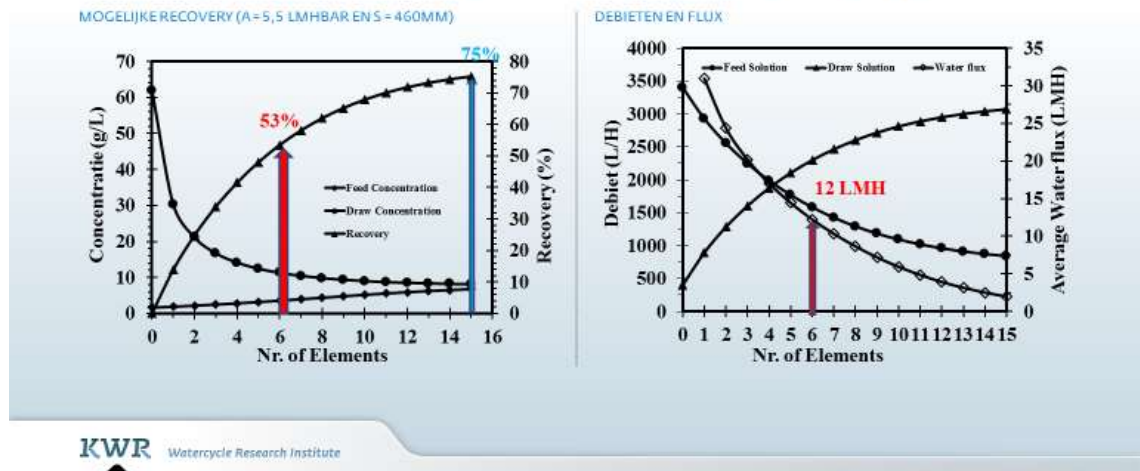


Figuur 3-3: Debiet van de verdunde oplossing bij scenario 2, co-current, analytische oplossing. Feed_{in}: 30 m³/uur, DS_{in}=0,34 m³/uur.

Het benodigde membraanoppervlak is tevens berekend met het numerieke mathematische FOSA model voor de twee scenario's voor alleen meestroomschakeling van de FO elementen ((Kim et al., 2018)). Alleen het eerste scenario geeft een oplossing, waarvan de resultaten zijn gegeven in Figuur 3.6. Het concentratieverschil tussen de feed (drainwater) en de osmotische oplossing (nutriëntoplossing) neemt sterk af met het aantal benodigde FO elementen (Figuur 3-4 links). Verder neemt het feed-debiet af en het debiet van de osmotische oplossing toe in functie van het aantal benodigde FO elementen (Figuur 3-4 rechts). Door deze veranderingen neemt de flux sterk af met het aantal FO elementen. Een indikking van 2x (recovery van 50%) wordt bereikt met 6 FO elementen, en een indikking van 4x (recovery van 75%) wordt bereikt met 15 FO elementen.

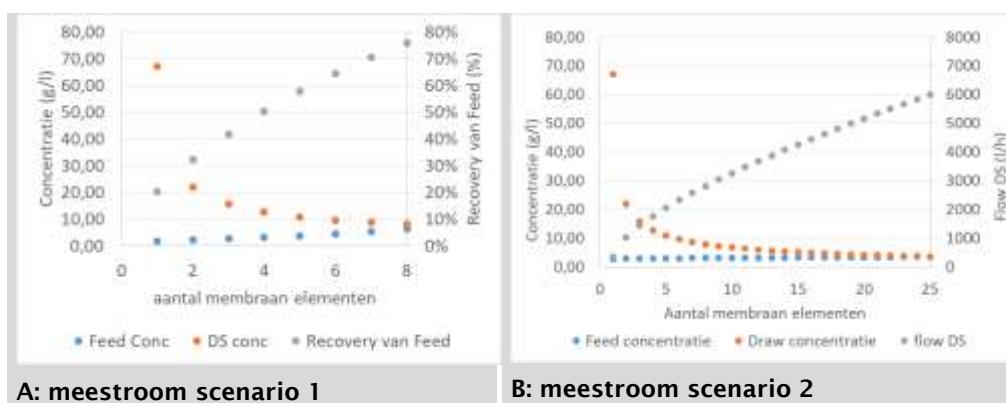
Berekening benodigd membraanoppervlak

2. FOSA (Forward Osmosis System Analysis) – prof. Hokyong Shon



Figuur 3-4: Benodigd aantal meestroom FO membraanelementen in functie van concentratie, debiet, flux en recovery voor scenario 1 (indikking drainwater)

Tenslotte is het benodigde membraanoppervlak (en aantal FO elementen) in functie van de recovery en indikking berekend met het zelfontwikkelde numerieke model in Excel voor de twee scenario's met FO elementen in meestroom-schakeling. Een recovery van meer dan 80% of een 6,5x indikking van het drainwater kan worden bereikt met FO gedreven door een geconcentreerde nutriëntenoplossing voor de tomatenkweek (Tabel 2-2; Figuur 3-5 links). Het is niet mogelijk om uit 0,34 m³/h osmotische oplossing 17 m³/uur verdunde oplossing te maken. Door het lage debiet van de geconcentreerde nutriënten oplossing ten opzichte van de feed, verdunt de geconcentreerde oplossing zo ver, dat de drijvende kracht snel afneemt. De zoutconcentratie van deze verdunde oplossing is zo laag dat er nauwelijks drijvende kracht meer is. Het is wel mogelijk om maximaal ongeveer 19-20x te verdunnen. Hiervoor zijn 26-28 elementen van 8 inch nodig. Er wordt dan 6-6,5 m³/uur aan verdunde oplossing geproduceerd met een osmotische druk van 2,3 bar. Wanneer deze oplossing in de kas gebruikt zal worden, moet er nog verder verdund worden met bijvoorbeeld regenwater.



Figuur 3-5: Benodigde FO element in meestroom in functie van de recovery en indikking voor de twee scenario's

Wanneer in tegenstroom wordt aangestroomd, kan ongeveer 40% minder membraan oppervlak gebruikt worden dan in meestroom (analytisch model). Het toevoegen van het zoutlek aan het model vergroot het benodigd membraanoppervlak met circa 60% (analytisch model t.o.v. massabalans model). Hieruit kan geëxtrapoleerd worden dat voor het indikken van een spuistroom van 1000 m³/ha/jr bij een bedrijf van 30ha met 75% water recovery 5 modules nodig zullen zijn van 8 inch.

Meestroom met zoutlek (massabalansmodel)	8 modules
Meestroom zonder zoutlek (analytisch model)	5 modules
Tegenstroom zonder zoutlek (analytisch model)	3 modules
Tegenstroom met zoutlek (geëxtrapoleerd massabalans model)	5 modules

Wanneer brak grondwater gebruikt wordt voor de bereiding van gietwater, kan geen voldoende groot debiet verkregen worden om aan de vraag te voldoen. Er kan echter wel 6,5 m³/uur geproduceerd worden, wat dan verder verdund kan worden met een andere waterbron zoals regenwater. Dit is ongeveer 20% van de waterbehoefte van 10.000 m³/ha/jaar voor een bedrijf van 30ha.

Uit de modellen is gebleken dat het proces mogelijk is, maar dat niet alle doelen volledig behaald kunnen worden. Optimalisatie van de gekozen scenario's kan tot een positiever resultaat leiden. Zo kan worden verondersteld dat niet alle gietwater volledig uit een secundaire bron hoeft te komen, maar voor een groot gedeelte uit regenwater wordt gemaakt, en dat de benodigde hoeveelheid water uit brak grondwater een stuk kleiner is. Dat betekent dat de nutriëntenstroom ook niet tot een osmotische waarde van gietwater verdund hoeft te worden, en dat de volumes ook kleiner kunnen zijn. Daardoor blijft de drijvende kracht groter.

4 Forward Osmose experimenten

De potentie van het gebruik van FO in de glastuinbouw is niet alleen modelmatig onderzocht, maar ook door middel van experimenten. Door de experimenten kan het zoutlek en de waterflux bepaald worden van de oplossingen zoals die in de praktijk kunnen voorkomen. De waardes in de modellen zijn gebaseerd op oplossingen van NaCl. In een meer complexe zoutoplossing zullen niet alle ionen even sterk transporteren door het membraan, en het zoutlek bepaalt mede de grootte van het benodigde membraan, en de mate waarin de drijvende kracht behouden blijft. Daarnaast is ook gekeken naar transport van gewasbeschermingsmiddelen die in het spuiwater van de tuinbouw kunnen voorkomen. Wanneer water onttrokken kan worden uit het spuiwater, hoeft dat niet via een andere bron aangevoerd te worden. Het spuiwater bevat gewasbeschermingsmiddelen. Wanneer deze middelen door het membraan transporteren, hoeven ze in mindere mate toegevoegd te worden aan het gietwater.

Door middel van een U-buis test wordt de waterflux en zoutflux door het membraan bepaald. Dit zijn batch experimenten waarbij het volume van de feed-oplossing afneemt, terwijl het volume in de drawoplossing toeneemt. De concentraties ionen in de osmotische oplossing worden hierdoor lager. Wanneer er een zoutlek is, nemen de concentraties in de feedoplossing toe. Ook zonder zoutlek, maar het al zout aanwezig is de feed, nemen de concentraties hier toe, doordat water onttrokken wordt aan de feedoplossing. Het toenemen van de concentraties in de feed, en het afnemen van de concentraties in de osmotische oplossing, leiden tot een lager wordende drijvende kracht gedurende het experiment. Toch is het doen van een batchexperiment in de U-buis een goede methode voor het verkrijgen van inzicht in de processen van het systeem. Doordat het een gesloten systeem is, is het mogelijk om een goede massabalans te maken. De waterfluxen zijn zodanig dat de volumeverandering de drijvende kracht niet al te zeer beïnvloed. Door het aflezen van de hoogte in de stijgbuis, kan de volumetoename in de tijd worden bijgehouden. De temperatuur, pH en EC kunnen gemeten worden aan zowel de feed-kant als de kant met de osmotische oplossing. Twee pompjes pompen de oplossing aan beide zijden van het membraan snel rond om concentratiepolarisatie aan het oppervlak te minimaliseren.

Het water uit de verdunde oplossing gaat door het membraan naar de geconcentreerde oplossing. De toename van het volume wordt bijgehouden door hoogtemeting in de stijgbuis (zie Figuur 4-1). De experimenten zijn uitgevoerd met membraansamples verkregen uit een Toray FO4040 membraanelement.

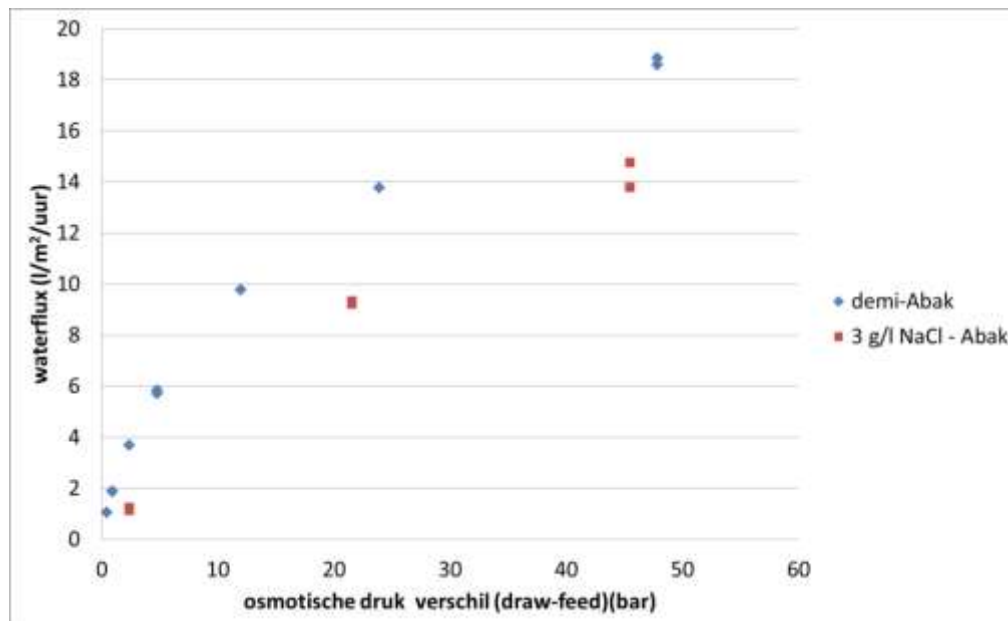
De experimenten zijn uitgevoerd met een geconcentreerde nutriëntenoplossing als osmotische oplossing, in verschillende verdunningen. De samenstelling is zoals beschreven bij A-bak in Tabel 2-2. De feed-oplossing was gedemineraliseerd water (demi-water) of een 3 g/l NaCl oplossing (1810 mg/l Cl, vertegenwoordigt brak grondwater).



Figuur 4-1: U-buisopstelling voor FO experimenten

4.1 Waterflux

De waterflux als functie van het osmotisch drukverschil is weergegeven in Figuur 4-2.



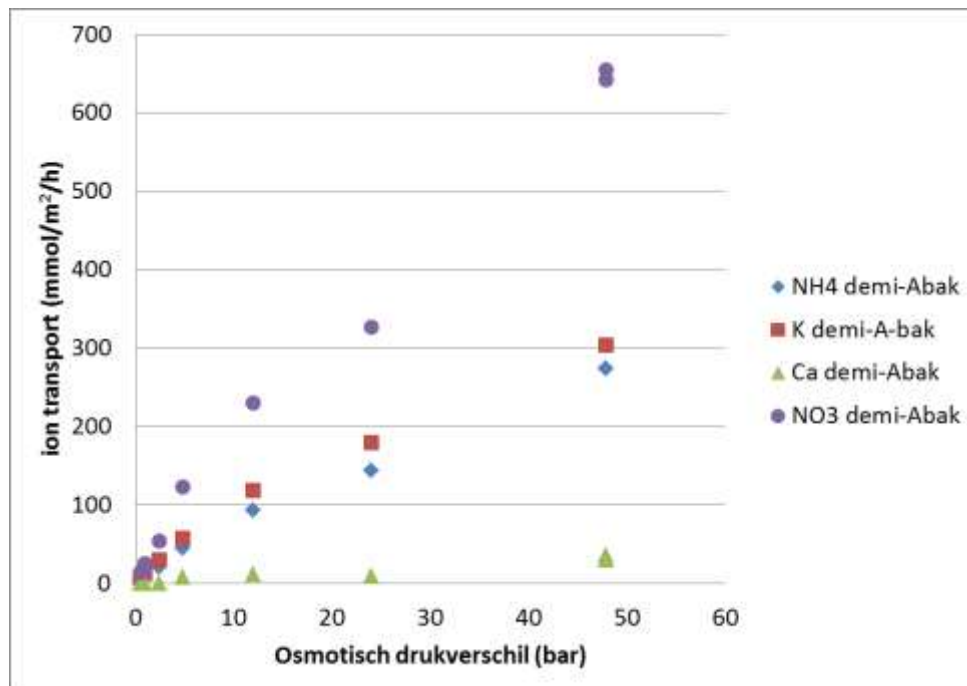
Figuur 4-2: Waterflux als functie van het osmotisch drukverschil. osmotische oplossing = A-bak, blauw - diamant: feed=demiwater, rood-vierkant: feed=3 g/l NaCl oplossing (osmotische druk 2,4 bar)

De waterflux (Figuur 4-2) bepaalt in grote mate hoeveel membraanoppervlak nodig is voor het bereiden van een bepaalde hoeveelheid verdunde gietwateroplossing. De waterflux wordt bepaald door het osmotisch drukverschil maar ook door de eigenschappen van het membraan. Het is onduidelijk waarom bij eenzelfde osmotisch drukverschil maar een andere verdunde oplossing, de waterflux niet gelijk is. Bij een

NaCl oplossing als feed, is de flux lager dan bij een demi-wateroplossing als feed. Het kan zijn dat interne concentratiepolarisatie anders is als je een zoute voeding hebt i.p.v. demi-water. De zoute voeding kan ook resulteren in het krimpen van het membraan zodat er iets minder water doorgaat. De waterflux, uitgedrukt in LMH bij 0,5 M NaCl is 6,7 l/m²/uur.

4.2 Zouttransport

Forward osmose is een natuurlijk proces waarbij de 2 verschillende oplossingen (feed en osmotische oplossing) in evenwicht proberen te komen door water te transporteren van de verdunde naar de geconcentreerde oplossing. Het membraan is zo ontworpen dat dit optimaal gebeurt. Echter de membranen zijn niet perfect en het evenwicht zal ook bereikt worden door transport van zouten van de geconcentreerde naar de verdunde oplossing dus van osmotische oplossing naar feed (zoutlek of reverse solute transport, RST). Wanneer een geconcentreerde nutriëntenoplossing gebruikt wordt als osmotische oplossing, betekent dat een verlies van nutriënten. Het transport van ionen van de osmotische oplossing naar de feed-zijde is weergegeven in Figuur 4-3.



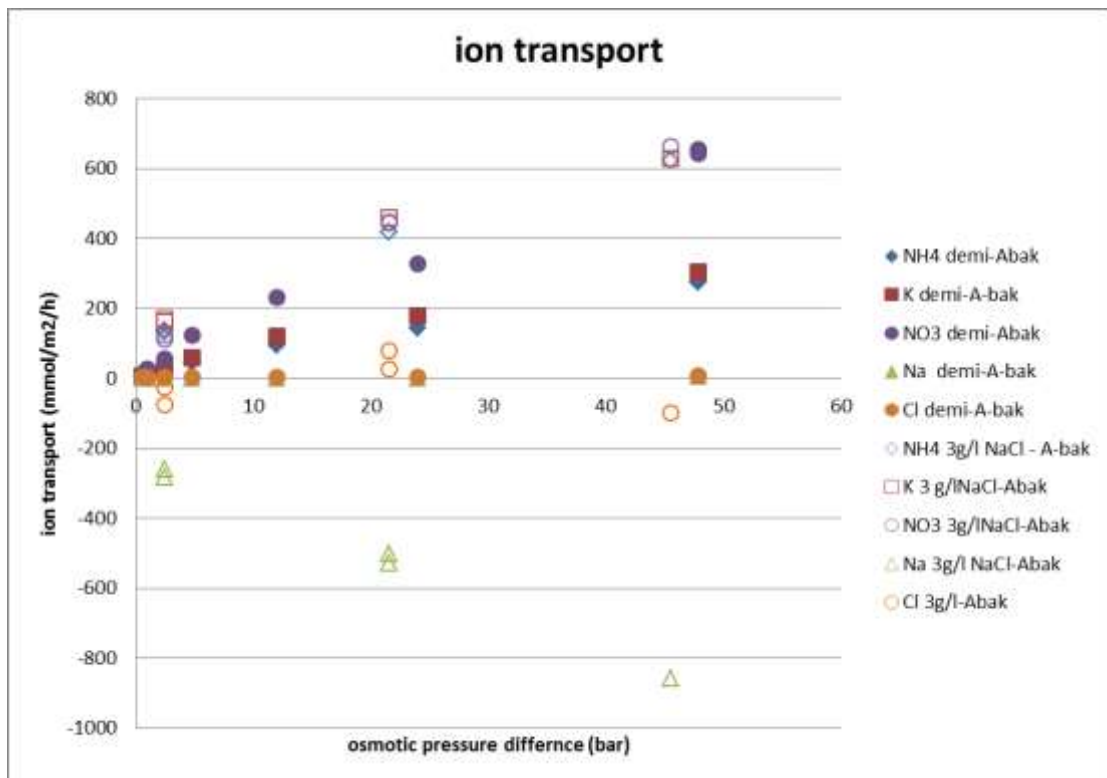
Figuur 4-3: Ion transport door membraan als functie van het osmotisch drukverschil (osmotische oplossing-feed). Osmotische oplossing: A-bak, feed: demiwater

De belangrijkste ionen in de A-bak zijn ammonium, kalium en calcium als kationen en nitraat als anion. Wat opvalt is dat calcium bijna niet getransporteerd wordt. Eenwaardige ionen worden veel meer getransporteerd. Dit is een bekend verschijnsel bij forward osmose membranen. Door de grotere watermantel en de elektrostatische repulsie worden meerwaardige ionen nauwelijks getransporteerd door het membraan (Cornelissen et al., 2008; Lutchmiah, Verliefe, Roest, Rietveld, & Cornelissen, 2014).

In een steady state systeem kan het zoutlek zelfs nog iets groter zijn dan in de gedane U-buis proeven waarbij de drijvende kracht afneemt in de tijd. In een steady state

systeem blijven de drijvende krachten gelijk. Wanneer geen demiwater maar een zoute oplossing aanwezig is als feed-oplossing, heeft dat verschillende consequenties. Doordat er een kleiner osmotisch drukverschil is, zal het watertransport langzamer gaan bij dezelfde osmotische oplossing. Verder is er in de osmotische oplossing nauwelijks natrium en chloride aanwezig. Die ionen zullen ook de neiging hebben naar de osmotische oplossing te transporteren (voorwaarts ion transport). Er is in Figuur 4-4 te zien dat natrium (groene driehoek) bij demi-water als feed oplossing nauwelijks transporteert. Dit is in zowel feed als osmotische oplossingen nauwelijks aanwezig. Wanneer echter 3 g/l NaCl oplossing als feed wordt gebruikt, dan vindt er een transport plaats van natrium ionen naar de osmotische oplossing zijde (negatieve waardes). Om dit transport van een positief geladen ion te compenseren, moet er ook een negatief ion mee transporteren naar de osmotische oplossing-zijde, of een positief ion extra transporteren naar de feed-zijde. Dat is wat hier gebeurt. Het transport van ammonium en kalium (open diamant en vierkant) neemt significant toe ten opzicht van de situatie dat demiwater de feed-oplossing is (dichte diamant en vierkant). Met demi-water was het transport bij 23.9 bar osmotische drukverschil 322 mmol/m²/uur door NH₄⁺ en K⁺ samen. Bij gebruik van een zoute voedingsoplossing was het totale transport van NH₄⁺ en K⁺ 874 mmol/m²/uur, een toename van 552 mmol/m²/uur, terwijl het voorwaartse zouttransport van Na⁺ 529 mmol/m²/uur was.

Tuinders moeten vaak lozen wegens een te hoog gehalte van natrium in hun gietwater. Wanneer natrium uit de bron (bijvoorbeeld zout grondwater) naar de osmotische oplossing lekt, is dat ongunstig. Echter wanneer bijvoorbeeld omgekeerde osmose als ontzoutingstechnologie wordt gebruikt, kan ook een zouttransport van ongeveer 1% verwacht worden. Het zoutverlies zoals gemeten in de U-buis opstelling is lastig te vertalen naar het verlies in een continu-opstelling, waarbij er constant aanvoer van verse oplossingen is. In de U-buis is het transport in het begin van de proef sneller dan later in de proef, omdat het osmotisch drukverschil tussen de oplossingen gedurende de test afneemt.



Figuur 4-4: Ion transport door het FO membraan. Osmotische oplossing= A-bak, dichte markering: feed=demiwater, open markering: feed= 3 g/l NaCl. Negatief transport is een flux van feed naar osmotische oplossing.

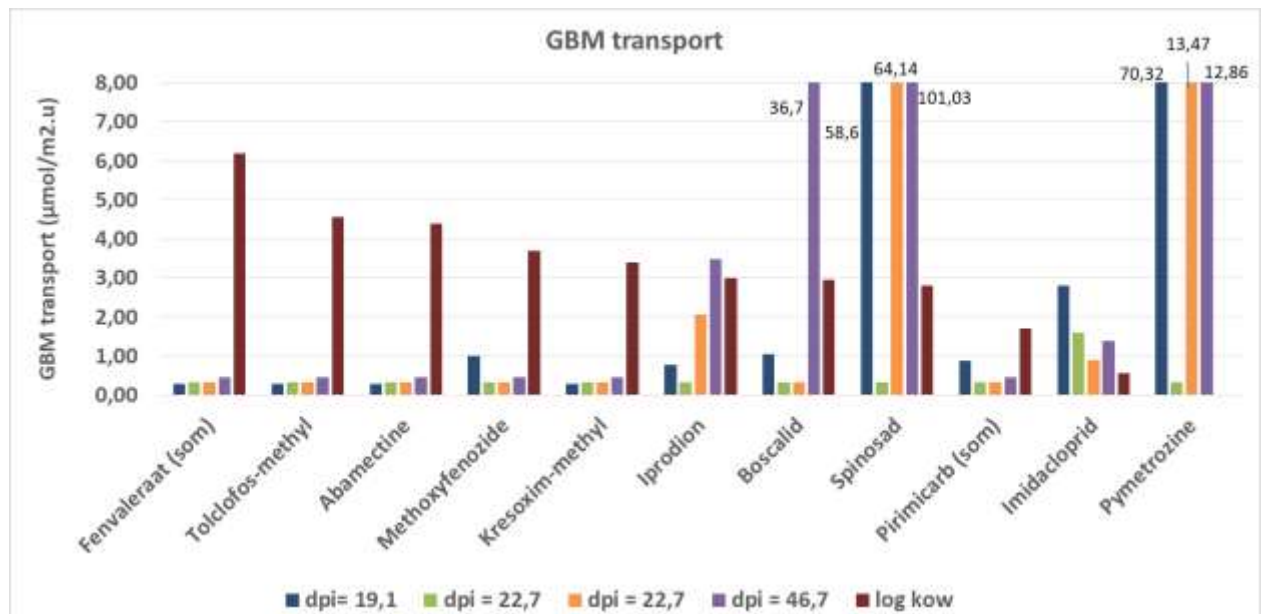
4.3 Gebruik andere oplossing

Om verlies van nutriënten te voorkomen, zou er voor gekozen kunnen worden om de B-bak in te zetten als osmotische oplossing. Deze oplossing bevat kalium en nitraat als eenwaardige ionen, en verder zijn er alleen meerwaardige ionen in de oplossing aanwezig. Wanneer deze oplossing als osmotische oplossing wordt gebruikt, kan verondersteld worden dat het zouttransport alleen afkomstig is van kaliumnitraat. Er kan gekozen worden om al het kaliumnitraat in de A-bak te doen, en dan een B-bak te hebben met voornamelijk meerwaardige ionen. Dan is er nog steeds een hoeveelheid kalium als eenwaardig ion in de B-bak (nodig om aan de vraag van de planten te voldoen) maar door de afwezigheid van eenwaardige anionen zal het transport van kalium waarschijnlijk ook beperkt blijven. De osmotische druk van een B-bak zonder nitraat en minder kalium is aanzienlijk lager dan de huidige A-bak, en ligt rond de 21.3 bar maar dat geeft nog steeds een hoog osmotisch drukverschil met de gebruikte feed-oplossingen. Een andere oplossing is het gebruik van 'vloeibare meststoffen'. Dit zijn oplossingen van slechts één meststof die nagenoeg verzadigd in de oplossing aanwezig is. Voordeel voor de tuinder voor het gebruik van vloeibare meststoffen is dat veel preciezer een tekort van één stof aangevuld kan worden. Voordeel voor FO is dat het osmotisch drukverschil in deze oplossingen heel erg hoog is. Zo is de osmotische druk van een 4,68 M $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ oplossing 337,5 bar (productnaam Fertigro CN) en van een 7,46 M NH_4NO_3 oplossing 358,9 bar (productnaam Fertigro SZ-38). De benodigde volumes van zeer geconcentreerde oplossingen, zijn erg klein. Dit kan een nadeel zijn bij het ontwerp van een FO installatie. Al gelijk in het eerste element wordt de oplossing zeer veel en snel verdund, maar de verhouding in volume tussen meststof (osmotische oplossing) en feed is nog erg klein.

4.4 Transport van gewasbeschermingsmiddelen (GBM)

In dit project wordt onderzocht of het mogelijk is om spuiwater van tuinders te gebruiken als feed-oplossing. Wanneer water onttrokken wordt aan het spuiwater, blijft een kleinere stroom over die behandeld en afgevoerd moet worden als afvalwater. Daarnaast hoeft het water wat onttrokken wordt aan het spuiwater niet aangevoerd te worden vanuit een andere bron. In het spuiwater zitten naast zouten echter ook gewasbeschermingsmiddelen. Deze middelen kunnen mogelijk door het membraan transporteren, met het water mee. Wanneer zij vanuit het spui naar het gietwater transporteren via het FO membraan, betekent dit dat er minder middelen achterblijven in de afvalstroom. De middelen komen in het gietwater terecht. Dit kan ertoe leiden dat een tuinder minder middelen hoeft te doseren aan zijn gietwater. Niet alle middelen zullen door het membraan gaan. De mate waarin stoffen door het membraan gaan, heeft te maken met de membraan eigenschappen, de stoffeigenschappen en de procesomstandigheden.

In de experimenten met drainwater als feed-oplossing, is het transport van gewasbeschermingsmiddelen (GBM) bepaald.



Figuur 4-5: transport van gewasbeschermingsmiddelen. Dpi= verschil in osmotische druk tussen osmotische oplossing en voedingsoplossing.

In de Figuur 4-5 staan de middelen geordend van slecht water-oplosbaar (hoge Log_Kow waarde) naar goed wateroplosbaar. De verschillende staven geven het transport aan bij een verschillend osmotisch drukverschil (dpi=19,1 tot 46,7 bar). Er lijkt geen eenduidig verband te bestaan tussen het watertransport (niet in deze figuur), wat toeneemt bij een toenemend osmotisch drukverschil, en het transport van gewasbeschermingsmiddelen. Bij een druk van 19,1 bar is het transport soms hoger dan bij een druk van 46,7 bar. Er lijkt ook geen duidelijk verband te zijn tussen de wateroplosbaarheid en het transport. De gebruikte membranen zijn hydrofiele membranen maar een deel van de middelen zou kunnen adsorberen aan het membraan. Het is wel opvallend dat voor geen enkel experiment een gesloten massabalans kon worden opgesteld. De vergelijking van de massabalans volgt hieronder. Er is verondersteld dat de osmotische oplossing bij de start van het

experiment geen gewasbeschermingsmiddelen bevatte ($C_{osm.opl_0} = 0$). De concentraties in de feed aan het begin en van de feed en osmotische oplossing na 7 uur zijn gemeten. De volumes van de oplossingen zijn bekend. De vermelde waarden voor transport zijn berekend op basis van de concentraties die gevonden zijn in de osmotische oplossing (vergelijking hieronder). Dit kan te maken hebben met de nauwkeurigheid van de analyse methodes (50% zekerheid), of met adsorptie van de middelen aan de opstelling (inclusief membraan), of met spontane afbraak van de middelen.

$$V_{feed_0} * C_{feed_0} + V_{osm.opl_0} * C_{osm.opl_0} = V_{feed_{eind}} * C_{feed_{eind}} + V_{osm.opl_{eind}} * C_{osm.opl_{eind}} + \text{adsorptie} + \text{afbraak}$$

$$\text{Transport} = \frac{V_{osm.opl_{eind}} * C_{osm.opl_{eind}}}{A * dt}$$

V: volume

C: concentratie gewasbeschermingsmiddel

Feed: feedoplossing

Osm.opl: osmotische oplossing

0: start van het experiment

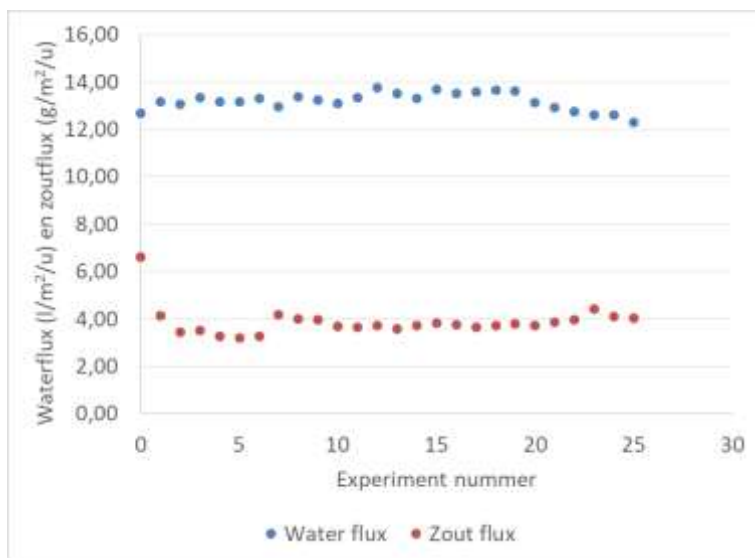
Eind: eind van het experiment

A: membraan oppervlak

dt: tijdsduur van het experiment

4.5 Schoonwater flux

Na ieder experiment is bepaald of het membraan irreversibel vervuild of lek is geraakt. Dit is gedaan door het meten van de zogeheten 'schoonwaterflux'. Deze flux wordt gemeten voorafgaand aan het experiment en na het experiment. Zowel het watertransport als het zouttransport door het membraan zijn gemeten over een periode van 4 uur (Figuur 4-6). Als feed oplossing is demiwater gebruikt, als osmotische oplossing een 0,25M NaCl-oplossing. Dit geeft een osmotisch drukverschil van 12,2 bar. De gemiddelde waterflux na 21 experimenten is 13,31 l/m²/uur (standaard deviatie 0,26 l/m²/uur). Er is geen trend te zien in een toename of afname van de schoonwaterflux over het verloop van de experimenten, waarbij de experimenten in de tijd achter elkaar zijn uitgevoerd. De zoutflux nam na 2 experimenten af van 6,6 naar 3,44 g/m²/uur waarna het stabiliseerde op gemiddeld 3,66 g/m²/uur (n=19). Na 2 experimenten lijkt het membraan een stabiele toestand te hebben gekregen waarin ook geen trend van toename of afname van de zoutflux op te merken is. Er kan daarom gesteld worden dat het membraan in de loop van de experimenten niet vervuild of lek geraakt is.



Figuur 4-6: Schoonwaterflux en zoutflux na ieder experiment, en voorafgaand aan het eerst experiment (experiment nummer 0).

5 Pilot experimenten

5.1 Pressure assisted osmosis

De laboratorium experimenten lieten een relatief hoog zoutverlies zien ten aanzien van de monovalente nutriënten in de osmotische oplossing (zie Figuur 4-3). Dit is ongewenst. Er zijn verschillende strategieën om dit op te lossen. Ten eerste kan gekozen worden voor een osmotische oplossing die voornamelijk twee- of meerwaardige ionen bevat, zoals de B-bak of geconcentreerde vloeibare meststoffen van multivalente ionen. Een andere strategie is de toepassing van een hydraulische druk op de feed-zijde van het systeem. Hierdoor neemt de waterflux toe en het relatieve zoutverlies wordt kleiner. Dit is op laboratoriumschaal aangetoond met een oplossing van NaCl en demi-water (Blandin, Myat, Verliefe, & Le-Clech, 2017; Blandin, Verliefe, Tang, Childress, & Le-Clech, 2013). In de pilot is in plaats van forward osmose membranen is gebruik gemaakt van een nanofiltratiemembraan, Dow NF270, wat is aangepast en in een forward osmose configuratie in een module is gebracht. De hydraulische druk is klein ten opzichte van de osmotische druk, namelijk 0,5 tot 2 bar hydraulische druk ten opzichte van 4,5 bar (0,1 M NaCl) en 23 bar (0,5 M NaCl) osmotisch drukverschil.

Het doel van de experimenten was om het zoutverlies te monitoren bij verschillende hydraulische en osmotische druk.

5.2 Materiaal en methode

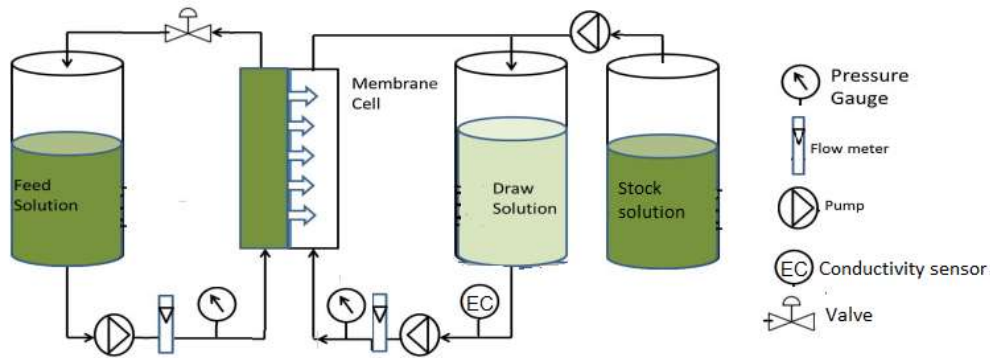
Er is gebruik gemaakt van een pilot geleverd door Blue-Tec. Deze pilot bevatte één 4-inch module met een NF270 membraan van Dow, aangepast in een forward osmose configuratie.

Er is gewerkt met regenwater als feed-oplossing en demiwater (voor een nul-meting) of een NaCl-oplossing aan de osmotische oplossing-zijde, met een concentratie van 0,1 of 0,5 M NaCl. De toegepaste hydraulische druk aan de feed-zijde was 0,4; 1 en 1,9 bar.

Nadat het systeem was aangezet met het correcte debiet en hydraulische druk, heeft het systeem een half uur gedraaid om het systeem te laten stabiliseren voordat de metingen begonnen.

Er is gebruik gemaakt van 3 tanks, de feed tank (demiwater), de osmotische oplossing (NaCl) en de geconcentreerde osmotische stockoplossing. De elektrische geleidbaarheid van de osmotische oplossing is gemeten (Yokogawa; SC72 portable conductivity handheld meter) en door het automatisch doseren van de geconcentreerde stockoplossing is de geleidbaarheid, en daarmee de drijvende kracht gelijk gehouden gedurende proef. Voor een toename van de zoutconcentratie in de feedoplossing is niet gecorrigeerd.

Een schematisch overzicht van de opstelling is gegeven in Figuur 5-1. Het proces flow diagram is te vinden in 0. Het volume van de oplossingen is bepaald door de hoogte in de tank te bepalen.



Figuur 5-1: schematisch overzicht van de pilot-opstelling

5.3 Berekeningen

De waterflux is berekend als volgt:

$$J_w = \frac{\Delta V_F}{\Delta t} * \frac{1}{A} \left[\frac{l}{m^2 h} \right]$$

Waarbij V_F het volume in de feedtank is (l), Δt de tijd tussen de metingen (h), en A het membraan oppervlak (m^2), van 2,8 m^2 .

De waterflux kan ook berekend worden (ter controle) aan de hand van de volumes in tanks met de osmotische oplossing middels de volgende vergelijking:

$$J_w = \frac{\Delta V_D - \Delta V_S}{\Delta t} * \frac{1}{A} \left[\frac{l}{m^2 h} \right]$$

Hierbij is V_D het volume van de osmotische oplossing tank (l) en V_S het volume van de stock tank.

De zoutflux is niet bepaald door een bepaling van de ionconcentraties, maar door het meten van de elektrische geleidbaarheid. De concentratie is berekend met de volgende vergelijking:

$$c = EC * TF * SF$$

Hierbij is c de concentratie van NaCl (g/l), TF een temperatuurscorrectiefactor en SF een getal specifiek voor een bepaald zout.

$$TF = 1.91456323 - 0.06160039 * T + 0.00150088 * T^2 - 0.000025 * T^3 + 0.0000002 * T^4$$

Met T in °C.

$$SF = \frac{0.1 * \sum n_i MW_i}{\sum n_i \lambda_i}$$

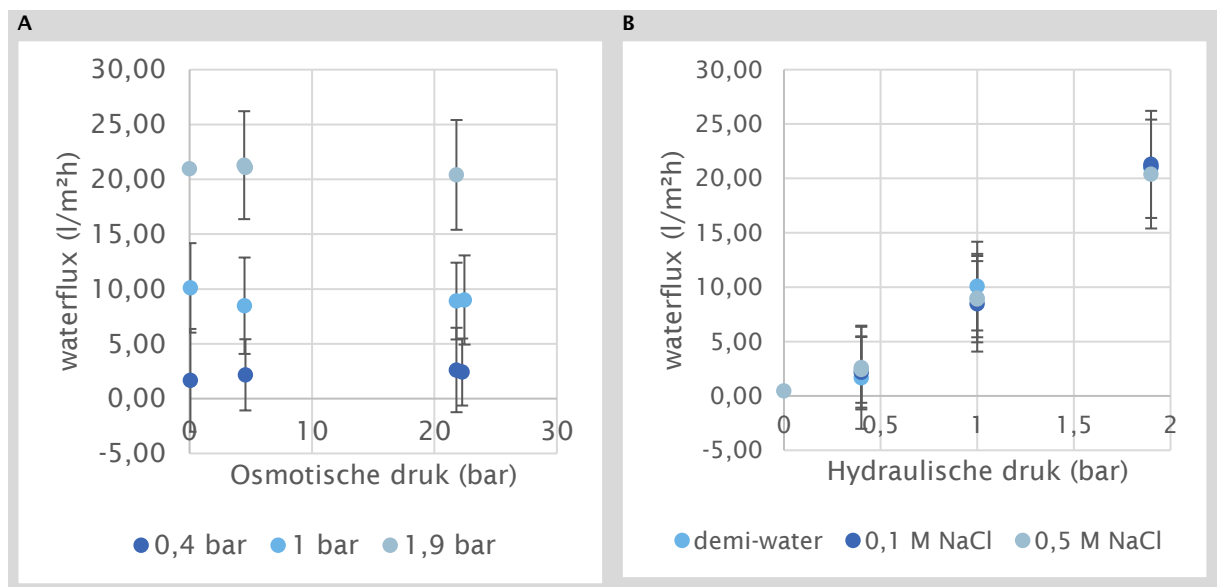
Met n_i de valentie van een ion (1, 2 of 3), MW het molgewicht $\left[\frac{g}{mol} \right]$. λ is de limiterende molaire geleidbaarheid van individuele ionen $\left[\frac{Sm^2}{mmol} \right]$.

De zoutflux (J_s) wordt als volgt berekend:

$$J_s = \frac{\Delta c_F * \Delta V_F}{\Delta t * A} \left[\frac{g}{m^2 h} \right] \text{ en } J_s = \frac{\Delta c_D * \Delta V_D - \Delta c_S * \Delta V_S}{\Delta t * A} \left[\frac{g}{m^2 h} \right]$$

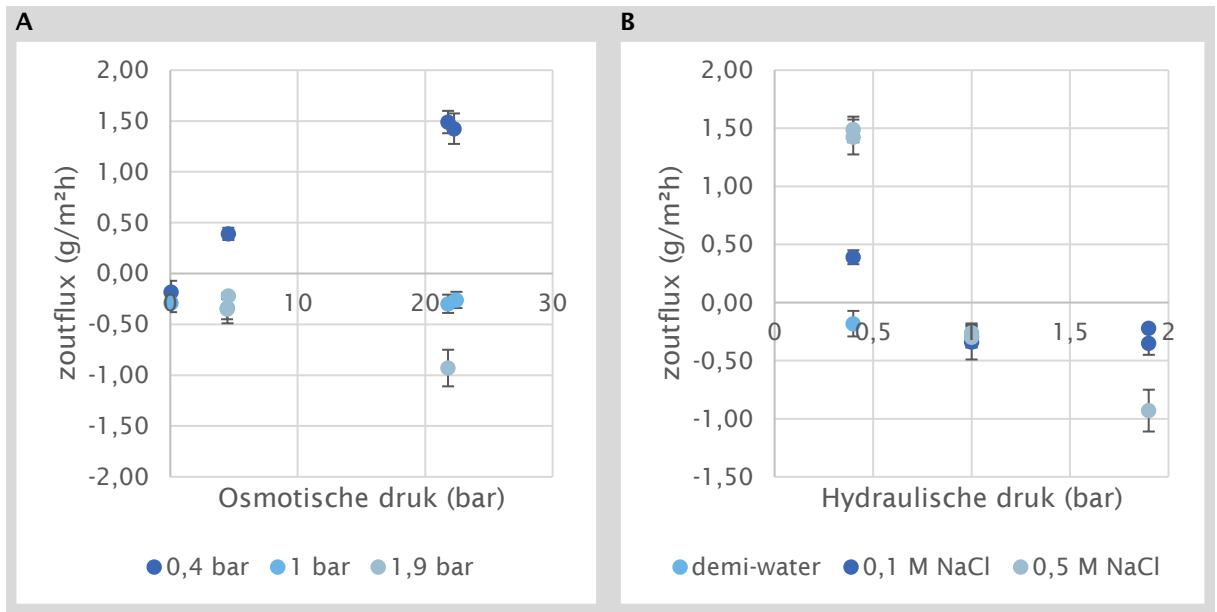
5.4 Resultaten

De waterflux gemeten bij 3 verschillende concentraties van de osmotische oplossing en 3 verschillende hydraulische drukken. Bij eenzelfde hydraulische druk, is de verwachting dat de waterflux toeneemt bij toenemende zoutconcentratie, door een toename in de drijvende kracht. Dit wordt echter niet gezien. Bij een toenemende hydraulische druk bij gelijkblijvende osmotische druk, wordt wel een toename in waterflux waargenomen. (Figuur 5-2A). Wanneer de waterflux wordt weergegeven als een functie van de hydraulische druk (Figuur 5-2B) is geen effect te zien van een hogere zoutconcentratie in de osmotische oplossing. Er bestaat wel een lineaire relatie tussen hydraulische druk en waterflux. Dit is in overeenstemming met lage druk nanofiltratie. Dit suggereert dat door dit membraan alleen onder hydraulische druk watertransport plaatsvindt, en er geen sprake is geweest van watertransport door middel van osmose.



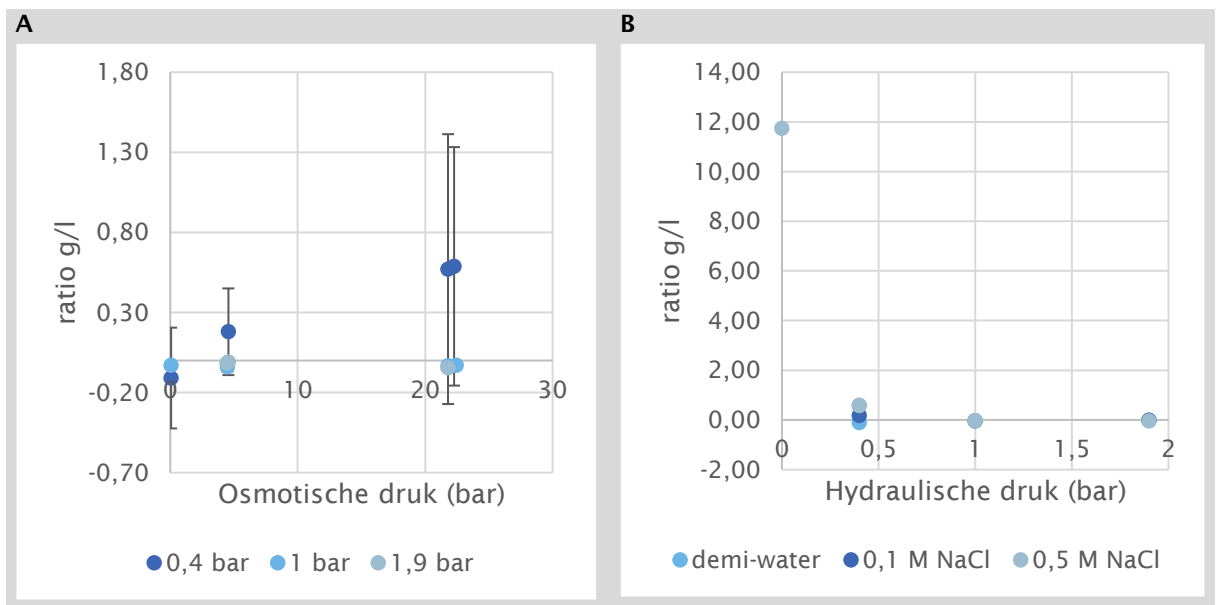
Figuur 5-2: A: Waterflux als functie van de geleidbaarheid van de osmotische oplossing (0 M=0 bar; 0,1M= 4,5 bar en 0,5 M NaCl =23 bar) en B: waterflux als functie van de hydraulische druk bij verschillende geleidbaarheden van de osmotische oplossing.

Het zoutverlies is gemeten. Een positieve waarde geeft transport aan van zout van de osmotische oplossing naar de feedoplossing. Er zijn ook negatieve waarden gevonden. Dit komt waarschijnlijk door de grote meetonzekerheid bij het meten van de volumes in de tanks. Regenwater bevat nauwelijks zout. Bij een hydraulische druk van 0,4 bar werd een hogere zoutflux gemeten bij een hogere zoutconcentratie in de osmotische oplossing. Bij een hogere hydraulische druk, was de waterflux (naar de osmotische oplossing toe) hoger, en de zoutflux (van osmotische oplossing naar feed) lager. Het principe van een lager zoutverlies door een hoger watertransport, lijkt hier dan ook te gelden (Figuur 5-3).



Figuur 5-3: zoutflux A: als functie van de geleidbaarheid van de osmotische oplossing, en B: als functie van de hydraulische druk.

De ratio van zouttransport en watertransport is weergegeven in Figuur 5-4.



Figuur 5-4: ratio van zoutflux: waterflux

Aangezien het watertransport niet toenam bij toenemende geleidbaarheid van de osmotische oplossing (toenemende osmotische druk) terwijl er bij lage hydraulische druk wel een toename van zoutflux was te zien, is het beeld in Figuur 5-3 en Figuur 5-4 hetzelfde. Het is wel interessant om te zien dat de hydraulische druk het zouttransport kan beperken. Bij een lage hydraulische druk (0,4 bar) en 23 bar osmotisch druk, wordt een ratio van 0,57 gevonden. Dit is relatief hoog in vergelijking met conventionele FO membranen waar zonder hydraulische druk bij deze osmotische druk een ratio van 0,3 – 0,5 wordt gevonden. Bij het gebruik van een ander type membraan kan de combinatie

van zowel osmotisch watertransport, als hydraulische druk misschien een betere ratio opleveren.

6 Technisch economische evaluatie

6.1 Technische evaluatie

Het is mogelijk om water te onttrekken uit een verdunde oplossing door gebruik te maken van een geconcentreerde nutriëntenoplossing. Er kan hierbij gebruik worden gemaakt van gemengde oplossingen zoals de A-Bak en B-bak, of van geconcentreerde nutriënten oplossingen. Bij gebruik van de A-Bak wordt relatief veel verlies van nitraat, ammonium en kalium gezien. Het lijkt daarom geschikter om de B-bak te gebruiken. Deze bevat alleen nitraat als monovalent ion, en verder allemaal meerwaardige ionen. Ook geconcentreerde meststoffen zijn een optie. Deze bevatten slechts 1 zout in een zeer hoge concentratie maar worden in kleinere hoeveelheden toegepast.

Het is mogelijk om de spuiroom in te dikken met een geconcentreerde nutriëntenstroom. Wanneer in tegenstroom wordt aangestroomd, kan maximaal 95% verwijdering van het water worden bereikt. Het lijkt echter efficiënter om slechts ruim 50% te verwijderen aangezien voor het verdere deel onevenredig veel membraan oppervlak nodig is. Voor een toename van waterrecovery van 53% naar 75% (factor 1,5) is een toename van 6 naar 15 modules nodig (factor 2,5) bij de gegeven omstandigheden en het FOSA model (zie Figuur 3-5). Met het de massabalans model kan geëxtrapoleerd worden dat voor het indikken van een spuiroom van 1000 m³/ha/jr bij een bedrijf van 30ha met 75% water recovery 5 modules nodig zullen zijn van 8 inch. Een aantal gewasbeschermingsmiddelen transporteert niet door het membraan, wat betekent dat de ingedikte spuiroom nabehandeld moet worden met een technologie die de middelen verwijdert, alvorens er geloosd mag worden.

Het is technisch niet mogelijk om aan de volledige vraag naar gietwater voldoen met forward osmose wanneer brak water als bron gebruikt wordt. De geconcentreerde nutriëntenoplossing kan echter wel gebruikt worden om ongeveer 20% van de gietwatervraag te onttrekken uit brak grondwater. De verdunde oplossing moet dan verder verdund worden met bijvoorbeeld regenwater.

Pressure assisted osmose liet zien dat een verhoogde hydraulische druk wel zorgde voor een verlaagd zouttransport, maar met het gebruikte membraan vond geen osmotisch watertransport plaats. Deze technologie zal verder ontwikkeld moeten worden, met name het module ontwerp, voordat het voor deze toepassing gebruikt kan worden. Daarom is het gebruik van forward osmose beter geschikt op dit moment.

6.2 Economische evaluatie

6.2.1 Economische ruimte

Wanneer FO wordt gebruikt voor het indikken van de spuiroom, kan een kleinere installatie gebruikt worden voor de nabehandeling van deze stroom. De kosten van het behandelen van spui zijn afhankelijk van de grootte van de installatie en van het type zuivering dat wordt gebruikt. Een gemiddelde van de kosten wordt gegeven in Tabel 6-1.

Tabel 6-1: Kosten voor behandeling van spuiwater ((Ruijven, Os, Staaij, & Beerling, 2013))

Oppervlak (ha)	Lozing (m ³ /ha/jaar)	Kosten (€/m ³)
5	500	3,40
5	1250	1,00
30	500	1,15
30	1250	0,60

Wanneer 75% reductie plaatsvindt, betekent dat voor een bedrijf van 30 ha met 1000 m³/ha/jr spui dat zij 22.500 m³/jr minder hoeven te behandelen. Zij kunnen daarmee een installatie met een kleinere capaciteit kopen. Dit levert een besparing op van ongeveer 9.375 euro (uitgaande van 0,60 €/m³ bij 1000 m³/ha/jr waren de kosten 18000,- € en in de nieuwe situatie met 1,15 €/m³ bij 500 m³/ha/jr zijn de kosten €8652,-).

Wanneer FO wordt ingezet voor de productie van gietwater uit brak grondwater of oppervlaktewater, kan aan ongeveer 20% van de waterbehoefte worden voorzien. In de huidige situatie wordt aanvullend gietwater geproduceerd met omgekeerde osmose (RO). Dit kost 0,60 – 0,80 €/m³. Uitgaande van een bedrijf met 30 ha en een watervraag van 10.000 m³/ha/jaar en 20% productie middels RO zijn de kosten van RO 36.000 – 48.000 €/jaar.

Voor 6 scenario's is berekend wat de totale kosten voor waterbehandeling nu zijn, die zouden wegvallen als FO geïnstalleerd wordt, zie Tabel 6-3. Dat is voor een bedrijf met een grootte van 5 of 30 ha waar wel of geen gietwaterbereiding middels RO plaatsvindt, en waar wel of geen behandeling van spuiwater plaatsvindt. Er wordt uitgegaan van 10.000 m³/ha gietwatervraag en 1000 m³/ha spuistroom. Deze 6 scenario's zijn zo gekozen dat zij een klein (5 ha) of groot (30 ha) glastuinbouw bedrijf vertegenwoordigen met een teelt met een hoge watervraag zoals tomaat (10000 m³/ha/jr).

6.2.1.1 Berekening van de huidige kosten

De huidige kosten worden bepaald door een aantal factoren:

- Bedrijfs grootte (ha)
- De watervraag (m³/ha)
- Het aandeel gietwater wat uit regenwater wordt bereid, en het deel wat vanuit een secundaire bron wordt bereid. Het gietwater wat uit een secundaire bron wordt bereid geeft kosten van de RO installatie.
- Het behandelen van de spuistroom. Dit wordt niet door alle bedrijven gedaan. De kosten hiervan zijn sterk afhankelijk van de capaciteit van de installatie.

De 6 scenario's zijn gekozen als volgt

- 2 bedrijfsgroottes: 5 en 30 ha

- Het gebruik van een secundaire bron voor 20% van de watervoorziening, of alleen gebruik van regenwater
- Het wel of niet behandelen van het gietwater.

De kosten worden als volgt berekend:

Huidige kosten = kosten RO + kosten spuiwaterbehandeling

Kosten RO = bedrijfsgrootte * gietwatervraag * (100% - % gietwater uit regenwater) * prijs RO per m³.

De kosten van RO voor een groot bedrijf (30ha) zijn 0,60€/m³ en voor een klein bedrijf (5ha) 0,80 €/m³.

Huidige kosten spuistroombehandeling = bedrijfsgrootte * spuistroomvolume* kosten spuistroombehandeling per m³.

De kosten voor spuistroombehandeling per m³ zijn sterk afhankelijk van de capaciteit van de installatie en zijn 0,60 – 3,40 €/m³, zoals te zien in Tabel 6-1. Doordat in de toekomstige behandeling minder spuiwater behandeld hoeft te worden, kan een kleinere capaciteit worden aangeschaft, maar de kosten per m³ zijn daardoor hoger.

6.2.1.2 Toekomstige kosten

In de toekomst zal RO niet worden ingezet maar wordt dat vervangen door FO. Wanneer gietwater wordt behandeld, gaan we er vanuit dat er in de toekomst 75% van het spuiwater als gietwater teruggewonnen zal worden middels FO en dat slechts 25% van de spuistroom behandeld moet worden met een installatie die daarvoor geschikt is. Hierdoor zullen de kosten voor de spuistroombehandeling afnemen, hoewel de kosten van per m³ behandeld water wel zullen toenemen. De te behandelen hoeveelheid gaat van 1000 m³/ha/jaar naar 250 m³/ha/jr en dit laat de relatieve kosten stijgen, zie Tabel 6-1.

6.2.1.3 Ruimte in kosten

De ruimte in kosten is het verschil tussen de huidige totale kosten en de kosten die in de toekomst gemaakt zullen worden voor spuistroombehandeling. Dit verschil is beschikbaar om te gebruiken voor FO. Wanneer er geen spuistroombehandeling plaatsvindt, wordt de ruimte in kosten volledig bepaald door de huidige kosten van de RO die vervangen wordt door de FO installatie.

Als een bedrijf water uit een aanvullende bron heeft, is dit volume bepalend voor de hoeveelheid die door de FO gaat. Dit water kan komen uit bijvoorbeeld grondwater, maar in het geval van spuistroombehandeling, ook spuiwater. Wanneer een bedrijf alleen spuistroombehandeling toepast, en geen aanvullende bron voor de gietwatervoorziening gebruikt, dan wordt de FO installatie alleen ingezet voor spuistroombehandeling.

De ruimte in kosten per m³ wordt berekend als de ruimte in kosten in €/jaar gedeeld door het volume wat door de FO installatie moet.

Tabel 6-2: watervolumes en kosten voor behandeling van huidige watervoorziening

scenario		1	2	3	4	5	6
Bedrijfs grootte	ha	5	5	30	30	5	30
gietwater vraag	m ³ /ha/jr	10000	10000	10000	10000	10000	10000
gietwater bereiding middels RO	Ja/ nee	ja	ja	ja	ja	nee	nee
percentage gietwater vanuit regenwater	%	80%	80%	80%	80%	100%	100%
gietwater uit secundaire bron	m ³ /jr	10000	10000	60000	60000	0	0
spuiwater behandeling	Ja/ nee	nee	ja	ne	ja	ja	ja
spuiwater hoeveelheid	m ³ /ha/jr	1000	1000	1000	1000	1000	1000
spuiwater behandeling	%	0%	75%	0%	75%	75%	75%
spuiwater behandeling	m ³ /ha/jr	0	750	0	750	750	750
spuiwater behandeld	m ³	0	3750	0	22500	3750	22500
water door FO membraan	m ³	10000	10000	60000	60000	5000	30000
Kosten RO	€/m ³	0,80	0,80	0,60	0,60	0,80	0,60
Kosten spuiwaterbehandeling groot volume	€/m ³	3,40	3,40	1,15	1,15	3,40	1,15
Kosten spuiwaterbehandeling klein volume	€/m ³						
huidige kosten (RO + spuiwater)	€/jr	8.000	13.000	36.000	54.000	5.000	18.000
toekomstige kosten spuiwaterbehandeling	€/jr		4250		8625	4250	8625
Ruimte in kosten	€/jr	8.000	8.750	36.000	45.375	3750	9.375
ruimte in kosten	€/m ³	0,80	0,88	0,60	0,76	0,15	0,31

6.2.2 Kostenberekening

De kosten van een fullscale installatie van FO zijn nog niet goed bekend. Er zijn nog weinig fullscale installaties gebouwd. Er wordt verondersteld dat de kosten van de membranen ongeveer 1/4^e van de totale kosten van de FO installatie zijn. Bij grote installaties (bijvoorbeeld 100.000 m³/dag) zijn de kosten ongeveer 1/3^e van de totale prijs, bij een klein systeem als bij een tuinder, zijn de membranen relatief gezien een kleiner deel van de kosten (mondellinge communicatie met Blue-Tec en (Valladares Linares et al., 2016).

De Toray membranen zoals gebruikt in de experimenten kosten bij de leverancier

- 4 inch module: €1250,00
- 8 inch module: €2500,00

Er wordt verondersteld dat wanneer spuiwater behandeld wordt, dit een mindering geeft in de hoeveelheid gietwater die aanvullend bereid moet worden uit grondwater (of een andere bron). Het totale membraan blijft daarmee gelijk (of zelf kleiner doordat

spui een lagere osmotische druk heeft dan brak grondwater. Het osmotisch drukverschil met de nutriëntenoplossing is dan groter en de drijvende kracht is dan groter), terwijl er wel kosten bespaard kunnen worden op de spuiwaterbehandeling.

Het aantal modules is berekend door het aantal benodigde modules in meestroom te berekenen met het massabalans model en aan te nemen dat er in tegenstroom slechts 60% van deze modules nodig is bij tegenstroom. Het aantal benodigde modules is berekend door uit te gaan van de volgende getallen:

- Membraan oppervlak 4 inch module: 3.2m², 8 inch module 14,4 m²
- Osmotische oplossing: 100 m³/ha/jr, osmotische druk: 47.9 bar
- Spuistroom: 1000 m³/ha/jr, 1,2 bar → 75% recovery
- Secundaire gietwaterbron: onbeperkt volume, 1,95 bar
- Gietwater: na verdunnen van de osmotische oplossing wordt gietwater gevormd. Dit moet uiteindelijk een stroom zijn die 20% is van de totale watervraag.

Tabel 6-3: Kosten voor een FO systeem bij bovenstaande scenarios

scenario		1	2	3	4	5	6
benodigd aantal modules in tegenstroom met zoutlek	4 inch	14	14	81	81	4	24
benodigd aantal modules in tegenstroom met zoutlek	8 inch	3	3	18	18	1	6
Kosten membranen 4 inch	€	17500	17500	101250	101250	5000	30000
Kosten membranen 8 inch	€	7500	7500	45000	45000	2500	12500
Kosten 8 inch modules per jaar	€/jaar	750	750	4500	4500	250	1500
membraankosten per m ³	€/m ³	0,08	0,08	0,08	0,08	0,05	0,04
Kosten FO systeem per m ³	€/m ³	0,30	0,30	0,30	0,30	0,20	0,20

Tabel 6-3 geeft aan per scenario hoeveel modules nodig zijn om in de productie van 20% gietwater te voorzien uit een alternatieve bron. Er wordt verondersteld dat membranen iedere 10 jaar vervangen moeten worden. Gezien het membraan oppervlak wat nodig is, lijkt het logisch om membraan modules van 8 inch te nemen. De hoeveelheid modules is naar boven afgerond op hele modules. Dat kan betekenen dat de laatste module maar voor een klein deel effectief gebruikt wordt.

Bij de berekening van het benodigd membraanoppervlak is er vanuit gegaan dat er continu gebruik wordt gemaakt van de FO installatie. Wanneer er voor gekozen wordt om het water te produceren gedurende een kortere periode, is het benodigd membraan oppervlak groter. Dit is gewenst aangezien het niet logisch is om de FO installatie te gebruiken op het moment dat het regenwater bassin erg vol zit in de winterperiode, terwijl juist in de drogere zomerperiode met een hoge watervraag, er behoefte is aan een hoge productie van gietwater. Wanneer er vanuit gegaan wordt dat gedurende 6 maanden in de winterperiode 20% van de nutriënten wordt gegeven, kan de overige 80% gebruikt worden als osmotische oplossing voor in de maanden dat aanvullend gietwater nodig is. Doordat er nu echter minder drawoplossing aanwezig is dan in de eerdere berekeningen, kan slechts aan 16% van de totale watervraag voldaan worden (t.o.v. 20% bij jaarrond productie). Er wordt verondersteld dat de spuiwaterstroom

behandeld wordt in de winterperiode. Hierdoor kan bij een installatie die even groot is, aan een groter deel van de watervraag worden voldaan. Er wordt dan 20% van de nutriëntenoplossing gebruikt voor het indikken van de spuistroom. Dit kan dan ingedikt worden met ongeveer 40% recovery van de spuistroom. De totale waterproductie is dan alsnog 20% van de totale watervraag.

Tabel 6-4: Kosten voor FO systeem wat in 6 maanden per jaar aanvullend gietwater verzorgt

scenario		1	2	3	4
benodigd aantal modules in tegenstroom met zoutlek	4 inch	23	16	138	91
benodigd aantal modules in tegenstroom met zoutlek	8 inch	7	4	38	21
Kosten membranen 4 inch		28750	20000	172500	113750
Kosten membranen 8 inch		17500	10000	95000	52500
Kosten membranen per jaar		1750	1000	9500	5250
Productie door FO per jaar	m ³	8301	10000	48654	60000
membraankosten per m ³	€/m ³	0,21	0,10	0,20	0,09
Kosten FO systeem per m ³	€/m ³	0,84	0,40	0,78	0,35

Wanneer geen gietwater wordt geproduceerd uit een aanvullende bron, kan de spuiwaterstroom tijdens het hele jaar behandeld worden door de FO installatie. Scenario 5 en 6 zijn daarom niet berekend voor toepassing van de installatie gedurende 6 maanden.

6.2.3 Evaluatie

De financiële ruimte in kosten voor de scenario's waarbij gietwater wordt bereid met en zonder spuiwaterbehandeling is 0,60 – 0,88 €/m³. Wanneer er gedurende een half jaar gietwater wordt geproduceerd uit een aanvullende bron, en eventueel daarnaast tijdens het andere half jaar met dezelfde installatie ook spuiwater wordt behandeld, zijn de kosten voor het FO systeem 0,35 – 0,84 €/m³. Dat betekent dat het haalbaar lijkt om de gietwatervoorziening middels RO te vervangen door een FO systeem. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat maximaal 20% van het gietwater gemaakt kan worden via FO met een waterbron met een osmotische druk van 1,95 bar. Bij gebruik van een waterbron die zouter is, kan minder water worden geproduceerd, bij een minder zoute bron kan meer geproduceerd worden.

Wanneer spuiwater wordt ingedikt met een FO systeem, blijven er nog steeds kosten voor de behandeling van het ingedikte water. Deze kosten zijn relatief hoog. Dit zorgt ervoor dat de ruimte voor de kosten van het FO systeem beperkt is. De ruimte is 0,15 – 0,31 €/m³ terwijl de kosten van het systeem 0,20 €/m³ zijn bij een waterterugwinning van 75%. Bij een groot bedrijf van 30ha kan het economisch interessant zijn om een FO systeem te installeren. Wanneer de kosten van een waterbehandelingsstelsel gelijk blijven per m³ (wat bij kleinere capaciteit niet waarschijnlijk is) is de ruimte in kosten voor het FO systeem 0,75 €/m³ voor het bedrijf van 5ha en 0,45 €/m³ voor het bedrijf van 30ha en kan het dus financieel interessant zijn om spuiwater in te dikken met een FO systeem.

In de berekening van de kosten is gebruik gemaakt van een berekening van het aantal modules gebaseerd op het massabalansmodel, waarbij een meestroom systeem met

zoutlek berekend werd. Het aantal benodigde modules is vervolgens 40% lager verondersteld voor een tegenstroomsysteem met zoutlek. Dit is echter niet modelmatig berekend.

7 Conclusies en aanbevelingen

Er zijn verschillende bronnen beschikbaar die als voedingsoplossing kunnen dienen in de tuinbouw, zoals (brak) grondwater en oppervlaktewater. Als osmotische oplossing kan een geconcentreerde nutriëntenoplossing gebruikt worden. Dit kan een mengsel van verschillende componenten zijn, zoals een A-bak en een B-bak, of een geconcentreerde nutriëntenoplossing die bestaat uit vloeibare meststoffen met slechts één component. Het wordt aanbevolen om ook met andere oplossingen testen te doen en dan met name het zoutverlies te monitoren.

Er zijn drie modellen ontwikkeld waarmee het benodigde membraan oppervlak berekend kan worden voor het terugwinnen van water uit een spuiwaterstroom of voor de productie van gietwater uit een secundaire waterbron. Twee van de modellen kunnen alleen een meestroom-opstelling berekenen, terwijl het derde model ook een tegenstroom-opstelling kan berekenen. In de meestroom modellen wordt een zoutlek meegenomen, terwijl dat in het tegenstroom model niet gebeurt. Door het combineren van de resultaten van de modellen, kan het benodigd aantal modules van een tegenstroom-opstelling met zoutlek geschat worden. Aanbevolen wordt om een tegenstroom model te ontwikkelen waarin ook het zoutlek wordt meegenomen.

De laboratoriumexperimenten laten zien dat met het gebruikte Toray membraan een hoge waterflux kan worden behaald. Er wordt echter ook een verlies van nutriënten gezien. Wanneer geen demi-water maar een zoutere oplossing, zoals zout grondwater, als feed-oplossing wordt gebruikt, treedt er zelfs extra verlies van kalium en ammonium op. Dit is ongewenst. Het gebruik van de B-bak, waar zich voornamelijk meerwaardige ionen in bevinden zal mogelijk een lager verlies van nutriënten geven. Doordat de osmotische druk van deze oplossing lager is, zal er echter ook minder water gewonnen kunnen worden uit de bron. Aanbevolen wordt om dit te onderzoeken.

Een aantal gewasbeschermingsmiddelen transporteert door het FO membraan. Echter niet alle middelen transporteren. Dat betekent dat de ingedikte spuiwaterstroom alsnog behandeld moet worden met een nabehandeling. Deze kan echter wel een kleinere capaciteit hebben dan in de huidige situatie.

Pressure assisted forward osmose heeft in de pilot geen voordeel opgeleverd ten opzichte van forward osmose. Het systeem gedroeg zich als een nanofiltratiesysteem, en van osmotisch watertransport was geen sprake. Er moet verder onderzocht worden of deze systeemconfiguratie voor deze toepassing een voordeel biedt.

Uit de economische analyse blijkt dat het gebruik van forward osmose voor de productie van aanvullend gietwater een financieel interessant alternatief kan zijn voor de productie van gietwater middels RO. Wanneer het FO systeem het hele jaar gebruikt wordt, maar ook wanneer het systeem groter ontworpen wordt zodat in 6 maanden per jaar gietwater gemaakt kan worden, is het potentieel goedkoper dan RO. Het terugwinnen van water uit de spuiwaterstroom is alleen financieel interessant wanneer het bedrijf groot is (30ha) of de kosten voor spuiwaterbehandeling niet veel hoger worden ondanks de kleinere capaciteit van het benodigde systeem. Het gecombineerd gebruik van het FO systeem voor zowel gietwaterbereiding uit een secundaire bron, als

het behandelen van de spuistroom met hetzelfde systeem, is financieel het meest interessant, zowel voor kleine als grote bedrijven.

8 Referenties

- Appelman, W., Creusen, R., Koeman, N., Paalman, M., Raterman, B., & Voogt, W. (2014). *Vergroten zelfvoorzienendheid watervoorziening glastuinbouw : watervraag glastuinbouw Haaglanden : deelrapport A*. Retrieved from
- Awad, A. M., Jalab, R., Minier-Matar, J., Adham, S., Nasser, M. S., & Judd, S. J. (2019). The status of forward osmosis technology implementation. *Desalination*, 461, 10-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.03.013>
- Beerling, E. A. M., Blok, C., Van Der Maas, A. A., & Van Os, E. A. (2014) Closing the water and nutrient cycles in soilless cultivation systems. In: *Vol. 1034. Acta Horticulturae* (pp. 49-55).
- Blandin, G., Myat, D. T., Verliefe, A. R. D., & Le-Clech, P. (2017). Pressure assisted osmosis using nanofiltration membranes (PAO-NF): Towards higher efficiency osmotic processes. *Journal of Membrane Science*, 533, 250-260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.03.048>
- Blandin, G., Verliefe, A. R. D., Tang, C. Y., Childress, A. E., & Le-Clech, P. (2013). Validation of assisted forward osmosis (AFO) process: Impact of hydraulic pressure. *Journal of Membrane Science*, 447, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.002>
- Boogerd, F. C., & Graaf, E. R. T. d. (2013). Kwaliteit en samenstelling regenwater en kosteneffectiviteit van zuivering *WT.Afvalwater*, 13(6), 303-314.
- Cath, T. Y., Childress, A. E., & Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 281(1), 70-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.048>
- Chekli, L., Kim, J. E., El Saliby, I., Kim, Y., Phuntsho, S., Li, S., . . . Kyong Shon, H. (2017). Fertilizer drawn forward osmosis process for sustainable water reuse to grow hydroponic lettuce using commercial nutrient solution. *Separation and Purification Technology*, 181, 18-28. doi:10.1016/j.seppur.2017.03.008
- Cornelissen, E. R., Harmsen, D., de Korte, K. F., Ruiken, C. J., Qin, J.-J., Oo, H., & Wessels, L. P. (2008). Membrane fouling and process performance of forward osmosis membranes on activated sludge. *Journal of Membrane Science*, 319(1), 158-168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.03.048>
- Gezonde Groei, Duurzame Oogst, Tweede nota duurzame gewasbescherming periode 2013 tot 2023*. (mei 2013). Retrieved from
- Jurgens, R., Appelman, W., Kuipers, N., Feenstra, L., Creusen, R., Os, E. v., . . . Balendonck, J. (2010). *Glastuinbouw Waterproof ; WP5: Haalbaarheidstudie zuiveringstechnieken restant- water substraatteelt* (TNO-034-UT-2010-02389). Retrieved from
- Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit. (2017). Retrieved from <http://www.natuurkennis.nl/index.php?hoofdgroep=6&niveau=3&id=6>
- Kim, J. E., Phuntsho, S., Ali, S. M., Choi, J. Y., & Shon, H. K. (2018). Forward osmosis membrane modular configurations for osmotic dilution of seawater by forward osmosis and reverse osmosis hybrid system. *Water Research*, 128, 183-192. doi:10.1016/j.watres.2017.10.042
- Kim, J. E., Phuntsho, S., Lotfi, F., & Shon, H. K. (2015). Investigation of pilot-scale 8040 FO membrane module under different operating conditions for brackish water desalination. *Desalination and Water Treatment*, 53(10), 2782-2791. doi:10.1080/19443994.2014.931528
- Lutchmiah, K., Verliefe, A. R. D., Roest, K., Rietveld, L. C., & Cornelissen, E. R. (2014). Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review. *Water Research*, 58, 179-197. doi:10.1016/j.watres.2014.03.045

- Mondal, S., Field, R. W., & Wu, J. J. (2017). Novel approach for sizing forward osmosis membrane systems. *Journal of Membrane Science*, *541*, 321-328. doi:10.1016/j.memsci.2017.07.019
- Phuntsho, S., Kim, J. E., Johir, M. A. H., Hong, S., Li, Z., Ghaffour, N., . . . Shon, H. K. (2016). Fertiliser drawn forward osmosis process: Pilot-scale desalination of mine impaired water for fertigation. *Journal of Membrane Science*, *508*, 22-31. doi:10.1016/j.memsci.2016.02.024
- Ruijven, J. v., Os, E. v., Blok, C., & Beerling, E. (2016). *Standaard Water voor toetsing zuiveringstechnologie voor de glastuinbouw, Versie 2: geldend vanaf 1 Januari 2016*. Retrieved from
- Ruijven, J. v., Os, E. v., Staaij, M. v. d., & Beerling, E. (2013). *Evaluatie zuiveringstechniek voor de verwijdering van gewasbeschermingsmiddelen uit lozingswater glastuinbouw*. Retrieved from
- Sanchez, M. F., Klein, J., Oude Essink, G., Raat, K., & Paalman, M. (2012). *Effecten van brijninjectie op de grondwaterkwaliteit en functies in het Westland* (1205897-000-BGS-0007/2012.096). Retrieved from
- Sauchelli, M., Pellegrino, G., D'Haese, A., Rodríguez-Roda, I., & Gernjak, W. (2018). Transport of trace organic compounds through novel forward osmosis membranes: Role of membrane properties and the draw solution. *Water Research*, *141*, 65-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.003>
- Valladares Linares, R., Li, Z., Yangali-Quintanilla, V., Ghaffour, N., Amy, G., Leiknes, T., & Vrouwenvelder, J. S. (2016). Life cycle cost of a hybrid forward osmosis – low pressure reverse osmosis system for seawater desalination and wastewater recovery. *Water Research*, *88*, 225-234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.017>

Bijlage I Proces Flow diagram pilot

Process Flow Diagram van Pressure Assisted Osmosis pilot

