



EXPERIMENTEEL ONDERZOEK NAAR BRAKWATERONTZILTING

Laboratoriumexperimenten en numerieke evaluatie van
brakwaterontziltling voor het Zeeuws Deltaplan Zoet Water

HZ WATER TECHNOLOGY
29 NOVEMBER 2022

EXPERIMENTEEL ONDERZOEK NAAR BRAKWATERONTZILTING

Laboratoriumexperimenten en numerieke evaluatie
van brakwaterontziltting voor het Zeeuws Deltaplan
Zoet Water

IARIMA SILVA MENDONCA, HANS CAPPON, MIREILLE MARTENS
HZ ONDERZOEKSGROEP WATERTECHNOLOGIE

MIDDELBURG, 29 NOVEMBER 2022

(VERTALING UIT HET ENGELS)

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 - Omgekeerde osmose systeem met daarin de belangrijkste onderdelen	5
Figuur 2 - Omgekeerde osmose systeem (close-up)	6
Figuur 3 - Het elektrolysesysteem en componenten	8
Figuur 4 - Elektrolyse stack.....	9
Figuur 5 - Geleidbaarheid van RO-permeaat bij 5 en 6 bar voor synthetisch en oppervlaktewater	12
Figuur 6 - Rendement van productwater van RO bij 5 en 6 bar voor synthetisch en oppervlaktewater ..	13
Figuur 7 Geleidbaarheid van ED-permeaat bij 10 V stackspanning voor synthetisch en oppervlaktewater	14
Figuur 8 - Toegepaste druk die nodig is voor 50% Het rendement van productwater voor verschillende voedings-EC's	15
Figuur 9 - Variatie in de EC van het permeaat met de EC van de voeding voor 50% Het rendement van productwater	15
Figuur 10 - Effect van de druk op het specifieke energieverbruik op RO en NF	16
Figuur 11 - Specifieke energie en oppervlakte voor 50% Het rendement van productwater voor verschillende voedingsstromen	16
Figuur 12 -Effect van de voedings-EC op het specifieke energieverbruik bij ED bij lineaire stroomsnelheid	17
Figuur 13 - Vergelijking van het energieverbruik voor NF, RO en ED	19

INHOUD

1. INLEIDING EN ACHTERGROND	4
2. METHODEN	5
2.1 Laboratoriumexperimenten	5
2.1.1 Omgekeerde Osmose	5
2.2.2 Elektrodialyse	8
2.2 numerieke analyses	9
2.2.1 Omgekeerde osmose en nanofiltratie	10
2.2.2 Elektrodialyse	10
2.3 model voor technologievergelijking en output	11
3. RESULTATEN	12
3.1 Laboratoriumexperimenten	12
3.1.1 Omgekeerde Osmose	12
3.1.2 Elektrodialyse	13
3.2 Numerieke analyses	14
3.2.1 Omgekeerde osmose en nanofiltratie	14
3.2.2 Elektrodialyse	17
3.2.3 TechnologievergelijkinG	18
4. BIBLIOGRAFIE	20
BIJLAGE A	21
A.1 Gegevens en resultaten van laboratoriumexperimenten	21
BIJLAGE B	23
B.1 Gedetailleerde modelleringsprocedures	23
BIJLAGE C	29
C.1 Membraanvervuiling en reinigingsprotocol	29

1. INLEIDING EN ACHTERGROND

Tijdens het programma Zeeuws Deltaplan Zoet Water (ZDZW) is de haalbaarheid van ontzilting van oppervlaktewater voor irrigatiegebruik onderzocht. Het volledige onderzoek omvatte het onderzoek naar waterontzilting met verschillende technologieën, gericht op de eindkwaliteit, de kosten die het proces met zich meebrengt en de operationele voorwaarden (Cappon et al., 2022). Dit specifieke rapport behandelt het onderzoek van drie ontziltingstechnologieën, omgekeerde osmose (RO), nanofiltratie (NF) en elektrolyse (ED), met betrekking tot hun haalbaarheid voor waterontzilting. Daartoe werden de bereikte waterkwaliteit, de hoeveelheid water en de vereiste energie voor elke technologie onderzocht.

RO, NF en ED zijn allemaal membraanfiltratietechnologieën die het zout uit het voedingswater kunnen scheiden om als product minder zout water te verkrijgen. Dit laatste kan dan worden gebruikt voor irrigatie. Een belangrijk verschil is dat RO en NF druk gebruiken om de filtratie mogelijk te maken, terwijl voor ED elektrische stroom nodig is. Dit is een belangrijk punt van overweging bij de analyse van de betrokken kosten en de financiële haalbaarheid, aangezien een deel van deze kosten verband houdt met het energieverbruik van de technologieën.

Om de efficiëntie van de waterontzilting door die technologieën, dat wil zeggen de verwijdering van zout uit water, te analyseren, werd een belangrijke parameter gebruikt, namelijk het elektrisch geleidend vermogen (EGV) of kortweg de geleidbaarheid (EC). De geleidbaarheid meet hoe goed een oplossing elektriciteit geleidt en is gerelateerd aan de hoeveelheid ionen die het water bevat, tot een bepaalde bovengrens in concentratie (Gray, 2004). Voor dit onderzoek en dit verslag wordt de EC gebruikt als maat voor de hoeveelheid zout die in het water is opgelost. Daarom moet het water dat het uit de ontzilting komt een lagere EC hebben dan de voeding.

Bij de ontzilting van water wordt de voeding, in dit geval brak water, gescheiden in twee stromen: het concentraat en het permeaat. Het concentraat wordt ook wel brijn genoemd, omdat hier het zout uit het voedingswater wordt verwijderd. Het permeaat is het beoogde product, dat wil zeggen het ontzilte water. In ED wordt het productwater diluaat genoemd. Het permeaatwater (of diluaatwater) waarover in dit verslag wordt gesproken, is dus het water dat wordt hergebruikt voor irrigatiedoeleinden.

Door gebruik te maken van de hierboven geïntroduceerde concepten en met het doel de haalbaarheid van ontzilting te onderzoeken, werd deze studie uitgevoerd in twee verschillende experimentele vormen: laboratoriumproeven voor RO en ED, en computersimulaties voor RO, NF en ED. De laboratoriumexperimenten hadden tot doel de capaciteit van RO en ED voor het ontzilten van oppervlaktewater van verschillende locaties in Zeeland te testen. Daarom werd voor een bepaalde operationele conditie de hoeveelheid en de kwaliteit van het teruggewonnen water onderzocht. Om aan de kwaliteitsnormen voor irrigatiewater te voldoen, moest de geleidbaarheid van het permeaat tussen 1,5 en 2,0 mS/cm liggen. Een ander belangrijk punt is dat de hoeveelheid teruggewonnen water ten minste 50% moest bedragen van de hoeveelheid die het systeem binnenkwam (de zgn. recovery).

Voor de simulaties werd dezelfde drempelwaarde voor de permeaatkwaliteit en -hoeveelheid gehanteerd. Deze simulaties werden gebruikt als vergelijkingsinstrument voor de resultaten van de laboratoriumproeven, maar ook als middel voor extrapolatie, aangezien de laboratoriumproeven werden uitgevoerd onder specifieke operationele omstandigheden en dus beperkt waren. Daarnaast omvatten deze simulaties ook een raming van het energieverbruik voor elke technologie en operationele instelling. Het energieverbruik is van cruciaal belang vanwege de bijdrage aan de totale kosten van ontzilting.

Ten slotte zijn de resultaten van deze studie, die in dit rapport worden gepresenteerd, gebruikt in een rekenmodule in het ZDZW project, waarin kostenramingen voor waterontzilting worden berekend. Die resultaten worden gepresenteerd in het eindrapport *Eindrapport ZDZW Ontzilting van brak water voor irrigatie* (Cappon et al., 2022).

2. METHODEN

Om de ontzilting van brak water te analyseren moet worden onderzocht in hoeverre ontzilting mogelijk en haalbaar is vanuit praktisch en financieel oogpunt. Daartoe zijn laboratoriumexperimenten uitgevoerd en is ook een eenvoudig model gebouwd. Beide worden hier gepresenteerd.

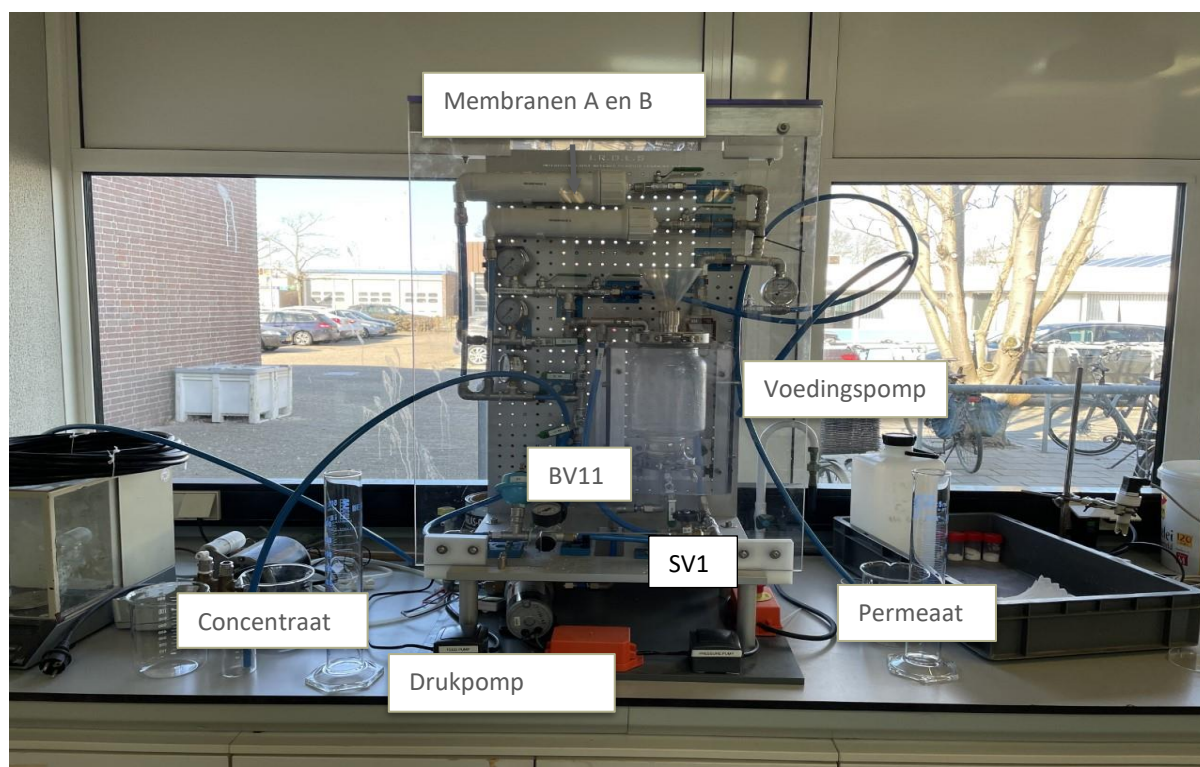
2.1 LABORATORIUMEXPERIMENTEN

De praktijkexperimenten werden uitgevoerd in het Ecologisch Laboratorium van de Hogeschool Zeeland (HZ). Voor dit deel van het onderzoek werd brak water bemonsterd in drie gebieden in de provincie Zeeland: Zuid-Beveland, Noord-Beveland en Schouwen-Duiveland en de ontzilting ervan werd getest met twee technologieën: omgekeerde osmose (RO) en elektrodialyse (ED) (Cappon et al., 2022).

Aangezien het de bedoeling is beide technologieën te vergelijken, is de procedure voor beide in de basis vergelijkbaar. Er werden eerst experimenten uitgevoerd met synthetisch brak water en vervolgens de eigenlijke ontziltingsproeven met oppervlaktewater. De ontziltingsproeven werden uitgevoerd met oppervlaktewater met een EC tot 8 mS/cm. Dit bereik werd gekozen vanwege de beperkingen van de beschikbare systemen.

2.1.1 OMGEKEERDE OSMOSE

Omgekeerde osmose (RO) werd als eerste getest. Het gebruikte RO-systeem is weergegeven in Figuur 1, waarin ook de belangrijkste onderdelen worden benoemd.



Figuur 1 - Omgekeerde osmose systeem met daarin de belangrijkste onderdelen

Het systeem bestaat uit twee brakwater-RO-modules, in figuur 1 aangeduid als A en B. De drukpomp, die zich aan de onderkant van het systeem bevindt, is verantwoordelijk voor het op druk brengen van het systeem en het mogelijk maken van het ontziltingsproces. De twee stromen die de membranen verlaten, namelijk permeaat en concentraat, worden via slangen elk naar een kant van het systeem getransporteerd. De membranen zijn in een parallelle configuratie opgesteld, hetgeen betekent dat zij dezelfde prestaties moeten leveren; hun effluentstromen worden dan verbonden bij het verlaten van de membraanmodules. De kleppen BV11 (kogelkraan nummer 11) en SV1 (veerklep nummer 1) worden gebruikt om druk in de module op te bouwen. Dit komt omdat BV11 een recirculatieklep is, waarmee de stroom kan worden geregeld voordat deze de modules binnenkomt (de klep bevindt zich tussen de pomp en de membraaninlaat). Klep SV1 bevindt zich aan de uitgang van het concentraat van beide membraanstromen; door deze klep gedeeltelijk te sluiten wordt de druk op het systeem verhoogd. Hoewel niet zichtbaar op de foto, bevindt zich aan de achterkant van het systeem een voorfiltratieset, alsmede de voedingspomp, die het voorgefilterde water naar de voedingstank transporteert. Figuur 2 geeft een gedetailleerder beeld van het systeem.



Figuur 2 - Omgekeerde osmose systeem (close-up)

Zoals reeds gezegd, werden de kenmerken en prestaties van het systeem vóór de start van de ontziltingsproeven bepaald door het testen van synthetisch water (alleen NaCl toegevoegd aan gedemineraliseerd water) bij verschillende zoutgehaltenes (0,5 tot 8,0 mS/cm). Het doel van deze tests

was de operationele omstandigheden voor de ontziltingsproeven te bepalen en een indicatie te krijgen van hoe de technologieën zouden presteren met oppervlaktewater.

Voor de ontzoutingsexperimenten werd oppervlaktewater (~20,0 L) verzameld uit sloten in de buurt van de deelnemers. Het is belangrijk te vermelden dat het zoutgehalte op deze locaties enorm varieert. Daarom werd de locatie van het watermonster zodanig gekozen dat het representatief was binnen het te testen bereik, dus < 8 mS/cm.

Het oppervlaktewater moest worden voorbehandeld voordat het de RO-modules in ging. Daarom werd het monster gefilterd met de set voorfilters die zich achterin het RO-systeem bevinden. Deze set bevat een zwaar sediment filter (5 µm), een koolstofblok (5 µm) en een ultrafiltratiemembraan (0,1 µm). De voorfiltratie werd gebruikt om te voorkomen dat vaste deeltjes en organische stoffen, aanwezig in het water, de RO-membranen beschadigen. Voordat het water de RO-modules binnengaat, werd de EC van het voedingswater gemeten. Deze stap kan zowel voor als na de voorfiltratie worden uitgevoerd, aangezien het zout niet door deze filters wordt verwijderd. Hiervoor werd een draagbare EC-meter van het merk HANNA Instruments® gebruikt.

Na deze fase werd het eigenlijke ontziltingsproces uitgevoerd. Het voorgefilterde water werd in de 3 liter tussenbuffer gepompt en vervolgens naar het RO-systeem gepompt. De druk werd geregeld met kleppen BV11 en SV1, en de proeven werden uitgevoerd bij 5 en 6 bar, zoals bij de experimenten met synthetisch water was vastgesteld. Aangezien het systeem geen debietmeter heeft, werden het verzamelde volume permeaat en concentraat gemeten, alsmede de filtratietijd. Vergelijking 1 werd vervolgens gebruikt om het influent- en effluentdebiet te berekenen:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Waarbij,

$Q = \text{debiet (L/min)}$

$V = \text{volume (permeaat, concentraat en som (voeding)) (L)}$

$t = \text{tijd (min)}$

Ook werden de EC van het permeaat en het concentraat gemeten. Met deze metingen kon worden nagegaan of het productwater binnen het gewenste EC-bereik lag en of er voldoende water was teruggewonnen. Ook kon zo, voor onderzoeksdoeleinden, de hoeveelheid zout worden berekend die werd tegengehouden (retentie). Voor de berekening van het percentage teruggewonnen water en het percentage EC-retentie werden respectievelijk vergelijking 2 en 3 gebruikt.

$$W_{REC} = \frac{Q_{PERM}}{Q_{FEED}} \times 100\% \quad (2)$$

Waarbij,

$W_{REC} = \text{rendement van productwater (\%)}$

$Q_{PERM} = \text{permeaatdebiet (L/min)}$

$Q_{FEED} = \text{voedingsstroom (L/min)}$

$$EC_{REJ} = \left(1 - \frac{EC_{PERM}}{EC_{FEED}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

Waarbij,

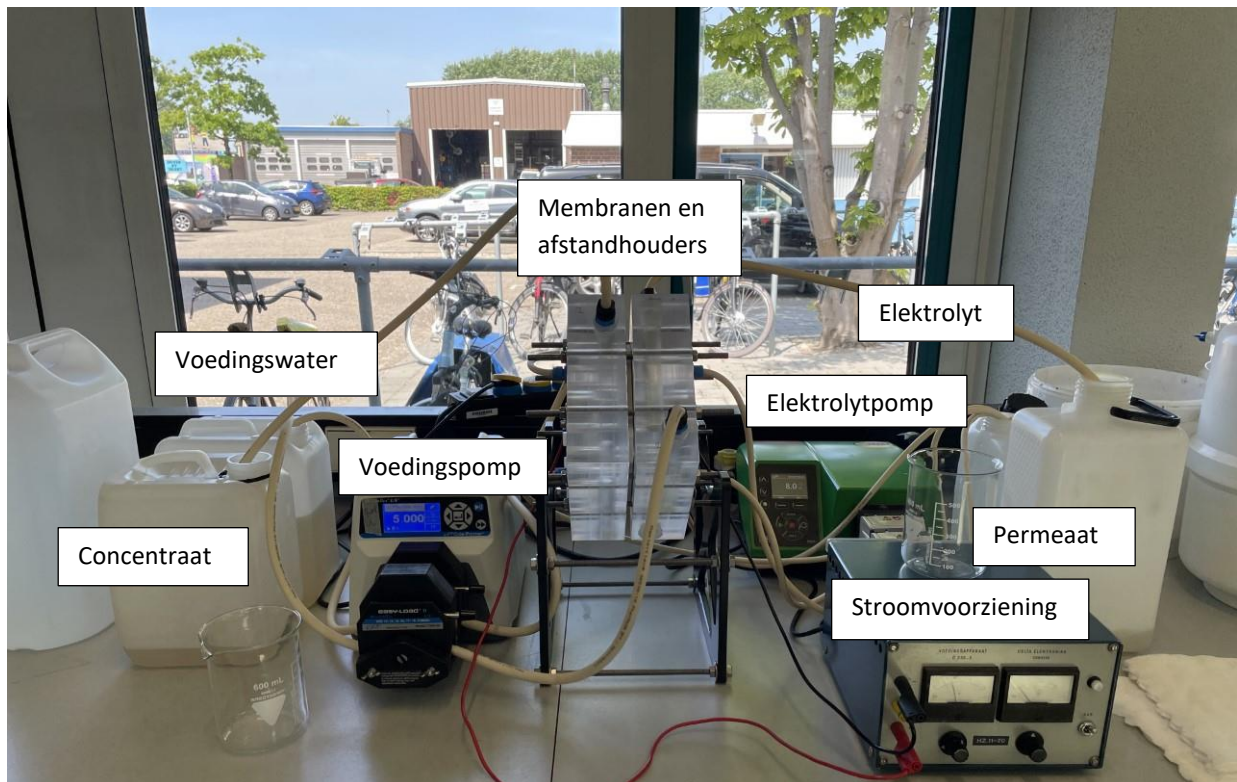
EC_{REJ} = zoutverwijdering (%)

EC_{PERM} = permeaat EC (mS/cm)

EC_{FEED} = voedings EC (mS/cm)

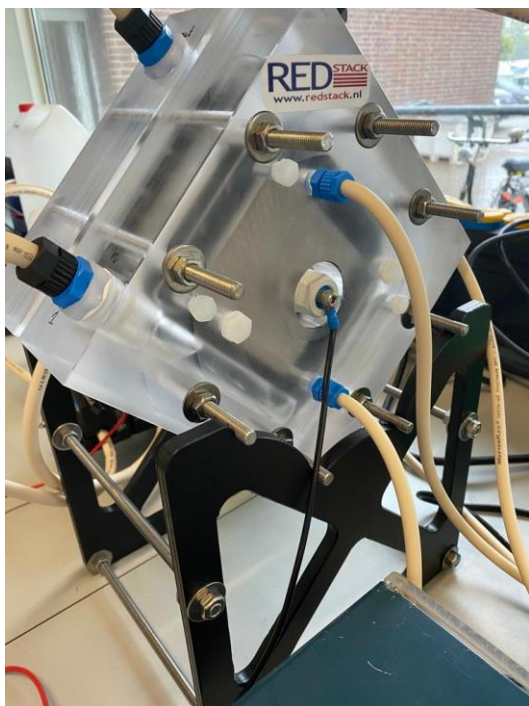
2.2.2 ELEKTRODIALYSE

De componenten van het elektrodialysesysteem zijn weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 - Het elektrodialysesysteem en componenten

In het midden van de foto bevindt zich de ED stack die de membranen bevat; dit zijn elektrostatisch geladen membranen en hiertussen vindt de ontzilting plaats. Anders dan bij de RO is er een stroomvoorziening die verantwoordelijk is voor de elektrische stroom en vervolgens voor de ontzilting door de scheiding van zout en water. Om het proces van stroom te voorzien, wordt de elektrische voeding met draden verbonden met elektroden aan weerszijden van de ED stack. Het ED-systeem heeft ook een extra zoutoplossing nodig: het elektrolyt. Deze wordt gebruikt om ionen te leveren voor een betere en snellere reactie bij de elektroden. De gebruikte oplossing was een 0,15 M Na_2SO_4 , aangezuurd met H_2SO_4 , tot pH 3. Evenals de RO had ook dit systeem een permeaat (in feite: diluaat) en een concentraat. De membraanstack, van de firma REDStack, is beter te zien in figuur 4.



Figuur 4 - Elektrodialyse stack

Zoals eerder al aangegeven was de algemene procedure vergelijkbaar voor zowel RO als ED, het verschil zit in de karakteristieken van de technologieën zelf. Daarom werd ook een test met synthetisch water uitgevoerd met ED en werd het oppervlaktewater voorbehandeld, voordat het de ED in ging.

De elektrodialyse werkte met een spanning van 10 V. In tegenstelling tot de RO zijn er twee voedingsopeningen naar de stack, die, na door de ED-eenheid te zijn gegaan, resulteren in het diluaat en het concentraat. Hoewel er twee ingangen zijn, werd dezelfde oplossing gebruikt. Een ander punt is dat het debiet geregeld kon worden, zodanig dat de terugwinning (recovery) ook hier 50% was; het volume permeaat en concentraat was dus gelijk, en hun som kwam overeen met het voedingsdebiet (in L/min).

De EC van voeding, permeaat en concentraat werd gemeten. De EC van het permeaat werd beoordeeld aan de hand van de gewenste waarde voor irrigatiewater. De EC-retentie werd berekend met vergelijking (3).

2.2 NUMERIEKE ANALYSES

Zoals gezegd werden de laboratoriumexperimenten uitgevoerd in een EC-bereik van 2 - 8 mS/cm. Volgens Martens et al., 2022 heeft het oppervlaktewater in Zeeland doorgaans een hogere EC-waarde dan in het gespecificeerde bereik (tot 8,0 mS/cm), vooral in de zomer. Verschillende gebieden bleken oppervlaktewater te hebben met een EC van ongeveer 20 mS/cm, maar de betrokkenen wilden het toch laten ontzilten.

Daarom werden, om meer variërende influentomstandigheden mee te nemen, computersimulaties uitgevoerd en werd een eenvoudig model gebouwd. Naast RO en ED werden voor dit deel van het onderzoek ook nanofiltratie (NF) membranen meegenomen. Rekening houdend met de werkelijke zoutconcentratie van het oppervlaktewater rond de locaties van de betrokkenen en de hoeveelheid water die nodig is voor hun landbouwdoeleinden, werden een EC-bereik van 4 - 20 mS/cm en een

voedingsdebiet tussen 2 en 20 m³ /h gebruikt. De simulaties werden ook gebruikt ter controle van de resultaten in het experimentele deel van het onderzoek.

2.2.1 OMGEKEERDE OSMOSE EN NANOFILTRATIE

De RO en NF simulaties werden uitgevoerd met Water Application Value Engine (WAVE) software van Dupont™. WAVE is geavanceerde modelsoftware voor het ontwerpen van waterbehandelingsinstallaties (Dupont, n.d.) waarmee de gebruiker voedingskarakteristieken kan specificeren en de kwaliteit en kwantiteit van het productwater kan berekenen.

Het simulatieproces begon met het testen met WAVE van de verschillende voedings-EC-waarden, bij een constant debiet van 2 m³ /h en een rendement van productwater van 50%. Dezelfde procedure werd uitgevoerd voor een NF-90 membraan en een BW30 RO-membraan (membraan voor brak water), beide van DOW® Chemical Company. De recovery werd ingesteld op 50% waarmee de toe te passen druk en het specifieke energieverbruik werden berekend, die vervolgens de EC van het productwater bepaalden. Deze resultaten werden door de software als uitvoer gegeven. Op dezelfde manier werden de debieten getest door de recovery op 50% en de EC op 4 mS/cm te houden. De simulatieprocedure en de gebruikte gegevens staan in bijlage B.

Die resultaten werden vervolgens samengevoegd in een eenvoudig rekenmodel in Microsoft Excel, zodat voor een bepaald debiet en een bepaalde EC de energie geschat kon worden, die nodig is om 50% van het voedingswater terug te winnen en tevens de EC te schatten van het productwater (permeaat).

2.2.2 ELEKTRODIALYSE

Het Excel-model voor elektrodialyse werd gebouwd met behulp van experimentele gegevens, die door REDStack zijn verstrekt. Deze gegevens bestonden uit proeven met verschillende stacks, resulterend in verschillende debieten en stroomsnelheden. De stroomsnelheid van het water in de stack is rechtstreeks gekoppeld aan het debiet, het aantal membranen (celparen) en de dikte en grootte ervan. (Min et al., 2021) (zie vergelijking 4). Bovendien worden de voor ontzilting benodigde energie en de ontziltingsrendementen rechtstreeks beïnvloed door de lineaire stroomsnelheid, aangezien deze de verblijftijd bepaalt. Daarom is de lineaire stroomsnelheid een belangrijke parameter voor de modellering van een ED-systeem.

Daarom werd de simulatie uitgevoerd met verschillende stroomsnelheden in de stack. In eerste instantie werd een lineaire stroomsnelheid van 1 cm/s getest, omdat die in de literatuur werd gebruikt voor verschillende inlaat-EC's en operationele omstandigheden (Doornbusch et al., 2021; Min et al., 2021; Sosa-Fernandez et al., 2021). Een andere reden om 1 cm/s als variabele te gebruiken was dat deze aanwezig was in de experimentele gegevens, die voor de bouw van het model werden gebruikt.

Voor de andere simulatie leverde REDStack voor elk te simuleren debiet het benodigde aantal celparen voor de ED stack. Zo kon voor elk geval de stroomsnelheid worden berekend, en vervolgens bepaald worden welke van de aangeleverde experimentele gegevens gebruikt moesten worden. De snelheid werd berekend met vergelijking 4:

$$u = \frac{Q}{\Delta \times w \times N} \quad (4)$$

Waarbij,

u = theoretische lineaire stroomsnelheid (m/s)

Q = debiet (m³/s)

Δ = diepte van compartiment (m)

w = breedte van de diluatiecel (m)

N = totaal aantal celparen

In beide gevallen waren de stackgrootte en -diepte constant (zoals in bijlage B). Deze afmetingen en diepte behoorden tot de specifieke stack die verder wordt getest in een proefinstallatie binnen het ZDZW-project (Cappon et al., 2022).

De gebruikte data van REDStack bevatte alleen metingen voor EC's rond 4 en 10 mS/cm. Daarom moesten de resultaten tussen 10 en 20 mS/cm worden geëxtrapoleerd. De reden hiervoor is dat ED een technologie is die gewoonlijk wordt gebruikt voor een voedings-EC van maximaal 8-10 mS/cm. Voor een gedetailleerde procedure van de modellering, zie bijlage B.

Ook voor de RO en NF werden de verkregen resultaten van de simulatie gecombineerd om een goed overzicht te krijgen van het energieverbruik en de EC-waarde van het permeaat.

2.3 MODEL VOOR TECHNOLOGIEVERGELIJKING EN OUTPUT

Met de resultaten en analyses van dit onderzoek werden de technologieën nanofiltratie, omgekeerde osmose en elektrodialyse vergeleken. Het doel van de technologievergelijking is te bepalen wanneer (en of) elke technologie geschikt is voor een bepaalde permeaatkwaliteit (EC) met bijbehorend energieverbruik.

Tijdens dit onderzoek is het effect van de voedings-EC en het debiet op de output van elke technologie onderzocht. Voor de vergelijking is een eenvoudig Excelmodel gebouwd om op basis van de resultaten van de computersimulatie de permeaatkwaliteit en de energie voor elke technologie te berekenen. De tool heeft als input het voedingsdebiet en de EC nodig en geeft als output de technologie die het laagste energieverbruik oplevert en toch voldoet aan een permeaat-EC van minder dan 1,5 mS/cm.

De output werd ingevoerd in een Excelmodule die de kosten voor irrigatiewater uit ontzilting berekent. Daarom wordt het energieverbruik binnen dit onderzoek gebruikt om de specifieke kosten voor ontzilting te berekenen (€/m³). Daarnaast zijn ook de installatie-, exploitatie- en onderhoudskosten meegenomen. Meer informatie over deze resultaten zijn gepresenteerd door Cappon et al., 2022.

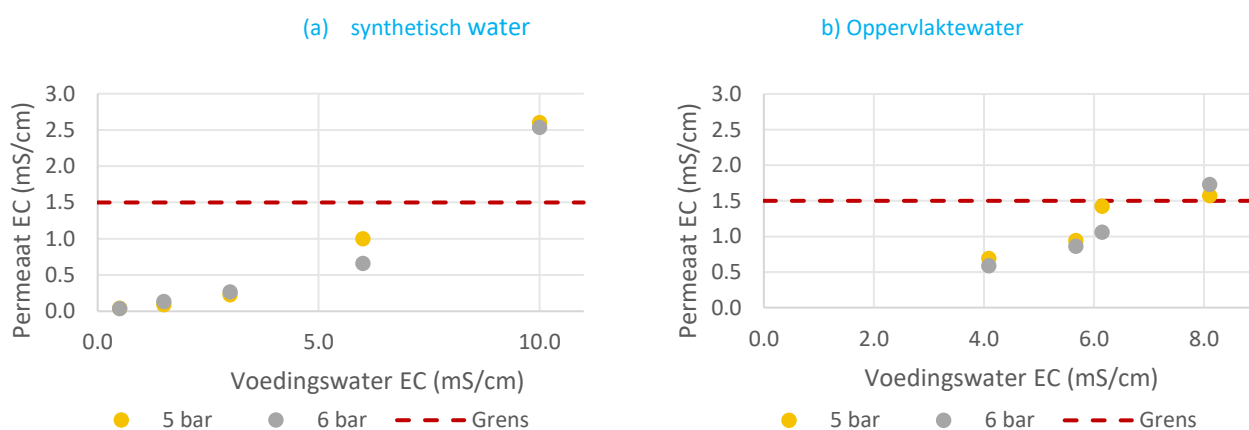
3. RESULTATEN

3.1 LABORATORIUMEXPERIMENTEN

Dit hoofdstuk behandelt de resultaten van de laboratoriumexperimenten met RO en ED. Ook worden de resultaten en technologieën met elkaar vergeleken en bediscussieerd.

3.1.1 OMGEKEERDE OSMOSE

Figuur 5 toont het resultaat van RO-permeaat bij 5 en 6 bar voedingsdruk voor verschillende zoutgehaltes en voor synthetisch water en oppervlaktewater. De gestippelde rode lijn illustreert de limiet voor EC-permeaat voor dit onderzoek, gebaseerd op het eindgebruik van 1,5 mS/cm.

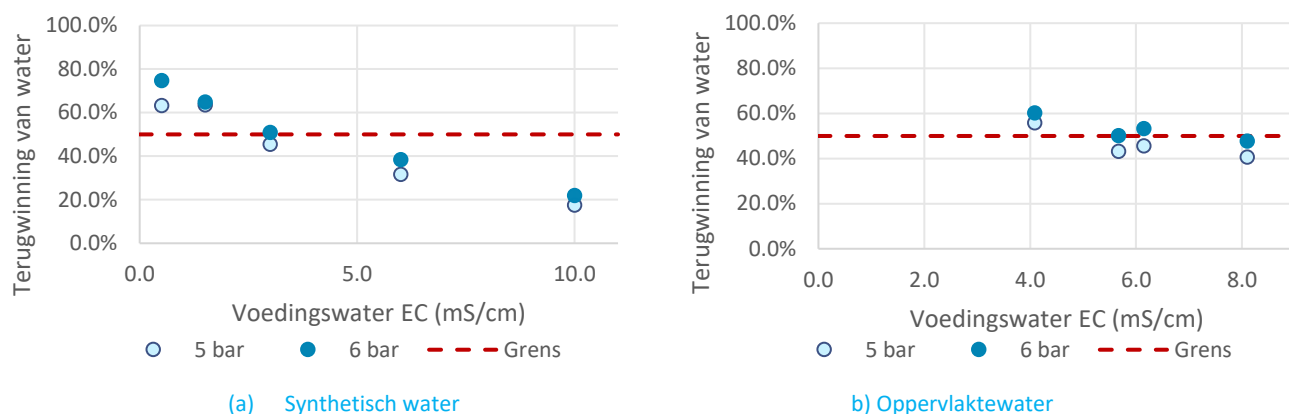


Figuur 5 - Geleidbaarheid van RO-permeaat bij 5 en 6 bar voor synthetisch en oppervlaktewater

Zoals verwacht wordt in beide grafieken een vergelijkbare trend van EC-toename in het permeaat gezien, wanneer de EC van de voeding toeneemt. Dit komt doordat het RO-membraan een maximale hoeveelheid zout kan tegenhouden, hetgeen betekent dat bij teveel zout in de voeding de EC van het permeaat zal toenemen. Daarnaast is uit de resultaten gebleken dat de zoutretentie ook afneemt met de toename van de EC van de voeding. Zo bedroeg de totale retentie, voor oppervlaktewater bij 6 bar, 85,8% bij een EC van 4,09 mS/cm en nam deze af tot 77,8% bij een voedings-EC van 8,1 mS/cm.

Bij vergelijking van synthetisch water en oppervlaktewater is weliswaar een vergelijkbare trend te zien, maar het oppervlaktewater heeft een hogere permeaat-EC, hetgeen betekent dat de RO minder goed in staat was het zout af te scheiden. Dit komt omdat het synthetische water slechts een mengsel was van NaCl en gedemineraliseerd water, terwijl het oppervlaktewater een complexe watermatrix is, met verschillende soorten zouten. Daarom reageert de RO anders op verschillende soorten zouten. Bovendien kan het water dat de RO bereikt zelfs verontreinigingen en vaste deeltjes bevatten, die niet zijn verwijderd door de voorfiltratie, hetgeen de membraanfiltratie kan verstoren.

Figuur 6 toont het rendement van productwater bij 5 en 6 bar voor verschillende zoutgehaltes van de voeding en beide watertypes. De grafiek bevat ook de gestippelde rode lijn om de drempel van 50% recovery weer te geven.



Figuur 6 - Rendement van productwater van RO bij 5 en 6 bar voor synthetisch en oppervlaktewater

Een soortgelijke trend wordt ook waargenomen in de grafieken van figuur 6: het rendement van productwater neemt af naarmate de EC in het voedingswater toeneemt. Dit was te verwachten, aangezien het zoutgehalte van het voedingswater een grote invloed heeft op de hoeveelheid permeaat. De reden hiervoor is dat om het RO-proces te laten plaatsvinden, de toegepaste druk hoger moet zijn dan de osmotische druk om de waterstroming om te keren, dus om het water van de voeding (hoge zoutconcentratie) naar de permeatzijde te dwingen (Ali et al., 2016). Aangezien de osmotische druk direct gerelateerd is aan het zoutgehalte van het water, geldt dat hoe hoger de voedings-EC, hoe lager de permeaatstroom en dus het rendement van productwater.

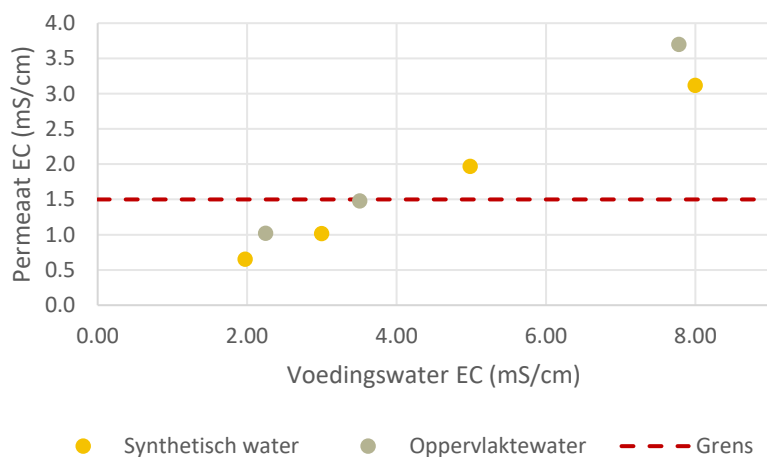
In figuur 6 is ook te zien dat het rendement van productwater bij 6 bar iets hoger is dan bij 5 bar. Dit volgt uit de relatie van toegepaste druk en osmotische druk die hierboven is uitgelegd. Aangezien 6 bar bij aftrek van de osmotische druk een groter verschil (hogere netto stuwdruk) oplevert dan 5 bar, is ook het permeaatdebiet hoger. Dit betekent dat een verhoging van de toegepaste druk ook de zoutverwijdering en het rendement van productwater verhoogt, en dat voor hogere zoutgehaltenes een hogere druk nodig is. Het gevolg hiervan is dat het energieverbruik toeneemt. Deze relatie wordt behandeld in het hoofdstuk *Numerieke analyses* en in figuur 10.

Uit de resultaten blijkt dat de RO bij 6 bar water kan produceren binnen de irrigatiedrempel voor een voedings-EC tot 6,0 - 8,0 mS/cm. Bij deze EC-waarden bedroeg het rendement van productwater ten minste 50,0%. Bij een voedings-EC van 6,0 mS/cm blijft het permeaat binnen de voor dit onderzoek vastgestelde limiet van 1,5 mS/cm. Afhankelijk van het soort gewas dat de landbouwers verbouwen, kan het irrigatiewater tot 2,0 mS/cm gaan, zodat de voedings-EC zelfs nog 8,0 mS/cm mag zijn.

3.1.2 ELEKTRODIALYSE

Figuur 7 toont de permeaat-EC (diluaat) van de elektrodialyse bij 10 V stack-spanning voor synthetisch water en oppervlaktewater. Het rendement van productwater wordt niet grafisch weergegeven omdat deze voor alle experimenten op 50% was gesteld. Anders dan bij RO werden de synthetische experimenten uitgevoerd vanaf 2,0 mS/cm, omdat dit een situatie was waarin al ontzilting nodig zou zijn, in tegenstelling tot 0,5 mS/cm als startpunt.

Evenals bij de RO was de zoutverwijdering bij ED bij gebruik van oppervlaktewater lager dan bij synthetisch water. Dit is opnieuw te wijten aan de aard van het oppervlaktewater, dat verschillende zouten bevat die zich onder invloed van elektrische stroom anders gedragen.



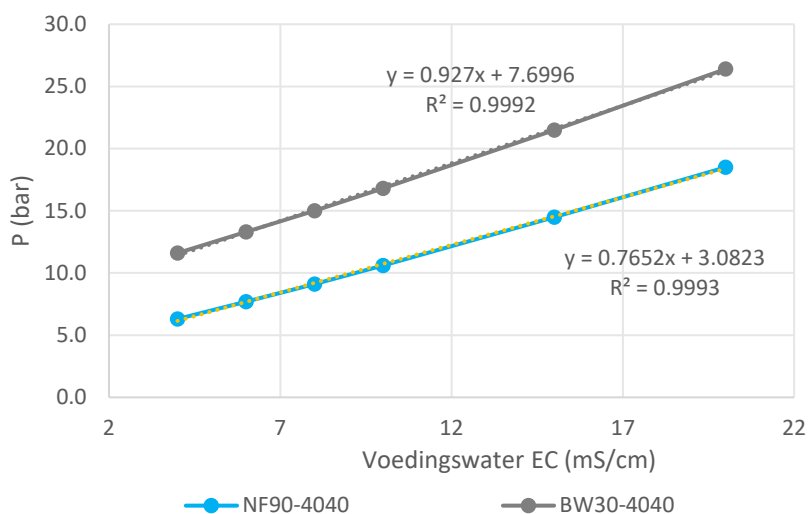
Figuur 7 Geleidbaarheid van ED-permeaat bij 10 V stackspanning voor synthetisch en oppervlaktewater

Het permeaat van ED werd zouter wanneer meer zout water werd gebruikt als voeding, zoals ook bij RO te zien was. De zoutverwijdering lag tussen 52 en 62% voor de experimenten met oppervlaktewater. In tegenstelling tot RO bereikte deze technologie een permeaat-EC van 1,5 mS/cm wanneer de voeding maximaal 3,0 mS/cm bedroeg. Bij hogere waarden moest het water tweemaal worden behandeld om het gewenste zoutgehalte te bereiken (hetgeen in de praktijk ook gebeurt). Dit betekent dat het permeaat weer als voeding wordt gebruikt en het scheidingsproces wordt herhaald (tweetraps ED).

3.2 NUMERIEKE ANALYSES

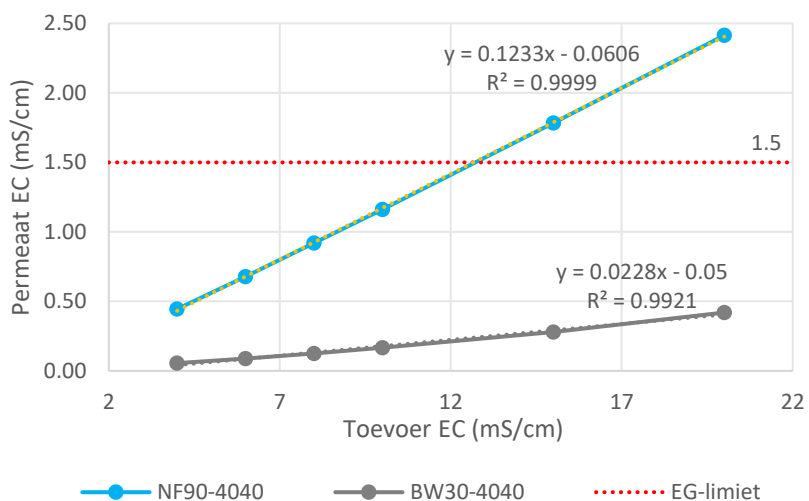
3.2.1 OMGEKEERDE OSMOSE EN NANOFILTRATIE

Figuur 8 toont de druk die nodig is om 50% recovery te krijgen bij verschillende zoutgehaltenes voor een NF90 en BW30 membraan. De voedings-EC loopt hier tot 20 mS/cm. Opvallend is dat NF90 en BW30 een vergelijkbare trend vertonen, maar dat BW30 aanzienlijk meer energie vergt (hogere druk). Dit komt door de specifieke membraaneigenschappen. NF90 is een nanofiltratiemembraan en bestaat dus uit kleine poriën, terwijl BW30 een dicht (Eng: dense) membraan is (geen poriën, maar diffusie), aangezien het een RO-membraan is. Daarom moet bij omgekeerde osmose een hogere druk worden toegepast.



Figuur 8 - Toegepaste druk die nodig is voor 50% Het rendement van productwater voor verschillende voedings-EC's

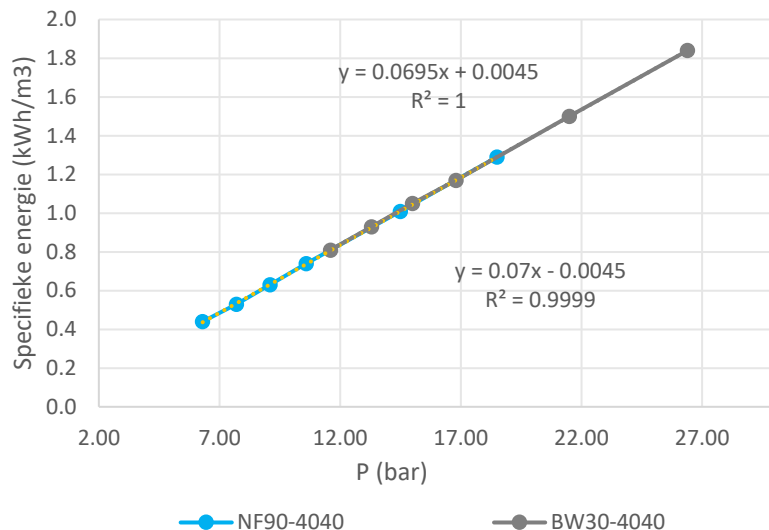
De permeaat-EC voor verschillende zoutgehalten in de voeding is weergegeven in figuur 9. Let op dat de druk in figuur 8 overeenkomt met elke permeaatwaarde (punt) in figuur 9, zodat duidelijk wordt dat het RO-membraan tot een veel lager zoutgehalte van het permeaat leidt. Door zijn dichte oppervlak kan het RO-membraan een grotere hoeveelheid zouten tegenhouden dan de NF. Bovendien vereist RO, zoals blijkt uit figuur 8, een hogere toegepaste druk voor elke toegevoerde EC in vergelijking met NF, hetgeen ook een directe invloed heeft op het zoutgehalte van het permeaat.



Figuur 9 - Variatie in de EC van het permeaat met de EC van de voeding voor 50% Het rendement van productwater

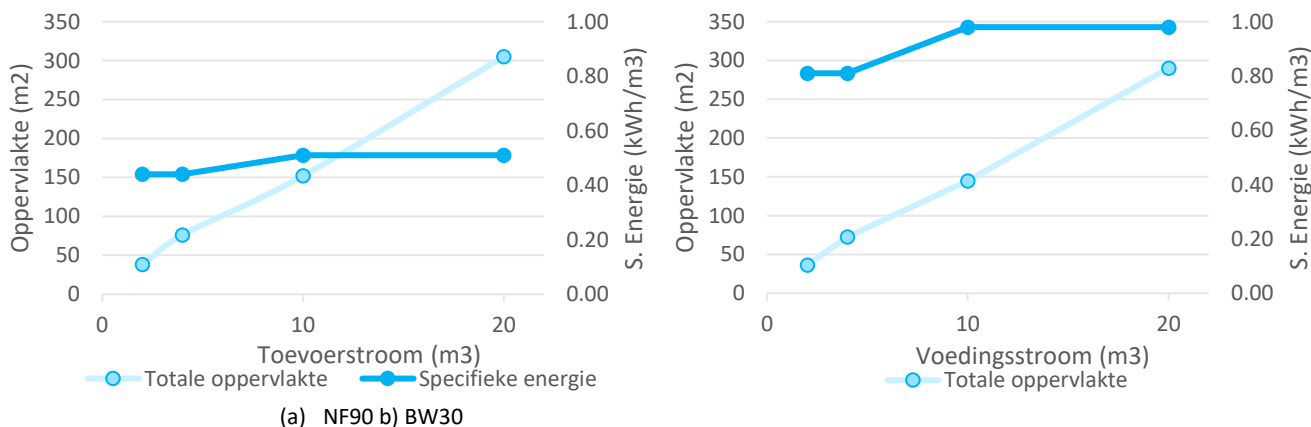
Bij een voedings-EC hoger dan ongeveer 14 mS/cm was de NF90 niet langer in staat om permeaat te produceren onder de gewenste drempelwaarde. De RO BW30 kon bij alle gesimuleerde punten een permeaat lager dan 0,5 mS/cm realiseren, en is daarom een geschikte technologie voor

zoutverwijdering. De druk beïnvloedt echter rechtstreeks de energie, zoals blijkt uit figuur 10. Daarom moet naast het rendement ook het energieverbruik meegenomen worden in de afweging.



Figuur 10 - Effect van de druk op het specifieke energieverbruik op RO en NF

Behalve het effect van het zoutgehalte van de voeding werd ook de grootte van de voedingsstroom gesimuleerd. Figuur 11 toont het verband tussen energieverbruik en membraanoppervlakte met de voedingsstroom.

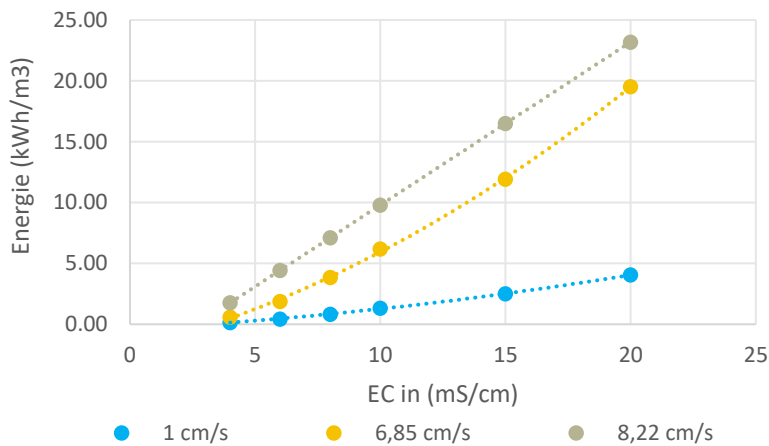


Figuur 11 - Specifieke energie en oppervlakte voor 50% Het rendement van productwater voor verschillende voedingsstromen

Uit de grafieken van figuur 11 blijkt dat de wijziging van het voedingsdebiet geen grote invloed had op het energieverbruik, met name voor het NF-membraan. Bovendien was de specifieke energie gelijk voor debiet 2 en 4 m³ /h en voor 10 en 20 m³ /h. De stijging doet zich dus ergens voor tussen 4 en 10 m³ /h, en is waarschijnlijk te wijten aan de grotere installatie die meer vermogen vergt. Hoewel in dit onderzoek niet is meegenomen, is het membraanoppervlak dat nodig is om een bepaalde hoeveelheid water te behandelen belangrijk, en zoals blijkt uit figuur 11 is het verband lineair met de voedingsstroom.

3.2.2 ELEKTRODIALYSE

De grafiek voor de relatie tussen specifieke energie (kWh/m^3) en voedings-EC voor elektrolyse is weergegeven in figuur 12. Aangezien het aantal celparen bekend was, kon het debiet omgerekend worden naar de watersnelheid binnen de stack. Voor de specifieke gesimuleerde eigenschappen van de stack (zie bijlage B) kwamen 2 en $4 \text{ m}^3/\text{h}$ overeen met $8,22 \text{ cm/s}$ en 10 en $20 \text{ m}^3/\text{h}$ met $6,53 \text{ cm/s}$. Figuur 12 bevat ook de vereiste energie per voedings-EC voor de experimenteel ingestelde lineaire stroomsnelheid van 1 cm/s .



Figuur 12 -Effect van de voedings-EC op het specifieke energieverbruik bij ED bij lineaire stroomsnelheid

Zoals blijkt uit figuur 12, levert de voorgestelde configuratie slechts haalbare resultaten op tot een aanvankelijke EC van 6 mS/cm voor $u=6,85 \text{ cm/s}$ en tot 5 mS/cm voor $u=8,22 \text{ cm/s}$, aangezien daarna een grote hoeveelheid energie nodig is. Uit het grafische resultaat blijkt dat de toename van de lineaire stroomsnelheid leidt tot een hogere energiebehoefte. Een reden hiervoor is dat de verblijftijden afnemen wanneer de stroomsnelheid toeneemt, hetgeen betekent dat bij eenzelfde toegepaste spanning de ontzouting lager is. (Sosa-Fernandez et al., 2021). Om de vereiste ionen (zout) verwijdering te bereiken is dus een hogere energie nodig. Een ander punt is dat de lineaire verhoging van de stroomsnelheid ook de drukval over de stack verhoogt, waardoor het energieverbruik toeneemt (Wright et al., 2018).

Een ander effect van de stroomsnelheid is dat deze rechtstreeks van invloed is op de massaoverdracht en de maximale stroomdichtheid (Eng: Limiting Current Density, LCD). Volgens Min et al., 2021 neemt door de toename van de LCD ook de stroomsnelheid van de ionenoverdracht toe, waardoor de reactiesnelheid toeneemt en de voor de scheiding benodigde tijd afneemt. Dit kan dus gunstig zijn in gevallen waarin de voedings-EC niet substantieel hoog is.

Voor de lineaire stroomsnelheid van 1 cm/s is het energieverbruik aanzienlijk lager. Indien echter dezelfde stackoppervlakte wordt aangehouden ($0,44 \times 0,44 \text{ m}$), zou een groot aantal celparen in één stack nodig zijn, hetgeen wellicht niet haalbaar is. Daarom moet, afhankelijk van de voedings-EC en het debiet, worden nagegaan wat de beste combinatie is om de gewenste ontzilting te bereiken: verandering van de oppervlakte en het aantal celparen zullen dan de lineaire stroomsnelheid bepalen.

Een ander punt is dat, net als bij de RO, het effect van de toegevoerde EC op de specifieke energiebehoefte aanzienlijk is. Dit komt doordat een hoger zoutgehalte in het water meer energie vereist om het te ontzilten, onafhankelijk van de stackgrootte.

Naast het energieverbruik vereist een verhoogde voedings-EC ook meer behandelingsstappen. Zoals reeds uit de experimentele resultaten is gebleken, is het bij gebruik van ED voor zouter water noodzakelijk meer ED- stacks in serie te gebruiken: het permeaat van ED₁ wordt behandeld door ED₂ en zo verder, totdat de gewenste permeaatkwaliteit is bereikt. Bij de uitgevoerde simulatie vereiste een voedings-EC van 4 mS/cm slechts één stap, 6 - 10 mS/cm 2 stappen en 15-20 mS/cm, 3 ED-stappen.

3.2.3 TECHNOLOGIEVERGELIJKING

Het doel van de technologievergelijking is te bepalen wanneer welke technologie geschikt is wat betreft de permeaatkwaliteit (EC) en het energieverbruik. Deze resultaten zijn weergegeven in tabel 1. Daarnaast zijn, voor een betere visualisatie, voor elke technologie oppervlaktegrafieken gemaakt, zoals weergegeven in Figuur 13. De grafieken laten zien hoe de energiebehoefte varieert in relatie tot de EC en het debiet. Let op dat de ED-tabel is gemaakt uitgaande van een stroomsnelheid van 1,0 cm/s, en dat, zoals eerder gezien, een verandering in de eigenschappen van de stack de stroomsnelheid beïnvloedt en een grote invloed kan hebben op het energieverbruik.

In tabel 1 hebben de gekleurde cellen tot doel aan te geven welke technologie minder en welke meer energie vergt voor een specifieke situatie. In dit geval verbruiken groene cellen minder energie, gevolgd door gele en ten slotte rode. Uit de resultaten blijkt dat, binnen de gesimuleerde omstandigheden, bij een voedings-EC van minder dan 8 mS/cm, ED minder energie vraagt dan de andere technologieën, ongeacht het debiet. Bij 8 mS/cm ligt de energiebehoefte voor NF en ED echter dicht bij elkaar, wat betekent dat een kleine verandering in de bedrijfsomstandigheden de resultaten kan doen omslaan.

Voor voedings-EC-waarden hoger dan 8 mS/cm (ongeveer) is NF de technologie met het laagste specifieke energieverbruik. Zoals echter blijkt uit figuur 9 en eerder besproken, haalt de nanofiltratie bij te zout voedingswater de permeaatvereiste van 1,5 mS/cm niet meer. Onder de gesimuleerde omstandigheden was NF geschikt voor de permeaatkwaliteit tot 14 mS/cm. Na dit punt waren alleen RO en ED in staat het gewenste zoutgehalte te bereiken. De energiebehoefte van ED neemt echter sneller toe dan die van de drukmembraantechnologie. Daarom werd voor een voedings-EC van meer dan 14 mS/cm RO gekozen als de meest energiezuinige.

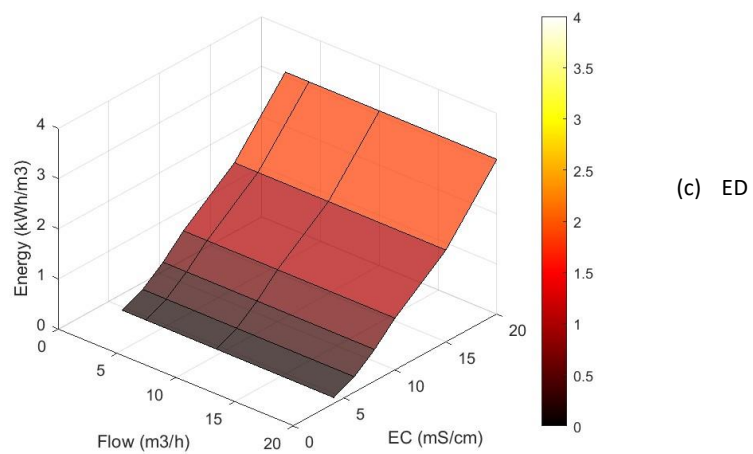
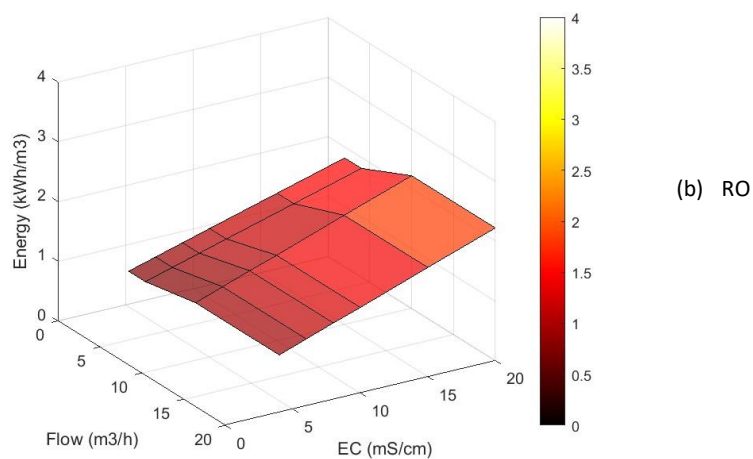
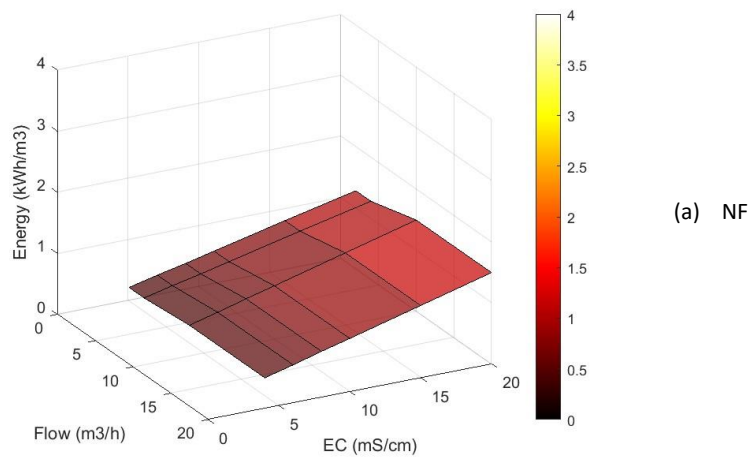
Tabel 1 - Energieverbruik voor NF, RO en ED bij verschillende voedingsomstandigheden

Debiet (m ³ /h) EC (mS/cm)	Energie _{NF} (kWh/m ³)				Energie _{RO} (kWh/m ³)				Energie _{ED} (kWh/m ³)			
	2	4	10	20	2	4	10	20	2	4	10	20
4	0.43	0.43	0.5	0.5	0.79	0.79	0.96	0.96	0.12	0.12	0.12	0.12
6	0.54	0.54	0.62	0.62	0.92	0.92	1.12	1.12	0.31	0.31	0.31	0.31
8	0.64	0.64	0.75	0.75	1.05	1.05	1.28	1.28	0.63	0.63	0.63	0.63
10	0.75	0.75	0.87	0.87	1.18	1.18	1.43	1.43	1.04	1.04	1.04	1.04
15	1.02	1.02	1.18	1.18	1.5	1.5	1.83	1.83	1.84	1.84	1.84	1.84
20	1.28	1.28	1.49	1.49	1.82	1.82	2.22	2.22	3.09	3.09	3.09	3.09

laagste verbruik | middelste verbruik | hoogste verbruik

De toename van energieverbruik voor elke technologie wordt weergegeven in de grafieken van figuur 13. Het NF-membraan is het membraan met het meest vlakke oppervlak in de grafiek, wat betekent dat de energiebehoefte ervan minder werd beïnvloed door de veranderingen in de voedings-EC en het debiet. Daarna volgt RO, waar al een grotere helling kan worden waargenomen door de verandering in voedings-EC, vanwege de hoge druk die moet worden gebruikt. Het energieverbruik van ED verschilt van

de laatste twee, het vertoont een veel sterkere hellingshoek, hetgeen betekent dat het sterk beïnvloed wordt door de startcondities van het proces.



Figuur 13 - Vergelijking van het energieverbruik voor NF, RO en ED

4. BIBLIOGRAFIE

- Ali, H. M., Gadallah, H., Ali, S. S., Sabry, R., & Gadallah, A. G. (2016). *Pilot-Scale Investigation of Forward / Reverse Osmosis Hybrid System for Seawater Desalination Using Impaired Water from Steel Industry*. 2016.
- Cappon, H., Mendonça, I., Buijs, T., & Martens, M. (2022). *Eindrapport ZDZW Ontzilting Concept*.
- Doornbusch, G., Wal, M. Van Der, Tedesco, M., Post, J., & Nijmeijer, K. (2021). *Meertraps elektrodialyse voor ontzilting van natuurlijk zeewater*. 505(februari).
- Dupont. (n.d.). *WAVE Water Treatment Design Software*. Dupont Water Solutions. Opgehaald op 23 september 2022 van <https://www.dupont.com/water/resources/design-software.html>.
- Gray, J. R. (2004). Geleidbaarheidsanalysatoren en hun toepassing. In *Environmental Instrumentation and Analysis Handbook* (blz. 491-492). Wiley-Interscience.
- Martens, M., Cappon, H., & Silva Mendonca, I. (2022). *Metingen geleidbaarheid oppervlaktewater t.b.v. ZDZW - ontzilting*.
- Min, K. J., Kim, J. H., Oh, E. J., Ryu, J. H., & Park, K. Y. (2021). Flow velocity and cell pair number effect on current efficiency in plating wastewater treatment through electrodialysis. *Environmental Engineering Research*, 26(2), 1-7. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.502>
- Sosa-Fernandez, P. A., Loc, T. M., Andrés-Torres, M., Tedesco, M., Post, J. W., Bruning, H., & Rijnaarts, H. H. M. (2021). Energieverbruik van een electrodialyzer die waterige polymeeroplossingen ontzout. *Ontzilting*, 510(februari). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115091>
- Wright, N. C., Shah, S. R., Amrose, S. E., & V, A. G. W. (2018). A robust model of brackish water electrodialysis desalination with experimental comparison at different size scales. *Desalination*, 443(april), 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.04.018>

BIJLAGE A

A.1 GEGEVENS EN RESULTATEN VAN LABORATORIUMEXPERIMENTEN

In dit deel worden de gegevens gepresenteerd die zijn gebruikt om de grafieken in 2.2.1 en 2.2.2 op te stellen voor respectievelijk omgekeerde osmose en elektrolyse.

Omgekeerde osmose

Tabel A1 - RO-filtratie van synthetisch water bij 5 bar

EC _{FEED} (mS/cm)	EC _{PERM} (mS/cm)	EC rej tot. %	W _{RECOV} %
0.5	0.0	92.0%	63.3%
1.5	0.1	94.0%	63.6%
3.0	0.2	92.5%	45.5%
6.0	1.0	83.3%	31.7%
10.0	2.6	74.0%	17.6%

Tabel A2 - RO-filtratie van synthetisch water bij 6 bar

EC _{FEED} (mS/cm)	EC _{PERM} (mS/cm)	EC rej tot. %	W _{RECOV} %
0.5	0.0	93.0%	74.7%
1.5	0.1	91.0%	64.9%
3.0	0.3	91.1%	51.0%
6.0	0.7	89.0%	38.4%
10.0	2.5	74.7%	21.9%

Tabel A3 - RO-filtratie van oppervlaktewater bij 5 bar

EC _{FEED} (mS/cm)	EC _{PERM} (mS/cm)	EC rej tot. %	W _{RECOV} %	Locatie
4.1	0.7	82.6%	55.9%	Krukweg-Kooiweg
5.7	0.9	84.5%	43.2%	Zuidlangeweg NW
6.2	1.4	78.5%	45.7%	Zuidlangeweg NW
8.1	1.6	77.7%	40.6%	Noordlangeweg verdund van 15,34 mS/cm tot 8,1 mS/cm

Tabel A4 - RO-filtratie van oppervlaktewater bij 6 bar

EC _{FEED} (mS/cm)	EC _{PERM} (mS/cm)	EC rej tot. %	W _{RECOV} %	Locatie
4.1	0.6	85.8%	60.2%	Krukweg-Kooiweg
5.7	0.9	84.3%	50.2%	Zuidlangeweg NW
6.2	1.1	82.4%	53.3%	Zuidlangeweg NW
8.1	1.7	77.8%	47.8%	Noordlangeweg verdund van 15,34 mS/cm tot 8,1 mS/cm

Elektrodialyse

Tabel A5 - ED-ontzilting van synthetisch water bij 10 V

EC _{FEED} (mS/cm)	EC _{PERM} (mS/cm)	EC rej tot. %	W _{RECOV} %
2.0	0.7	67.0%	46.9%
3.0	1.0	66.2%	47.3%
5.0	2.0	60.5%	47.7%
8.0	3.1	61.0%	47.2%

Tabel A6 - ED-ontzilting van oppervlaktewater bij 10 V

EC _{FEED} (mS/cm)	EC _{PERM} (mS/cm)	EC rej tot. %	W _{RECOV} %	Locatie
2.3	1.0	61.6%	55.9%	Krukweg-Kooiweg
3.7	1.5	59.5%	43.2%	Permeaat van de Noordlangeweg (7,8 mS/cm)
7.8	3.7	52.4%	45.7%	Noordlangeweg verdund van 15,5 mS/cm tot 7,8 mS/cm

BIJLAGE B

B.1 GEDETAILLEERDE MODELLERINGSPROCEDURES

Omgekeerde osmose en nanofiltratie

Tabel B1 en B2 bevatten de met WAVE verkregen resultaten bij variatie van respectievelijk de voedings-EC en het debiet.

Tabel B1 - Resultaten van RO en NF voor verschillende EC's van de voeding

		EC in (mS/cm)					
	Parameter	4	6	8	10	15	20
NF90-4040	Druk. (bar)	6.30	7.70	9.10	10.60	14.5	18.5
	NDP (bar)	3.20	3.50	3.70	4.00	4.70	5.50
	EC perm (mS/cm)	0.45	0.68	0.92	1.16	1.78	2.41
	E.(kWh/m3)	0.44	0.53	0.63	0.74	1.01	1.29
BW30-4040	Druk. (bar)	11.60	13.30	15.00	16.80	21.5	26.4
	NDP (bar)	8.60	9.00	9.40	9.90	11.10	12.60
	EC perm (mS/cm)	0.06	0.09	0.13	0.17	0.28	0.42
	E.(kWh/m3)	0.81	0.93	1.05	1.17	1.5	1.84

Voedingsdebiet: 2 m³ /h

Rendement van productwater: 50%

Tabel B2 - RO- en NF-resultaten voor verschillende voedingsstromen

		Voedingsstroom (m ³ /h)			
	Parameter	2	4	10	20
NF90-4040	Druk. (bar)	6.30	6.30	7.30	7.30
	NDP (bar)	3.20	3.20	4.10	4.10
	Oppervlakte (m ²)	38	76	152	305
	EC perm (mS/cm)	0.45	0.45	0.37	0.37
	E.(kWh/m3)	0.44	0.44	0.51	0.51
BW30-4040	Druk. (bar)	11.60	11.60	14.10	14.10
	NDP (bar)	8.60	8.60	11.00	11.00
	Oppervlakte (m ²)	36	73	145	290
	EC perm (mS/cm)	0.06	0.06	0.05	0.05
	E.(kWh/m3)	0.81	0.81	0.98	0.98

Voedings EC: 4 mS/cm

Rendement van productwater: 50%

In het geval van tabel B1 werd het rendement van productwater constant gehouden op 50% en het voedingsdebiet op 2 m³/h. Daarom bepaalde de EC van het voedingswater de druk die nodig was om deze recovery te bereiken. De druk zelf houdt rechtstreeks en lineair verband met de specifieke energie, zoals blijkt uit figuur 10.

Wanneer de recovery en het voedingsdebiet constant worden gehouden, kan het energieverbruik dus worden geschat aan de hand van een lineaire vergelijking met de oorspronkelijke EC.

De energie heeft echter geen lineair verband met het voedingsdebiet, zoals blijkt uit tabel B2 en figuur 11. Anderzijds is het effect van het debiet op de energiebehoefte niet zo groot als het effect van de EC, aangezien de druk niet sterk toeneemt bij verandering. Daarom is voor de rekenmodule uitgegaan van een lineair verband tussen debiet en energie.

Aangezien het doel van de rekenmodule is om slechts een raming te maken van het energieverbruik bij een bepaalde beginwaarde voor de EC en het debiet, leidde deze aanname niet tot aanzienlijke afwijkingen. Bovendien vermindert een toename van het debiet de specifieke kosten (€/m³) wanneer de installatiekosten worden meegenomen. De geringe toename van het energieverbruik als gevolg van een variatie in het debiet heeft dus geen grote gevolgen.

Met deze twee relaties berekent de module de specifieke energiekosten voor de ontzilting van water, met 50% recovery, voor een specifieke voedings-EC en voedingsdebiet.

Elektrodialyse

Zoals eerder uitgelegd in punt 2.2.2 is de rekenmodule voor elektrodialyse gebouwd met behulp van experimentele gegevens van REDStack. Deze gegevens bestonden uit proeven met verschillende stacks, die verschillende debieten en snelheden en voedings-EC's opleverden. Deze staan in tabel B3.

Tabel B3 - Voor het ontziltingsmodel gebruikte experimentele ED-gegevens

Stack	EC in (mS/cm)	Stroomsnelheid (cm/s)
22 x 22	3.89	1
		2
		3
22 x 22	10.65	0.5
		1
		2
44 x 44	3.89	1

Bij de analyse van het effect van de hoeveelheid water die een ED-leiding binnenkomt, is het handiger de stroomsnelheid te gebruiken in plaats van het debiet. De reden hiervoor is dat de oppervlakte van de stack en het aantal celparen van invloed zijn op de manier waarop het water wordt ontzout. Dit betekent dat verschillende influentstromen dezelfde lineaire snelheid (u) kunnen hebben, afhankelijk van de configuratie. Om die reden is de lineaire stroomsnelheid binnenin de stack gebruikt in plaats van de voedingsstroom.

Daarom werd de simulatie uitgevoerd met twee verschillende snelheden: een vaste snelheid van 1 cm/s, en door de snelheid te berekenen op basis van de voedingsstroom en een gemeenschappelijke stack uit REDStack. Dit laatste is een stack van 44 x 44 cm (dikte van 4,8E-04) die op proefschaal wordt getest in een pilot (Capon et al., 2022)

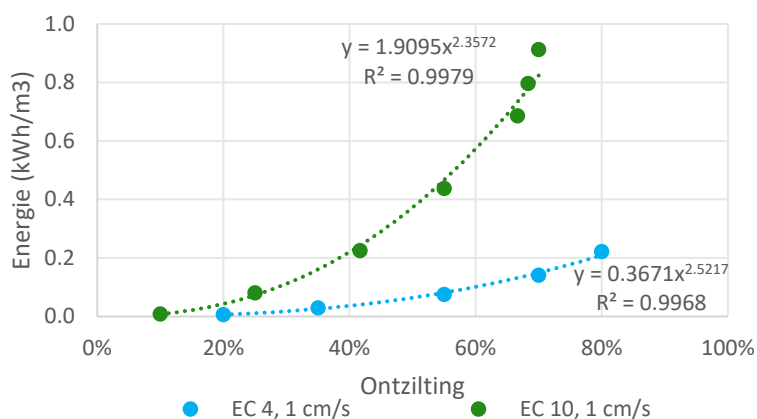
Als de lineaire stroomsnelheid niet eerst berekend zou worden, dan zou een verandering in de voedingsstroom (in dit onderzoek 2, 4, 10 en 20 m³/h) resulteren in een andere stackgrootte en configuratie, dat wil zeggen een verandering in de breedte, de dikte en/of het aantal celparen en dat kan praktische niet. De eigenschappen van de stack liggen namelijk vast, dus is de voedingsstroom van invloed op de lineaire snelheid.

Voor deze omrekening werd vergelijking 4 gebruikt om de snelheid voor elke stroom te berekenen. Zoals gezegd werd hiervoor de stack van 44 x 44 cm gebruikt, en REDStack stelt daarbij het aantal celparen (N) voor elke stroom vast. Tabel B4 toont N en ook de berekende snelheid voor elk geval.

Tabel B4 - Lineaire snelheid bij de gesimuleerde voedingsstroom

Q (m ³ /h)	N	u (cm/s)
2	32	8.22
4	64	8.22
10	192	6.35
20	384	6.35

De volgende stap was het analyseren en begrijpen van de effecten van de voedings-EC en de lineaire snelheid op de ontzilting en het energieverbruik. Dit gebeurde grafisch en met één variërende parameter per keer. Figuur B1 toont de energie die nodig is voor de ontzilting van voedingswater met EC's van 3,89 en 10,65 mS/cm, bij een stroomsnelheid van 1 cm/s.



Figuur B1 - Relatie tussen energieverbruik en waterontzilting bij verschillende voedings-EC

Zoals blijkt uit figuur B1 is de relatie tussen energie- en ontziltingsrendement een exponentiële curve. Te zien is dat de curvehelling het meest bijdraagt tot de curvevorm, die waarschijnlijk varieert met verschillende waarden voor elke voedings-EC. Om dit te onderzoeken zouden idealiter verscheidene krommen moeten worden gemaakt voor verschillende voedings-EC's en zou moeten worden onderzocht hoe de helling verandert met de toename van de EC. Zoals reeds gezegd, waren de resultaten echter slechts beschikbaar voor twee voedings-EC's: 3,89 en 10,65 mS/cm. Daarom moest worden aangenomen dat de verandering in helling lineair is met de EC-verandering.

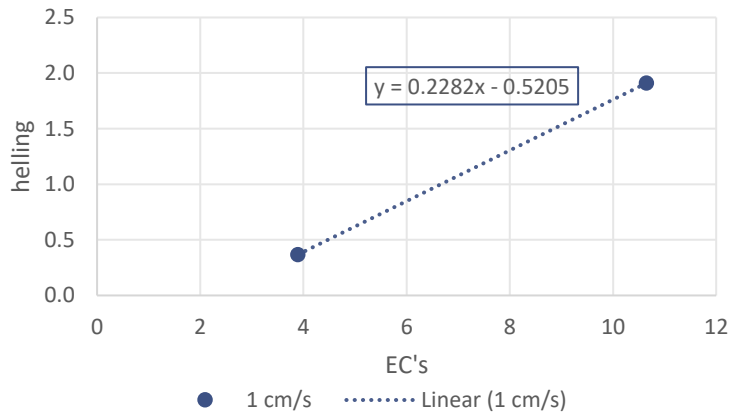
Daarom is de grafiek van figuur B2 gemaakt. Met de curvevergelijking kan de helling van de curve van energie vs. ontzilting worden geschat voor een stroomsnelheid van 1 cm/s. De lineaire vergelijking wordt dan gedefinieerd door vergelijking B1:

$$\text{slope} = 0.2282 \times EC_{IN} - 0.5205 \quad (B1)$$

Waarbij,

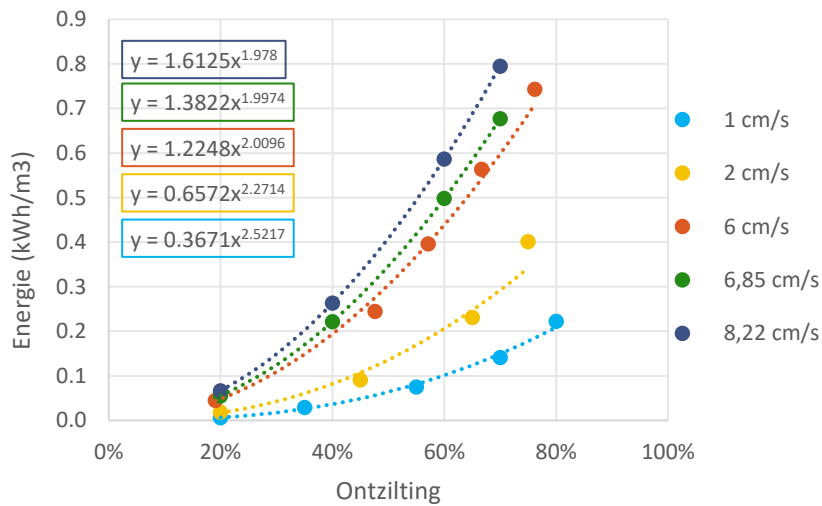
helling = de helling van de machtsvergelijking van energie versus ontzilting

EC_{IN} = voeding ED in mS/cm

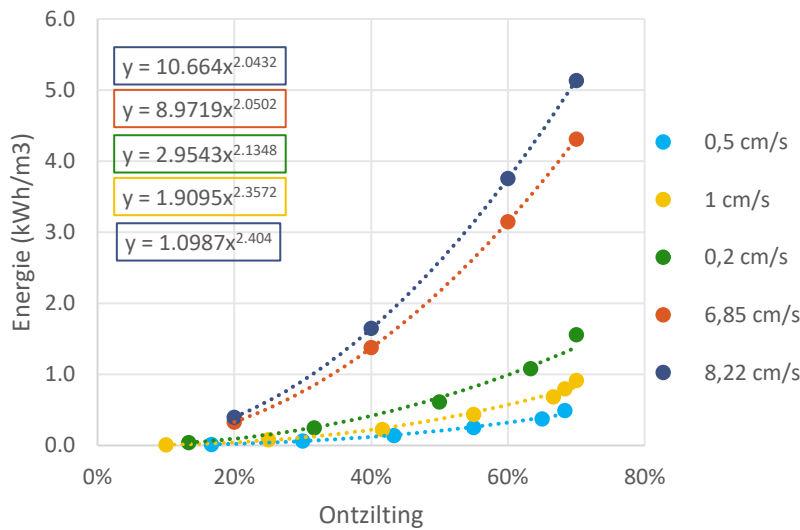


Figuur B2 - Verondersteld lineair gedrag van de curvehelling met EC-verandering

Zoals besproken in punt 3.2.2, speelt naast de EC ook de lineaire snelheid een cruciale rol bij de ontzoutingsefficiëntie en dus het energieverbruik. Het effect van de lineaire snelheid wordt getoond in respectievelijk figuur B3 en B4 voor beide gesimuleerde EC's.



Figuur B3 - Relatie tussen energieverbruik en waterontzilting voor verschillende lineaire snelheden bij voedings-EC 3,89 mS/cm



Figuur B4 - Relatie tussen energieverbruik en waterontzilting voor verschillende lineaire snelheden bij voedings EC 10,65

Bij de resultaten in de figuren B1, B3 en B4 valt op hoe de benodigde energie voor dezelfde ontziltingshoeveelheid kan veranderen afhankelijk van de lineaire snelheid. Dit is te zien aan de curve zelf, maar ook aan de hellingswaarden, die toenemen naarmate de snelheid toeneemt. Daarom is de relatie tussen de helling en de snelheid onderzocht op basis van hoe deze verandert wanneer 1 cm/s als uitgangspunt wordt genomen. Dit wordt uitgedrukt in vergelijking B2:

$$F_u = -0.0327 \times u^2 + 1.0327 \times u \quad (B2)$$

Waar,

F_u = snelheidsfactor

u = snelheid in cm/s

Om de helling van de curve van specifieke energie (kWh/m³) versus ontzoutingsgraad (%) te berekenen, wordt daarom eerst vergelijking B1 gebruikt. Het resultaat is dan de helling voor de gespecificeerde voedings-EC bij een lineaire snelheid van 1 cm/s. Om te corrigeren naar een andere snelheid wordt vergelijking B2 gebruikt, waarin de gewenste snelheid u wordt toegepast en de factor F_u vervolgens wordt vermenigvuldigd met het hellingsresultaat uit vergelijking B1. De helling is nu dus gecorrigeerd voor de voedings-EC en voor de lineaire snelheid. Let op dat het bereik voor deze relaties een EC tussen 3,89 en 10,65 mS/cm was en de snelheid tussen 1 en 8 cm/s lag.

Naast het gedrag van de helling moet ook de exponent worden aangepast om de beginwaarden te corrigeren. Uit de figuren B3 en B4 blijkt dat de exponent gelijk blijft wanneer de snelheid constant wordt gehouden en de EC verandert. Daarom werd voor de modellering aangenomen dat de exponent alleen door de snelheid wordt beïnvloed. Daarom wordt verwacht dat de exponent varieert volgens vergelijking B3:

$$exp = -0.0544 \times u + 2.4089 \quad (B3)$$

Waarbij,

exp = de exponent van de vergelijking tussen energie en ontzilting

$u = \text{lineaire snelheid (cm/s)}$

Met deze gespecificeerde relaties en vergelijkingen schat het model de vereiste energie per ontzilingspunt, voor een specifieke voedings-EC en lineaire snelheid, door de helling en de exponent van de vergelijking op te geven.

In de tabellen B en B6 wordt het gebruik van de vastgestelde relaties gedemonstreerd. Net als de demonstratie met RO en NF, uit de tabellen B1 en B2, werd de energie ook berekend voor EC tussen 4 en 20 mS/cm. In plaats van verschillende debieten werden echter verschillende lineaire snelheden vergeleken.

Tabel B5 - ED-resultaten voor verschillende EC's van de voeding en een lineaire snelheid van 1 cm/s

ED Trap	Parameter	EC in (mS/cm)					
		4	6	8	10	15	20
1	Verwijdering van de EC	63%	62%	63%	60%	60%	60%
	EC permeaat	1.50	2.30	3.00	4.00	6.00	8.00
	Energie (kW/h)	0.12	0.25	0.40	0.49	0.81	1.13
2	Verwijdering van de EC		35%	50%	63%	50%	56%
	EC permeaat		1.50	1.50	1.50	3.00	3.50
	Energie		0.06	0.23	0.54	0.51	0.96
3	Verwijdering van de EC					50%	57%
	EC permeaat					1.50	1.50
	Energie (kW/h)					0.51	1.00
Definitieve	EC permeaat	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Energie (kWh/m ³)	0.12	0.31	0.63	1.04	1.84	3.09

Tabel B6 - ED-resultaten voor verschillende EC's van het influent en een lineaire snelheid van 6,85 cm/s

ED Trap	Parameter	EC in (mS/cm)					
		4	6	8	10	15	20
1	Verwijdering van de EC	63%	62%	63%	60%	60%	60%
	EC permeaat	1.50	2.30	3.00	4.00	6.00	8.00
	Energie (kW/h)	0.58	1.41	2.31	2.92	4.91	6.90
2	Verwijdering van de EC		35%	50%	63%	50%	56%
	EC permeaat		1.50	1.50	1.50	3.00	3.50
	Energie		0.44	1.47	3.17	3.39	6.05
3	Verwijdering van de EC					50%	57%
	EC permeaat					1.50	1.50
	Energie (kW/h)					3.39	6.25
Definitieve	EC permeaat	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Energie (kWh/m ³)	0.58	1.85	3.78	6.10	11.70	19.21

BIJLAGE C

C.1 MEMBRAANVERVUILING EN REINIGINGSPROTOCOL

Door de bestanddelen in het voedingswater kan het oppervlak van de membranen verstopt raken, waardoor de ontziltingscapaciteit afneemt. De aanwezigheid van zout in het water kan membraanaanslag veroorzaken, die gewoonlijk met zuur wordt verwijderd. Daarnaast kunnen bij de behandeling van oppervlaktewater de organische bestanddelen leiden tot organische vervuiling, die gewoonlijk wordt verwijderd met een basische oplossing. Tijdens de experimenten in het kader van het project vertoonden de RO- en ED-membranen enige vorm van vervuiling en moesten ze worden gereinigd. De gevolgde procedures worden hieronder weergegeven.

Omgekeerde osmose

Tijdens de experimenten met filtratie van synthetisch water begon de RO-eenheid een lager rendement van productwater te vertonen dan de waarden die werden verkregen toen het membraan nieuw was. Aangezien op dit moment alleen zout de oorzaak van de verstopping kon zijn, werd een reiniging met zuur uitgevoerd.

Aangezien er geen standaardprocedure werd gevonden in de literatuur of in de fiche van het membraan, werd een methode ontwikkeld door de tijdens het onderzoek gevonden informatie te combineren. Het belangrijkste punt is dat de pH-grenzen van het membraan in acht moeten worden genomen. Het gebruikte RO-membraan had een pH-ondergrens van 2. Daarom werd 3 L van een HCl-oplossing met een pH van 3 bereid (0.001 M HCl). De gebruikte methode was als volgt:

- Het membraan werd eerst gedurende 30 minuten met de oplossing doordrenkt;
- De HCl-oplossing werd gedurende 30 minuten door de membraanmodule gepompt;
- De membranen werden gereinigd met demiwater totdat de pH die het apparaat verliet neutraal was.

Ook wordt geadviseerd de membranen altijd met demiwater te reinigen nadat de reeks experimenten is uitgevoerd. Daarom moeten de membranen, wanneer zij niet worden gebruikt, met demiwater worden doordrenkt.

Elektrodialyse

In tegenstelling tot de RO, vertoonde de ED ook organische vervuiling en visuele groei van organisch materiaal in de slangen (groene algen). Het toegepaste reinigingsprotocol werd aanbevolen door REDStack; aangezien de membranen een pH-bovengrens van 8 hadden, kon geen alkalische oplossing worden gebruikt. De gebruikte methode was als volgt:

- 1 M NaCl werd gedurende 1 uur door de stack gepompt;
- 0,1 M HCl werd gedurende 4 uur door de stack gepompt;
- De membranen werden gereinigd met demiwater totdat de pH die het apparaat verliet neutraal was.

Om membraanvervuiling te voorkomen, werd tevens geadviseerd de stack te spoelen met een 6 g/L NaCl-oplossing (na de experimenten bij gebruik van echt water) en de stack op een donkere plaats op te slaan of af te dekken. Wanneer de stack langere tijd niet wordt gebruikt, werd geadviseerd de stack te vullen met een 1% natriumsulfiet (Na₂SO₃) + 1% NaCl oplossing.