



Ontziltngstechnologieën

Zeeuws Deltaplan Zoet Water

HZ WATER TECHNOLOGY

15 JANUARI 2021



UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

ONTZILTINGSTECHNOLOGIEËN

ZEEUWS DELTAPLAN ZOET WATER

HZ WATER TECHNOLOGY

15 JANUARI 2021
MIDDELBURG
VERSIE 1

GEREVIEWED DOOR:

(LECTOR WATERTECHNOLOGIE)

SAMENVATTING

Dit rapport biedt een overzicht van de stand van ontziltingstechnologieën met bijbehorende toepassingen en randvoorwaarden, als onderdeel van de notitie ontziltingstechnologieën van het Zeeuws Deltaplan Zoet Water, in opdracht gegeven door Provincie Zeeland (contactpersoon Ruben Akkermans). De huidige ontziltingstechnologieën, met geclaimde of commerciële meerwaarde, worden geëvalueerd aan de hand van relevante scenario's voor de provincie Zeeland. Hiermee is rekening gehouden met de waterkwaliteit van lokale bronnen, en ligt de focus op het produceren van zoet water voor irrigatiedoeleinden. Voor elk scenario is een zuiveringstrein opgesteld met gepaste voorzuiveringsstappen voor de ontziltingstechnologie. Vervolgens is een overzicht aan kosten gegeven, die een vergelijking maakt voor de verschillende scenario's.

Deze studie bevestigt dat hoe zouter het water, hoe hoger de kosten zullen zijn voor de ontzilting. Daarmee is rekening gehouden met de investerings- en operationele kosten. Op het moment dat brak water aanwezig is, zal dat altijd de voorkeur hebben in verband met de lagere kosten, de CO₂ footprint en de kleinere brijnstroom. Verder is de voorbehandeling van oppervlaktewater essentieel voor het gebruik van ontziltingstechnologieën.

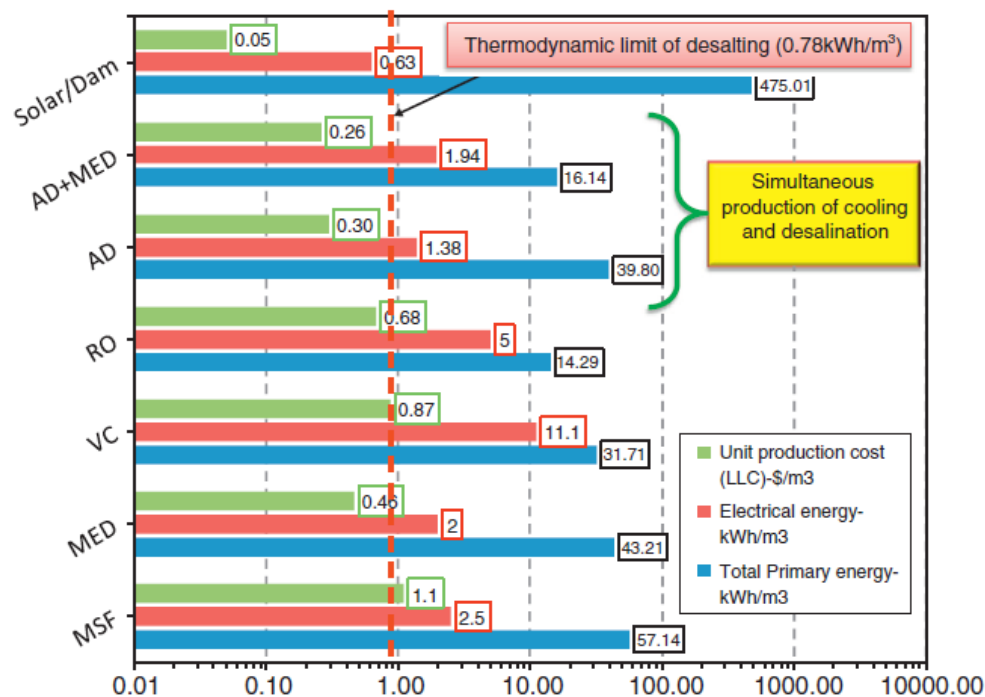
INHOUDSOPGAVE

INTRODUCTIE	1
ONTZILTINGSTECHNOLOGIEËN	2
Reverse Osmosis / omgekeerde osmose (RO)	2
Nanofiltratie (NF)	3
Electrodialysis Reversal (EDR)	3
Capacitive Deionization (CDI)	3
Forward Osmosis (FO)	4
WATERKWALITEIT	4
Zout water (Oosterschelde)	4
Sterk brakwater (Westerschenge)	5
Mild brakwater (Philippinekanaal)	6
Irrigatiewater: Groeten- en fruitteelt	6
Irrigatiewater: glastuinbouw	8
SCENARIO'S	8
Scenario 1. Zout water (Oosterschelde) -> Irrigatiewater groenten- en fruitteelt	9
Scenario 2. Zout water -> Irrigatiewater glastuinbouw	10
Scenario 3. Sterk brak water -> Irrigatiewater groenten- en fruitteelt	11
Scenario 4. Sterk brak water -> Zoet water (Irrigatiewater glastuinbouw)	12
Scenario 5. Mild brak water -> Irrigatiewater groenten- en fruitteelt	13
Scenario 6. Mild brak water -> Irrigatiewater glastuinbouw	14
OVERZICHT VAN KOSTEN	15
CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	17
BRONVERMELDING	18
BIJLAGE I	21

INTRODUCTIE

Voor de zoetwatervoorziening is het gebruik van zee- en brakwater een onuitputbare bron, welke weinig afhankelijk is van weersomstandigheden, maar de nodige ontziltingsprocessen brengt vaak hogere kosten met zich mee (Zarzo, 2012). Binnen de ontziltingsprocessen wordt onderscheid gemaakt tussen thermische ontzilting (faseverandering), ontzilting op basis van ladingsverschil en ontzilting door middel van membranen (enkele fase) (Khan, 2018).

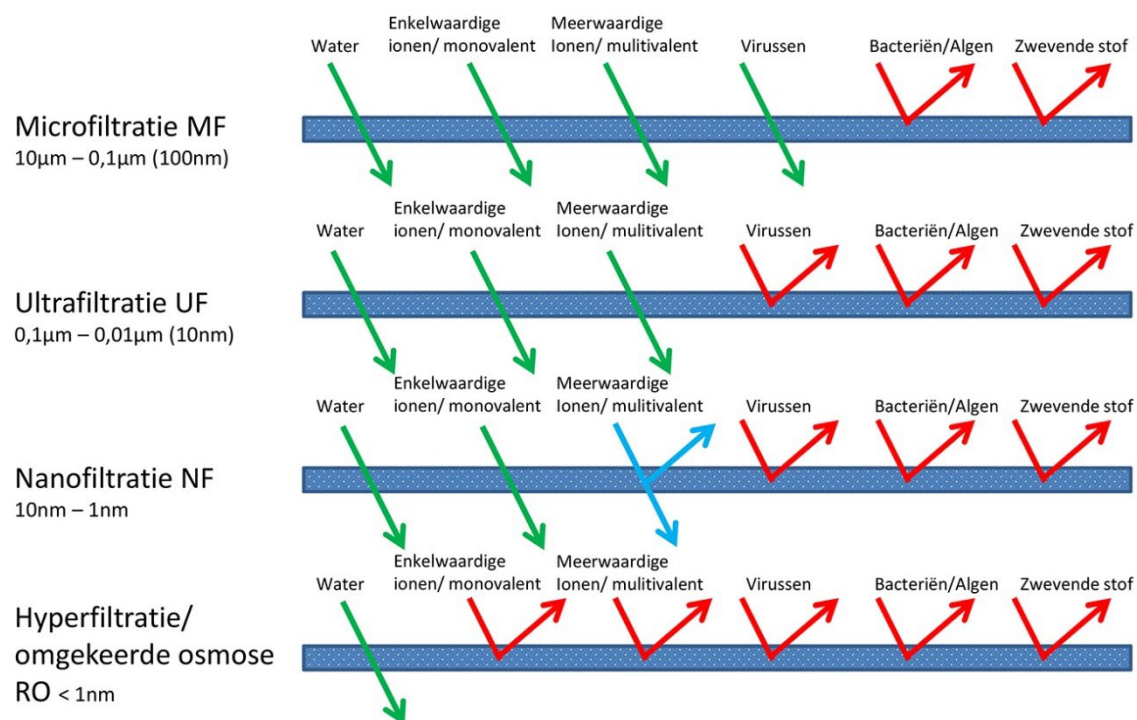
Bij thermische ontzilting wordt een deel van het water verdampt via destillatie, en concentreren de aanwezige zouten zich tot een brijn (concentraat). Hierin kunnen de volgende technologieën worden onderscheiden: Multi-Stage Flash Distillation (MSF), Multi-Effect Distillation (MED), Membrane Distillation (MD), Adsorption Distillation (AD) en Vapor Compression Distillation (VCD), maar ook uitvriazing en hydraatvorming/kristallisatie vallen hieronder. Deze technologieën worden gekenmerkt door hun hoge energieverbruik, en worden dan ook met name toegepast in landen met een lage energieprij, zoals het Midden-Oosten. Bij het toepassen van deze technologieën in Zeeland zullen de operationele kosten hoog zijn door het energieverbruik. Daarnaast zijn er hoge investeringskosten (CapEx) verbonden aan thermische ontzilting (Figuur 1), wat de technologie enkel efficiënt maakt wanneer het op grote schaal kan worden toegepast. Voor de technologieën uitvriazing en kristallisatie bestaan er tot op heden geen commerciële toepassingen, daarnaast zijn ook hieraan hoge investerings- en operationele kosten verbonden.



Figuur 1 Een vergelijking in het elektrische en totale energieverbruik en investeringskosten voor verschillende ontziltingstechnologieën

Electro Dialysis Reversal (EDR), Capacitive Deionization (CDI) en Ion Exchange (IX) zijn ontziltingsprocessen op basis van een verschil in lading. De zouten, voor zover zij bestaan uit geladen deeltjes, worden aan het water onttrokken via een ion-selectief membraan door het aanbrengen van een spanningsverschil. Voor zowel EDR als CDI geldt dat zij stuurbaar zijn in de kwaliteit van het product door het aanpassen van het toegepaste spanningsverschil.

Ontziltling door middel van membranen, waarbij druk de drijvende kracht is en watermoleculen door het membraan geperst worden, gebeurt met Reverse Osmosis (RO) en Nanofiltratie (NF). Ook Forward Osmosis (FO) is een membraantechniek, maar de drijvende kracht is het verschil in osmotische druk. Zouten worden tegengehouden en vormen een brijn. Reverse Osmosis is de huidige, meest toegepaste ontziltlingstechnologie wereldwijd. Onderstaand overzicht van de verschillende membraanfiltratie technieken geeft een helder beeld van het toepassingsgebied van elk. Micro- en ultrafiltratie moeten daarbij vooral gezien worden als een voorbehandelingstechniek voor de verwijdering van deeltjes en bacteriën/virussen, terwijl NF en RO vooral op moleculaire schaal mono- en divalente ionen kunnen verwijderen.



Figuur 2 Vergelijking membraanfiltratietechnieken (Logisticon Water Treatment, n.d.)

ONTZILTINGSTECHNOLOGIEËN

In Bijlage I is een overzicht opgenomen van de verschillende ontziltlingstechnologieën en hun belangrijkste karakteristieken. Op grond van deze gegevens zijn een aantal technologieën geïdentificeerd, die eventueel toegepast kunnen worden in Zeeland. Deze zijn meegenomen in de analyse met de verschillende scenario's, nl. Reverse Osmosis (RO), Nanofiltratie (NF), ElectroDialysis Reversal (EDR), Capacitive Deionization (CDI), en Forward Osmosis (FO). De belangrijkste kenmerken van deze technologieën worden hieronder nog nader toegelicht. De niet-geselecteerde technieken worden niet in meer detail besproken.

REVERSE OSMOSIS / OMGEKEERDE OSMOSE (RO)

Bij omgekeerde osmose wordt het vervuilde/zoute water door middel van druk door een semipermeabel membraan (<0.001µm) gescheiden in een product (ontzilt water) en een geconcentreerde brijnstream. Deze technologie kan zowel voor brak- als zeewater worden toegepast en is beschikbaar voor verschillende capaciteiten (RPSEA Project, 2009). Maar er zijn hoge energiekosten (OpEx) aan verbonden

en er bestaat kans op biologische aangroei (biofouling) en neerslag van zouten (scaling). Hiervoor zijn verschillende bedrijven op zoek gegaan naar oplossingen, zoals *Lenntech*, *DuPont*, *Pentair*, *Koch*, *Hydronautics*, *Elemental Watermakers* en vele andere, waarbij de voorbehandeling wordt aangepast aan de situatie en energie wordt teruggewonnen. Ook binnen RO zijn meerdere configuraties mogelijk, afhankelijk van het zoutgehalte van het voedingswater. Bijgaande Tabel 1 (J.Henkel, DowDuPont) geeft het energieverbruik en de kapitaalskosten weer afhankelijk van het type RO dat wordt toegepast t.o.v. destillatie (evaporator). Er wordt onderscheid gemaakt tussen Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO), Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) en Ultra High Pressure Reverse Osmosis (UHPRO).

Tabel 1 Energieverbruik en investeringskosten voor verschillende type RO

Estimation	Capital costs	Energy cost
	\$ per m ³ /d Feed	kWh per m ³ Feed
Evaporator	2000 – 6000	22 – 40*
BW RO (<40 bar)	200 – 400	0.6 – 1
SW RO (<80 bar)	400 – 800	1.5 – 2
UHP RO (<120 bar)	600 – 1200	5 – 8

Especially for the evaporator the scale effect is significant



*without reusing heat

DOW CONFIDENTIAL - Do not share without permission

NANOFILTRATIE (NF)

Het vervuilde water wordt, door middel van druk, door een membraan (<0.01µm) gefilterd bij nanofiltratie. Deze technologie is inzetbaar voor brakwaterstromen (Vito, 2010). De kwaliteit van het product is minder hoog dan bij RO, aangezien er nog monovalente ionen aanwezig zullen zijn in het product (RPSEA Project, 2009). Maar een bijkomende voordeel is dat het energieverbruik aanzienlijk lager is dan bij RO (Vito, 2010).

ELECTRODIALYSIS REVERSAL (EDR)

Elektriciteit wordt toegepast middels elektroden en cation- & anion exchange membranen om ionen te onttrekken aan het water (=ED). EDR is gebaseerd op hetzelfde principe, maar hier wordt regelmatig de polariteit van elektroden omgedraaid om de membranen schoon te maken. EDR kan worden gebruikt voor het behandelen van brakwater met een zoutgehalte tot 8 g/l (RPSEA Project, 2009). Een groot voordeel van EDR is dat de kwaliteit van het effluent gestuurd kan worden door het toegepaste voltage te variëren en door het gebruik van meerdere stappen (stages), daarnaast is het chemieverbruik minimaal (Nambodiri, 2014).

CAPACITIVE DEIONIZATION (CDI)

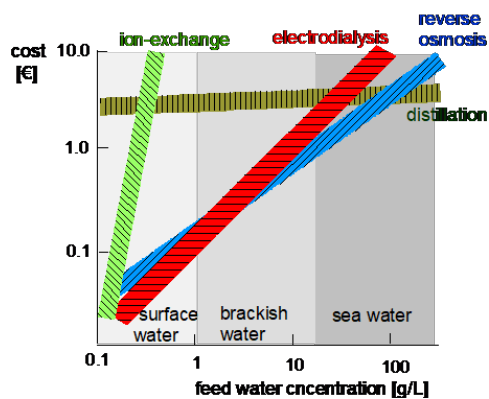
Capacitive Deionization verwijdert ionen uit het water door het toepassen van een elektrisch spanningsverschil tussen twee poreuze koolstofelektroden in welke ionen tijdelijk worden opgeslagen. Ionselectieve membranen zorgen voor de scheiding van ionen van het water. CapDI is geschikt voor het behandelen van licht brak water met een zoutgehalte tot 4 g/l (Voltea, 2016). De kwaliteit van het product is beïnvloedbaar door de energietoevoer aan te passen (Pan, 2020), welke relatief laag is, net zoals het chemieverbruik.

FORWARD OSMOSIS (FO)

FO is gebaseerd op het principe dat water naar de vloeistof met de hoogste osmotische druk beweegt, wanneer het gescheiden is door een semipermeabel membraan. Hiervoor is geen energie of druk nodig. Forward Osmosis, als ontziltingstechnologie, is geschikt voor zowel brak- als zeewater (RPSEA Project, 2009). Maar het herwinnen van de zoute oplossing (draw solution) heeft een hoog energieverbruik, met name thermische energie is nodig (Mazlan, 2016). Het geproduceerde water is zeer zuiver, wat ook een geconcentreerde brijnstream levert (Cath, 2006).

Een geschikte keuze voor een bepaalde ontziltingstechnologie hangt samen met het zoutgehalte van het voedingswater. Energie verbruik, kosten voor chemicaliën en kapitaalsinvesteringen zijn daarbij de belangrijkste beslissingscriteria. Onderstaande Figuur 3 (Bron: Strathmann cursus Aquila) geeft een relatief beeld van verschillende technieken in hun toepassingsgebied en de daarbij horende kosten (€/m³).

Water desalination costs



costs estimated for a required product concentration of < 0.2 g/L

Figuur 3 Verschillende ontziltingstechnieken in toepassingsgebied (concentratie voedingswater) met bijbehorende kosten

WATERKWALITEIT

ZOUT WATER (OOSTERSCHELDE)

Binnen Zeeland is veel zout (zee)water aanwezig; m.n. de Noordzee, delen van de Westerschelde, Oosterschelde, het Veerse Meer en Grevelingenmeer. De waterkwaliteit van de Oosterschelde zal als uitgangspunt worden gebruikt voor een zoutwaterkwaliteit binnen Zeeland. De gemiddelde waterkwaliteit van de Oosterschelde bij meetpunt Wissenkerke is gegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Waterkwaliteit Oosterschelde (locatie Wissenkerke – meetpunt Rijkswaterstaat)

Parameter	Eenheid	Range	Gemiddeld
Saliniteit / zoutgehalte	g/l	30-33	30-33
Zoutgehalte (EC)	mS/cm	29-40	35
pH	-	7,7-8,7	8,1
Zwevende stof / TSS	mg/l	2-85	15
Ammonium	mg/l	0,003-0,1	0,06
Natrium	mg/l	9250-12000	10138
IJzer	mg/l	0,04-1,5	0,4
Calcium	mg/l	310-480	404
Magnesium	mg/l	1060-1400	1227
Sulfaat	mg/l	2200-2690	2494
Mangaan	µg/l	0,5-4,4	1,3
Zink	µg/l	0,2-7,1	1,1
Koper	µg/l	0,3-2,8	1,0
Nitraat	mg/l	0,007-0,7	0,2
Fosfaat	mg/l	0,001-0,05	0,02

STERK BRAKWATER (WESTERSCHENGE)

Sterk brakke wateren bevatten een zoutgehalte tussen 3-10 g Cl⁻/l, of een EC tussen 5-15 mS/cm. Binnen Zeeland zijn veel waterbronnen met sterk brakwater beschikbaar; o.a. Zwaakse Weel, de Schenge, Braakman, Kanaal door Walcheren, en delen van de Westerschelde (Vroom, 2012). Dit zijn met name gebieden met brakke kwel of incidentele in-/overstroming of vermenging met zee- of getijdenwater, waarbij een verhoogd zoutgehalte in het water te vinden is (Projectbureau Kaderrichtlijn Water Schelde, 2008).

Voor de case *Sterk brakwater* zal de waterkwaliteit bij Gemaal de Piet worden gebruikt, deze is gelegen tussen de Westerschenge en De Piet, welke uitkomt in het Veerse Meer. Uit Tabel 3 blijkt overigens ook dat er omstandigheden zijn, waarbij dit water nagenoeg zoet is (chloride 170 mg/l, EC 1,3 mS/cm).

Tabel 3 Waterkwaliteit (maandelijkse meting van 2010-2020) sterk brak water (Gemaal de Piet)

Parameter	Eenheid	Range	Gemiddelde
Zoutgehalte (EC)	mS/cm	1,3-14,0	6,5
pH	-	7,3-10,0	8,4
Zwevende stof / TSS	mg/l		(zwak) opalescent
Ammonium	mg/l	0,07-2,0	0,3
Sulfaat	mg/l	110-480	275
Zink	mg/l	0,003-0,2	0,01
Koper	mg/l	0,001-0,4	0,009
Nitraat	mg/l	0,04-10,0	2,0
Nitraat + Nitriet	mg/l	0,05-10,0	2,1
Fosfaat	mg/l	0,03-3,2	1,1
Chloride	mg/l	170-4700	1812
Chlorofyl-a	µg/l	2-250	69,3

MILD BRAKWATER (PHILIPPINEKANAAL)

Onder mild brakke wateren wordt water met een zoutgehalte van 1000-3000 mg Cl⁻/l, of EC tussen 2-4 mS/cm verstaan. Veel polderwateren in Zeeland behoren tot dit type, doordat het zout met name wordt aangevoerd met kwelwater uit een zoute bodem. Dit water heeft een wisselende kwaliteit en zal in de zomer een hoger zoutgehalte bevatten dan in de winter door het neerslagoverschot. Andere voorbeelden van mild brak water binnen Zeeland zijn het kanaal Gent-Terneuzen, het Markiezaatmeer, de Eendracht en de Otheense Kreek (Projectbureau Kaderrichtlijn Water Schelde, 2008).

Voor de opstellen van een scenario voor mild brak water is de data van het Philippinekanaal in Zeeuws-Vlaanderen gebruikt met een gemiddelde EC van 3,4 mS/cm. In Tabel 4 zijn de overige parameters van de waterkwaliteit gegeven.

Tabel 4 Waterkwaliteit (maandelijkse meting van 2004-2007) mild brak water (Philippinekanaal)

Parameter	Eenheid	Range	Gemiddelde
Zoutgehalte (EC)	mS/cm	1,6-6,7	3,36
pH	-	7,8-9,0	8,4
Zwevende stof / TSS	mg/l		(zwak) opalescent
Ammonium	mg/l	<0,01-0,8	0,34
Nitraat	mg/l	<0,04-9,6	1,92
Nitraat + Nitriet	mg/l	<0,05-9,7	1,95
Fosfaat (Totaal P)	mg/l	0,56-2,8	1,35
Chloride	mg/l	260-3600	768,64
Chlorofyl-a	µg/l	3-140	51,63

IRRIGATIEWATER: GROETEN- EN FRUITTEELT

Onderstaande Tabel 5 toont de kwaliteitseisen voor de verschillende doeleinden van het irrigeren van groente- en fruitteelt. Binnen de fruitteelt wordt onderscheid gemaakt tussen droogteberegening, nachtvorstberegening en druppelbevloeiing. Beregenen tegen gewaskoeling of droogte heeft een hoge kwaliteit water nodig, anders beschadigt mogelijk het blad of de vrucht. Voor nachtvorstberegening mag de hoeveelheid chloride, ijzer en andere zouten in het water hoger zijn. De kwaliteitseisen van het irrigatiewater voor druppelbevloeiing zijn minder streng, aangezien het water niet op het gewas komt en dus geen directe schade kan aanrichten, alhoewel de hoeveelheid ijzer laag moet zijn om verstoppingen in leidingen te voorkomen. Verder is het optimale irrigatiewater afhankelijk van de situatie van o.a. het seizoen en de hoeveelheid aanwezige mest.

Tabel 5 Kwaliteitseisen voor verschillende gebruiksdoelen bij de fruit- en groententeelt (Waterportaal, n.d.), (Vlaanderen - Department Landbouw en Visserij, n.d.), (Bal ab, 2011)

Kwaliteitseisen		Droogteberekening Fruitteelt	Nachtvorst- berekening Fruitteelt	Druppelbevloeiing Fruitteelt	Irrigatiewater Groententeelt
Zoutgehalte (EC)	mS/cm				0.8-1.5
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Ammonium	NH ⁴⁺	< 2			
Natrium	Na ⁺	< 115			30-60
Chloride	Cl ⁻	< 250	<500	< 600	50-100
Bicarbonaat	HCO ₃ ⁻	< 250			>60
Kooldioxide	CO ₂	< 25			
Ijzer	Fe ²⁺	< 0.5- 1.0	< 3.0	< 3.3	1.1-1.7
Mangaan	Mn ²⁺	< 1			0.5-1
Kalium- permangaat	KMnO ₄	< 16			
Calcium	Ca ²⁺				<120
Magnesium	Mg ²⁺				<25
Sulfaat	SO ₄ ²⁻				<100
Borium	B				0.2-0.6
Zink	Zn ²⁺				0.2-0.7
Koper	Cu ²⁺				0.06-0.2

De zouttolerantie is afhankelijk van het gewas, in Tabel 6 wordt de zouttolerantie voor een aantal gewassen, die in Zeeland worden geteeld, weergegeven. Wanneer de kwaliteit van het irrigatiewater voldoende kan worden aangepast, indien de technologie daartoe geschikt is, kunnen hiermee kosten worden bespaard.

Tabel 6 Zouttolerantie van verschillende gewassen (groente en fruit) in Zeeland (Bakel, 2009) (Tanji, 2002) (Department of Primary Industries , 2016) (Dam, 2007)

Gewas	Schadedrempel Gietwater (mS/cm)	Bodemvocht Druppelirrigatie (mS/cm)	Geadviseerd Zoutgehalte (mS/cm)
Aardappel	1.1	4.3	<1.1
Ui	0.7	2.5-3.0	<0.7
Gerst	5.3	20.0	<5.3
Tarwe	4.0	15.0	<4.0
Suikerbiet	4.7	6.5-17.5	<4.7
Appel	1.5	1.7	0.7-1.0
Peer	1.5	1.7	0.7
Zwarte bes	1.5	n.d.	<1.5
Pruimen	1.5	1.5	0.7-1.5
Kersen	1.5	0.9	<1.5

IRRIGATIEWATER: GLASTUINBOUW

De gewenste kwaliteit van het irrigatiewater binnen de glastuinbouw ligt hoger dan voor de fruit- en groententeelt, zoals gegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Kwaliteitseisen voor het irrigatiewater binnen de glastuinbouw (Ginderachter, 2006) (Waterportaal, n.d.)

Irrigatiewater glastuinbouw				
Parameter	Eenheid	Algemeen	Aardbeien	Vruchtgroenten
Zoutgehalte (EC)	mS/cm	<0.55		
pH	-	>5.0		
Ammonium	mg/l	<7		
Natrium	mg/l	<11	<6.9	<23
IJzer	mg/l	<0.6	<0.56	<0.6
Calcium	mg/l	<80	<80	<100
Magnesium	mg/l	<12	<49	<18
Sulfaat	mg/l	<48	<96	<144
Mangaan	mg/l	<0.5		<18
Zink	mg/l	<0.3	<0.33	<0.5
Koper	mg/l	<0.063		
Chloride	mg/l	<18	<35	<35
Bicarbonaat	mg/l	<244		<610
Boron	mg/l	<0.3	<0.065	<0.3
Silicium	mg/l		<5.6	

SCENARIO'S

Op basis van de verschillende influent kwaliteiten (zout, sterk en mild brak water) en de verschillende kwaliteiten irrigatiewater (groente- en fruitteelt of glastuinbouw) zijn zes scenario's samengesteld, zie Tabel 8. Voor deze scenario's is bepaald welke ontziltingstechnologie het meest geschikt is, en een daarbij passende voorbehandeling.

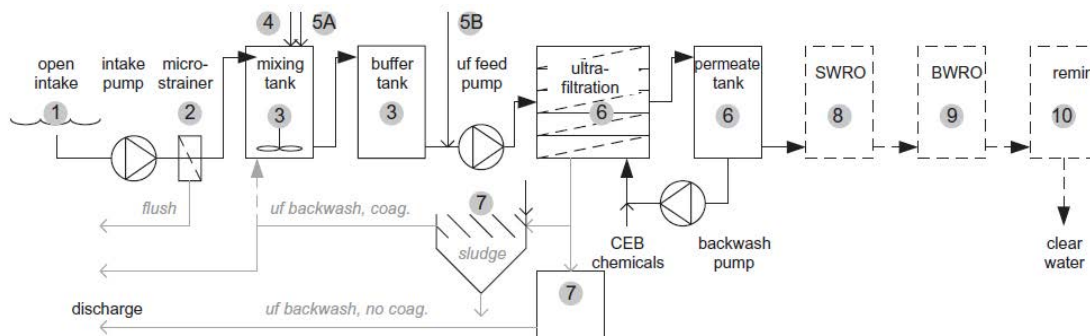
Tabel 8 De verschillende scenario's met bijbehorende ontziltingstechnologie

Scenario	Influent	Effluent	Technologie
1	Zout water (Oosterschelde)	Zoet water (groenten- en fruitteelt)	SWRO
2	Zout water (Oosterschelde)	Zoet water (glastuinbouw)	SWRO
3	Sterk brak water (Westerschenge)	Zoet water (groenten- en fruitteelt)	NF
4	Sterk brak water (Westerschenge)	Zoet water (glastuinbouw)	BWRO
5	Mild brak water (Philippinekanaal)	Zoet water (groenten- en fruitteelt)	CDI
6	Mild brak water (Philippinekanaal)	Zoet water (glastuinbouw)	CDI/BWRO

SCENARIO 1. ZOUT WATER (OOSTERSCHELDE) -> IRRIGATIEWATER GROENTEN- EN FRUITTEELT

Reverse Osmosis (RO) kan irrigatiewater voor groente en fruit met de gewenste kwaliteit leveren, en is geschikt om zout water te behandelen. Aangezien het Oosterscheldewater verschillende componenten bevat die schadelijk zijn voor de RO membranen, waaronder zwevende deeltjes, zouten, en organisch materiaal, is een geschikte voorbehandeling nodig. Er wordt onderscheid gemaakt tussen conventionele voorbehandeling (o.a. coagulatie/flocculatie/sedimentatie, multi media filtratie (MMF), actieve kool, dissolved air flotation (DAF), UV desinfectie) en onconventionele voorbehandeling (bestaand uit ultra- of nanofiltratie) (Lenntech, n.d.). Conventionele voorbehandeling heeft lagere investerings- en productiekosten (5-10%) ten opzichte van onconventionele voorbehandeling, maar wanneer er beperkt ruimte is heeft de voorbehandeling door middel van membranen de voorkeur. Daarnaast is de kwaliteit van het geproduceerde water hoger bij het gebruik van membranen als voorbehandeling. (Badruzzaman, 2019) (Pan, 2020) (Lenntech, n.d.).

In de periode 2009-2012 is door Evides de behandeling van Oosterschelde water naar drinkwater onderzocht met de volgende zuiveringsstappen, zie Figuur 4 (Schurer, 2013). De Oosterschelde is een waterbron met wisselende waterkwaliteit in o.a. hoeveelheid zwevend stof en algen, en ook temperatuur, waarop de voorbehandeling moet aansluiten. Hiervoor werd in deze opstelling o.a. een microstrainer en coagulatie gebruikt, maar de invloed van algen (seizoenseffect) was aanwezig bij deze opstelling. Het gebruik van coagulatie als voorbehandeling voor ontziltzing tijdens algenbloei is vaak niet afdoende, terwijl er wel een constante productie van productwater nodig is (Tabatabai, 2014).



Figuur 4 Zuiveringsstappen voor ontziltzen van Oosterschelde water tot drinkwater, onderzocht door Evides (Schurer, 2013).

Voor de analyse is gekozen om gebruik te maken van een screening of zand/grind bezinking (Sandfang of Zandvanger), vervolgens Dissolved Air Flotation (DAF) en Multimediafiltratie (MMF) als voorbehandeling voor RO (Figuur 5). Deze opstelling is robuuster voor de invloed van algen (Bonnelye, 2004). DAF vormt kleine luchtballen in het water, welke aan de onzuiverheden in het water hechten (Dutch Water Sector, 2020). Hiermee wordt de troebelheid (NTU) in het water verminderd met 77-82% (Farmerie, 2009). Daarnaast worden ook algen, oliën en vetten, BOD en nutriënten verwijderd met DAF. De toegestane limiet voor DAF is 60 mg/l zwevend stof en olie en vetten tot 10 mg/l (Peleka, 2008) (Badruzzaman, 2019). In plaats van multimediafiltratie (MMF) zou ook een UF kunnen worden gebruikt, maar dit is gezien de kwaliteit niet noodzakelijk (Jezowska, 2009).



Figuur 5 Zuiveringsstappen van Oosterschelde water naar irrigatiewater voor groenten en fruit.

SW30HR-380 membranen hebben 99,7% verwijdering van zouten, wat voldoende kwaliteit levert voor het gewenste product. Tijdens het proces (RO) gaat veel water verloren, in principe geldt een water opbrengst van 50% bij 1 stap RO, 75% bij 2 stappen, 87,5% bij 3 stappen. Voor dit scenario wordt het aangeraden om minimaal 2 stappen (of stages) te gebruiken en daarmee een efficiënter proces te hebben; het concentraat van stap 1 wordt door een andere RO behandeld en daarmee wordt meer water gewonnen (Matten, n.d.).

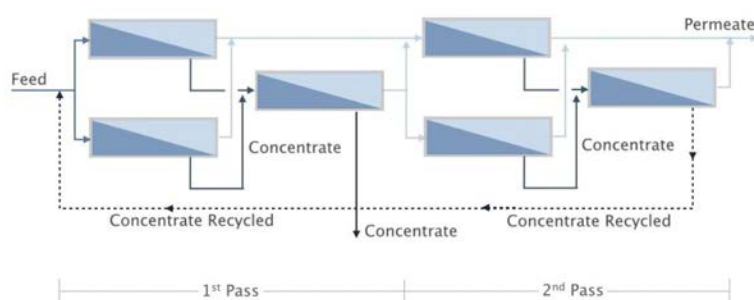
In Tabel 9 is de geproduceerde kwaliteit weergegeven, berekend met software van WAVE, welke overeenkomt met de gewenste kwaliteit voor irrigatiewater. Het gebruik van RO levert demiwater, dat vaak te weinig mineralen bevat om gebruikt te worden in de landbouw, alhoewel dit variabel is per gewas. Voor het toevoegen van mineralen zijn verschillende oplossingen: het vermengen met vervuild water (Suwaileh, 2020), het toevoegen van (organisch) mest of het toevoegen van mineralen als een nabehandeling van de RO. Door het toevoegen van mineralen na de ontzilting kan een exacte kwaliteit voor het irrigatiewater bereikt worden.

Tabel 9 De geproduceerde kwaliteit vanuit Oosterschelde water met o.a. RO tot irrigatiewater voor groente- en fruitteelt.

	Voedingswaterkwaliteit Oosterschelde	Geproduceerde waterkwaliteit	Gewenste kwaliteit irrigatie	
			Groententeelt	Fruিতেelt
Natrium (mg/l)	10.087	34	30-60	<115
Chloride (mg/l)	18.110	56	50-100	<250

SCENARIO 2. ZOUT WATER -> IRRIGATIEWATER GLASTUINBOUW

De vereiste kwaliteit voor het irrigeren in de glastuinbouw is hoger, en daardoor zal de behandeling verschillen van scenario 1. Allereerst zullen andere RO membranen worden geselecteerd met een hoger verwijderingspercentage van zouten. Door het gebruik van een twee-pas-systeem kan een hogere kwaliteit worden geleverd, doordat het water twee keer door een RO wordt behandeld (Figuur 6), dit levert een verwijderingspercentage van 99,9%.



Figuur 6 Multi-pass-systeem RO

Figuur 7 toont een mogelijke zuivering om Oosterschelde water te behandelen tot irrigatiewater geschikt in de glastuinbouw (Tabel 10).



Figuur 7 Zuiveringsstappen voor Oosterschelde water naar irrigatiewater voor glastuinbouw

Tabel 10 De geproduceerde kwaliteit met dual-pass RO

	Voedingswaterkwaliteit	Productwaterkwaliteit	Gewenste kwaliteit
			Glastuinbouw
Natrium (mg/l)	10.087	4,0	<11
Chloride (mg/l)	18.110	7,2	<18

Ook zouden CDI of mengbed ionenwisseling (MB) een geschikte nabehandeling kunnen zijn om tot de gewenste kwaliteit te komen (Skuse, 2020). Een voordeel van het gebruik van MB als post-treatment, over het gebruik van twee passes, is het bepalen van de effluent kwaliteit en een hogere waterproductie. Met een MB kan in theorie 100% van de ionen verwijderd worden (Lenntech, n.d.). Dit levert een complexer systeem met hogere investeringskosten.

Door meerdere zuiveringsstappen te gebruiken, bij zowel scenario 1 en 2, wordt de CO₂-footprint verhoogd. Een SWRO heeft een relatief lage CO₂-footprint, in vergelijking met thermische ontzilting, maar deze bedraagt nog steeds 0,4-6,7 kg CO₂/m³ (Bhojwani, 2018) (Cornejo, 2014). Voor het verlagen van de footprint moet de energie meer efficiënt worden gebruikt en gerecycled, en is de overgang naar het gebruik van duurzame energie aangeraden (Tal, 2018).

Met het gebruik van RO zal er een brijnstroom ontstaan met een groot volume, daarvoor moet een mogelijkheid beschikbaar zijn voor het lozen van de geconcentreerde afvalstromen. De brijnstroom zou mogelijk in de Oosterschelde geloosd kunnen worden op locaties met veel stroming. Voor dit scenario zal een centrale ontzilting het meest efficiënt zijn, maar dit vereist infrastructuur of transport voor het distribueren van het geproduceerde water naar de landbouwgronden en eventueel andere afnemers. Dit alles zal extra kosten met zich meebrengen.

SCENARIO 3. STERK BRAK WATER -> IRRIGATIEWATER GROENTEN- EN FRUITTEELT

Voor het ontzilten van sterk brak water zijn meerdere technologieën beschikbaar: o.a. FO, BWRO en NF. FO wordt genoemd als behandeling van sterk brak water, in de vorm van een hybride FO-NF270, met voordelen zoals minder druk, minder vervuiling op membranen, efficiënter water- en chemieverbruik en geen voorbehandeling. FO verbruikt veel energie, met name thermische energie, en dit is niet altijd in grote hoeveelheden aanwezig (normaliter wordt gebruik gemaakt van restwarmte uit de industrie). Daardoor is deze technologie inefficiënt in energieverbruik en CO₂ uitstoot, daarnaast is er gebrek aan hoogwaardige membranen en een gemakkelijke te scheiden 'draw solution' (Zhao, 2012).

BWRO is de meest gangbare technologie voor het ontzilten van brak water, maar heeft een relatief hoog (elektrisch) energieverbruik en levert een te hoge kwaliteit irrigatiewater voor de groente- en fruitteelt. Nanofiltratie (NF) is daarmee meer geschikt voor het ontzilten van sterk brakwater binnen Zeeland voor irrigatiewater voor groenten en fruit. NF is effectiever in energieverbruik en heeft daarmee lagere operationele kosten dan RO (Wafi, 2019). De kwaliteit van het effluent van NF is lager dan van RO, maar is geschikt voor irrigatiewater met dit doeleinde en vereist geen remineralisatie (Ghermandi, 2009) (Izadpanah, 2012).

De kwaliteit van het brakke water voldoet niet aan de eisen die aan NF membranen zijn gesteld, daarom is een voorbehandelingsstap nodig. De voorbehandeling verwijdert zwevend stof (TSS), colloïden, zware metalen, bacteriën en virussen om zo verstopping van de membranen te voorkomen. Een ultrafiltratie (UF) verwijdert deze componenten, en kan de geschikte waterkwaliteit voor NF garanderen (Jezowska, 2009). Daarnaast verwijdert UF een kleine hoeveelheid van de geleidbaarheid en chloride (Fan, 2020).

Voor de UF is ook een voorbehandelingsstap vereist om verstopping te voorkomen, dit kan door middel van coagulatie/flocculatie/vlokverwijdering (TUDelft, n.d.) (Fan, 2020). Een ander onderzoek wees uit dat een fijn microscreen (80-120 µm), als voorbehandeling voor UF, voldoet bij het behandelen van zeewater (Lau, 2014). Bij het behandelen van brak grondwater, wat relatief weinig verontreiniging bevat, naar irrigatiewater, zijn een MMF en filters van 5 µm en 1 µm voldoende als voorbehandeling op NF (Wafi, 2019). Ook kan gekozen worden voor een voorbehandeling met MMF als de zuivering minder robuust hoeft te zijn, of minder bedrijfszekerheid vereist.

In dit geval is gekozen voor een microstrainer, gevolgd door een ultrafiltratie voor het aanwezige zwevend stof en algen in de Westerschenge (Figuur 8). NF verwijdert dan, na de voorbehandeling, het organisch materiaal en zouten. De kwaliteit van het geproduceerde water van NF is stabiel en de operationele kosten zijn laag tijdens langdurig gebruik. Het ontwerp en de toepassing bij een fluctuerende kwaliteit water zou een uitdaging kunnen zijn (Fan, 2020).

Op basis van de aanwezige data zou het gebruik van één NF membraan voldoen aan de eisen voor de berekening van fruitteelt tijdens droogte. Om een hogere verwijdering van ionen te hebben kan een multi-pass systeem worden gebruikt (Hilal, 2007). Voor een efficiënt proces is het gebruik van meerdere stappen aangeraden om een hogere waterproductie te verkrijgen. De Westerschenge is geen onuitputbare bron, en het water zal efficiënt moeten worden gebruikt.



Figuur 8 Zuiveringsstappen van Westerschenge water naar irrigatiewater voor groente- en fruitteelt

Experimenten wezen uit dat NF90 membranen het meest geschikt zijn bij het behandelen van verschillende waterkwaliteiten met als doeleinde irrigatiewater. De waterkwaliteit na behandeling met NF90 bevat nog bepaalde hoeveelheid aan monovalente ionen, maar het product kan gebruikt worden als irrigatiewater zonder schade aan te brengen aan de gewassen (Bunami, 2014) (Ghermandi, 2009) (Izadpanah, 2012). Met de zuiveringsstappen van Figuur 8 kan de volgende kwaliteit geproduceerd worden met NF (Tabel 11).

Tabel 11 De geproduceerde kwaliteit met NF90-membranen (WAVE)

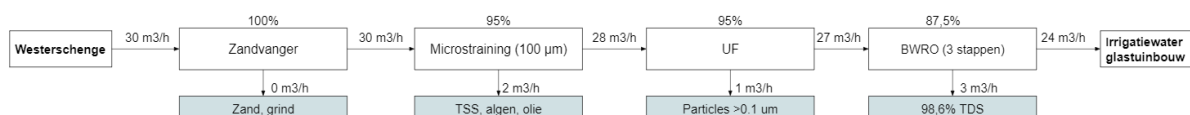
	Voedingswaterkwaliteit	Productwaterkwaliteit	Gewenste kwaliteit irrigatie	
			Groententeelt	Fruitteelt
Natrium (mg/l)	1014	22	30-60	<115
Chloride (mg/l)	1817	37	50-100	<250

SCENARIO 4. STERK BRAK WATER -> ZOET WATER (IRRIGATIEWATER GLASTUINBOUW)

Reverse Osmosis verwijdert meer zouten dan NF, en is daarmee geschikt voor het behandelen van brak/zout water naar irrigatiewater geschikt voor de glastuinbouw. De voorbehandeling voor NF of Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO) verschilt niet, aangezien de membranen overeen komen (Su,

2017). BWRO wordt in Nederland vaker toegepast bij het behandelen van brak grondwater tot irrigatiewater binnen de glastuinbouw (Waal, 2020).

De zuiveringsstappen (Figuur 9) bestaan uit dezelfde voorbehandeling als scenario 3, maar de ontzilting gebeurt door een BWRO. BWRO verwijdert ook monovalente ionen en divalente ionen uit het brakke water, waardoor het een laag zoutgehalte bevat na behandeling (Tabel 12). Er worden meerdere stappen gebruikt om meer water te winnen.



Figuur 9 Zuiveringsstappen van Westerschenge water naar irrigatiewater voor glastuinbouw

Tabel 12 De geproduceerde kwaliteit met BWRO (WAVE)

	Voedingswaterkwaliteit	Productwaterkwaliteit	Gewenste kwaliteit
			Glastuinbouw
Natrium (mg/l)	1014	9,8	<11
Chloride (mg/l)	1817	16	<18

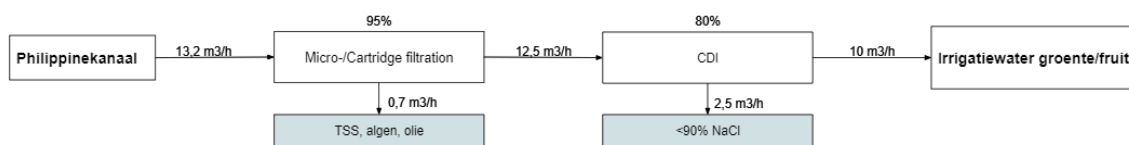
Tussen de scenario's is onderscheid door het gebruik van NF of BWRO, maar de CO₂-footprint zal vergelijkbaar zijn en 0,4-2,5 kg/m³ bedragen (Bhojwani, 2018) (Cornejo, 2014). Deze is lager dan een SWRO door het lagere energieverbruik, maar kan efficiënter zijn door het recyclen van energie en het gebruik van duurzame energie. Daarnaast geldt voor zowel scenario 3 als 4, dat het een centrale zuivering vereist en geen mobiel systeem is.

SCENARIO 5. MILD BRAK WATER -> IRRIGATIEWATER GROENTEN- EN FRUITTEELT

Capacitive Deionization (CDI) is geschikt voor het behandelen van brak water tot 4 mS/cm, wat past binnen dit scenario van mild brak water. De technologie behandelt het water tot de gewenste kwaliteit, door middel van het variëren van de spanning en daarmee de verwijdering van ionen (Anderson, 2010) (Christen, 2006). Andere voordelen zijn de energie-efficiëntie, door het gebruik van lage spanning en lage drukpompen. Daarnaast wordt er weinig gebruik gemaakt van chemicaliën. De technologie is nog niet algemeen toegepast, en er wordt nog veel onderzoek gedaan naar het verbeteren van elektrodes en/of membranen en het optimaliseren van operationele voorwaarden (Ahmed, 2018) (AlMarzooqi, 2014). Het systeem bestaat uit modules, en kan daarmee gemakkelijk worden opgeschaald (Bales, 2019). Daarnaast bestaan er mobiele, kleinschalige installaties van CDI, die tijdelijk kunnen worden ingezet en worden verplaatst. Het zou dus als een decentrale ontzilting kunnen worden gebruikt (Pan, 2020).

CDI vereist weinig voorbehandeling, welke vooral bestaat uit een filtratiestap. Verschillende typen voorbehandeling worden genoemd voor CDI; Biological Activated Carbon (BAC), microfiltratie, ultrafiltratie, cartridge filtratie, coagulatie, en ozonisatie (Pan, 2020). De voorbehandeling is met name om biologische vervuiling te verminderen door het organisch materiaal vooraf te zuiveren, en daarmee de elektroden te beschermen (Kim, 2021) (Choi, 2019). Figuur 10 toont de zuiveringsstappen met de waterproductie en – verwijdering. In dit scenario is uitgegaan van een lagere waterproductie, doordat de bronnen van zwak brak water vaak beperkter zijn in volume.

De verwijderingsefficiëntie voor zouten fluctueert met de hoeveelheid toegepaste elektrische stroom (Wimalasiri, 2019). De productie kan worden aangepast aan een andere gewenste kwaliteit, maar ook aan een andere voedingswaterkwaliteit, wat CDI effectief in gebruik maakt (Voltea).



Figuur 10 Zuiveringsstappen van mild brak water naar irrigatiewater voor groente- en fruitteelt

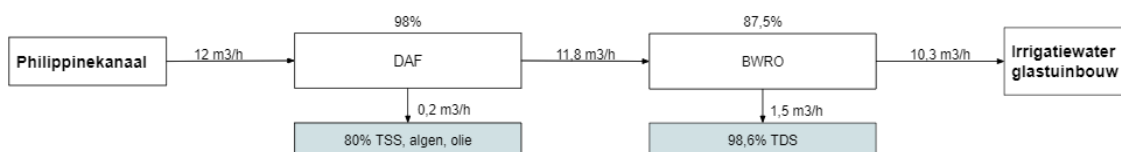
Tabel 13 De geproduceerde kwaliteit met CDI

	Voedingswaterkwaliteit	Productwaterkwaliteit	Gewenste kwaliteit irrigatie	
			Groententeelt	Fruитеelt
Natrium (mg/l)	-	-	30-60	<115
Chloride (mg/l)	507	50-250	50-100	<250

Tijdens het proces worden geen chemicaliën toegevoegd, wat het lozen van afvalstromen op oppervlaktewater gemakkelijker maakt, volgens Voltea. Het lozen van de brijnstream bij een decentrale toepassing vereist een andere aanpak. De CO₂-footprint van CDI is relatief laag door het lage energieverbruik (Pan, 2020).

SCENARIO 6. MILD BRAK WATER -> IRRIGATIEWATER GLASTUINBOUW

Voor het produceren van irrigatiewater voor de glastuinbouw moet meer dan 96% van chloride verwijderd worden uit het mild brakke water. Hiervoor is een BWRO het meest passend. Voor het bepalen van een bijpassende voorbehandeling is meer data van de waterkwaliteit nodig, maar met de aanwezige data zijn de volgende behandelingsstappen bepaald, zie Figuur 11. De DAF zal als voorbehandeling de TSS en algen verwijderen uit het water, dat vervolgens ontzilt wordt met BWRO (hiervoor worden drie stappen gebruikt). Dit levert de kwaliteit die gegeven is in Tabel 14, welke geschikt is voor het gebruik als irrigatiewater in de glastuinbouw.



Figuur 11 Zuiveringsstappen van mild brak water naar irrigatiewater voor glastuinbouw

Tabel 14 De geproduceerde kwaliteit met BWRO

	Voedingswaterkwaliteit	Productwaterkwaliteit	Gewenste kwaliteit
			Glastuinbouw
Natrium (mg/l)	-	-	<11
Chloride (mg/l)	507	7	<18

Een nadeel van het gebruik van BWRO in dit scenario is de centrale aanpak die deze zuivering vereist. In het scenario van mild brak water zullen met name de polderwateren als bron fungeren, waarbij een

decentrale zuivering de voorkeur heeft. Daarnaast zal dit een hogere CO₂-footprint (Bhojwani, 2018) (Cornejo, 2014) en kosten opleveren.

CDI verwijderd in theorie niet meer dan 90% van het chloridehalte in water, maar volgens Voltea zou CDI ook in dit scenario kunnen worden toegepast. Dit zal wel een groter systeem vereisen met bijkomende investeringskosten, door de hoge vereiste kwaliteit. Aanvullend onderzoek en een uitgebreidere kostenanalyse zal nodig zijn om de efficiëntie te bepalen.

OVERZICHT VAN KOSTEN

Onderstaande tabel geeft een overzicht van kosten voor verschillende voorbehandelingen en ontziltingstechnologieën. Hierbij moet benoemd worden dat dit geschatte waardes zijn, en deze sterk afhankelijk kunnen zijn van meerdere factoren. De operationele kosten zijn (nagenoeg) evenredig met de geproduceerde hoeveelheid water. De investeringskosten (CapEx) zijn berekend op een operationele periode van 10 jaar met 8000 draaiuren per jaar (90%).

Tabel 15 Overzicht van kosten voor voorbehandeling en ontzilting

Kosten in €/m ³	ZW/SB/LB	Recovery %	CapEx	OpEx	Totaal
Strainer / bagfilter		99,7	0,01	0,01	0,02
Cartridge filtratie		95		0,02	
Coagulatie/flocculatie		98	0,05	0,05	0,1
DAF		98	0,1	0,05	0,15
BAKF		95	0,1	0,05	0,15
Zandfiltratie		95	0,1	0,05	0,15
MMF		95	0,1	0,05	0,15
Microfiltratie		90	0,1	0,15	0,25
Ultrafiltratie		85-90	0,1	0,2	0,3
Ionenwisseling		93-97	0,1	0,1	0,2
Nanofiltratie	SB/LB	70-85	0,3	0,1	0,4
Forward Osmosis		80	0,4	0,3	0,7
BW Reverse Osmosis	LB	65 (per stap)	0,35	0,15	0,5
SW Reverse Osmosis	ZW/SB	50 (per stap)	0,4	0,2	0,6
Capacitieve Deïonisatie	LB	65 (per stap)	0,2	0,15	0,35
Electrodialysis Reversal	LB	50 (per stap)	0,3	0,2	0,5
Membraandestillatie	SB/LB	5 (per stap)	0,5	1,5	2,0

Op basis van dit kostenoverzicht kan een schatting worden gemaakt van de kosten voor de verschillende scenario's (Tabel 16). Wat hierbij wel benoemd moet worden is dat dit enkel de kosten van de technologieën zijn, hierbij zijn meerdere factoren, zoals grond, infrastructuur, pompen, lozen van brijnstroom etc. niet meegenomen in de analyse. Het geeft wel aan hoe zouter het water, des te hoger de kosten zullen zijn om water van voldoende kwaliteit te kunnen produceren. Er is onderscheid gemaakt tussen de kosten voor het een installatie die het gehele jaar of een seizoen operationeel is. Aangezien de zoetwaterbehoefte met name aanwezig is in het voorjaar/zomer, zullen de investeringskosten relatief hoger zijn. De hogere kosten kunnen voorkomen worden door het gebruik van zoetwateropslag, of het water in de andere seizoenen in te zetten bij andere doeleinden.

De kosten voor het geproduceerde water door middel van ontzilting liggen vaak hoger dan traditionele waterbronnen. Momenteel is de leidingwaterprijs voor fruitteilers in Zuid-Beveland ongeveer €0,60/ m³

landbouwwater (via Evides) volgens Stowa. Deze prijs is voor de productie van het water en voor investeringen in de infrastructuur, daarnaast stimuleert het efficiënt watergebruik. Het behandelen van sterk brak en zout water voor ontzilting ligt boven deze prijs, maar naar verwachting zal de waterprijs de komende jaren stijgen en ontzilting aantrekkelijker maken. Voor nu zal het enkel winstgevend kunnen zijn bij het produceren van hoogwaardige gewassen in de glastuinbouw, die een hoge kwaliteit water vereisen (Martinez-Alvarez, 2016).

Voor scenario 1 en 2 is nu geen onderscheid in de kosten, alhoewel in werkelijkheid de investeringskosten voor scenario 2 hoger zullen zijn door het gebruik van meerdere membranen, en de daarbij behorende operationele kosten. De operationele kosten (energieverbruik) van de scenario 5 voor het behandelen van mild brak water zal sterk afhankelijk zijn van de gewenste waterkwaliteit (Ahmed, 2018).

Tabel 16 Geschatte kosten voor de scenario's

	Totale kosten/technologie	Totale kosten (gehele jaar operationeel)	Totale kosten (% jaar operationeel)
Scenario 1 Zeewater -> groente/fruit	€0,15/m ³ (DAF) €0,15/m ³ (MMF) €0,60/m ³ (SWRO)	€0,90/m ³	€2,70/m ³
Scenario 2 Zeewater -> glastuinbouw	€0,15/m ³ (DAF) €0,15/m ³ (MMF) €0,60/m ³ (SWRO)	€0,90/m ³	€2,70/m ³
Scenario 3 Sterk brak -> groente/fruit	€0,02/m ³ (Strainer) €0,30/m ³ (UF) €0,40/m ³ (NF)	€0,72/m ³	€1,95/m ³
Scenario 4 Sterk brak -> glastuinbouw	€0,02/m ³ (Strainer) €0,30/m ³ (UF) €0,50/m ³ (BWRO)	€0,82/m ³	€2,20/m ³
Scenario 5 Mild brak -> groente/fruit	€0,25/m ³ (MF) €0,35/m ³ (CDI)	€0,60/m ³	€1,50/m ³
Scenario 6 Mild brak -> glastuinbouw	€0,15/m ³ (DAF) €0,50/m ³ (BWRO)	€0,65/m ³	€2,00/m ³

CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Dit rapport biedt een overzicht van de mogelijkheden voor ontzilting in Zeeland, en een indicatie van daarbij behorende kosten, voorbehandelingen, en andere voorwaarden.

Voor het ontzilten van zeewater is momenteel reverse osmosis (RO) de meest geschikte technologie met de laagste kosten, en levert een hoge kwaliteit water. RO is momenteel niet competitief met traditionele irrigatiebronnen, door de hoge waterprijs, (biologische) vervuiling (kosten voor het vervangen van membranen), de CO₂ footprint en de benodigde infrastructuur bij het gebruik van een centrale zuivering. Maar er zijn nieuwe technologieën in ontwikkeling; Nanofiltratie (NF) (geschikt voor behandeling van zout water), Forward Osmosis (FO), Membraandestillatie (MD) en Adsorption Distillation (AD). Daarnaast zullen de verwachte afname van zoetwaterbronnen en extreme droogte meer mogelijkheden/noodzaak bieden voor het ontzilten van zout water door middel van RO of andere ontziltingstechnologieën, wanneer de huidige gewassen geteeld worden.

Voor het behandelen van sterk brakwater is nu een uitgebreide voorbehandeling meegenomen voor zowel het scenario met BWRO en NF, maar het Westerschenge water bevat ook regelmatig mild brak water. Een hybride systeem zou passend zijn voor de behandeling van dit water, waarbij wordt ingespeeld op de kwaliteit van het water.

In Zeeland is veel mild brak water aanwezig, met name op kleine schaal in de polders, waardoor de voorkeur uitgaat naar een decentrale ontzilting. CDI vereist weinig voorbehandeling, en kan als kleinschalige, decentrale installatie worden ingezet. Voor een hogere kwaliteit productwater zou ook een BWRO ook passend zijn, maar dit resulteert in hogere kosten.

Op het moment dat er brak water aanwezig is in de omgeving zal dat altijd de voorkeur hebben in verband met de lagere kosten van de ontzilting, de CO₂ footprint en de kleinere brijnstroom. Het ontzilten van zout water heeft het voordeel van een duurzame bron, die niet uitgeput raakt.

Een nieuw concept is een dual intake systeem, waarbij de waterzuivering geschikt is voor zowel het ontzilten van het zeewater als van brakwater. In het geval van Zeeland zou dit mogelijkheden bieden door gebruik te maken van brak water wanneer dit aanwezig is, en anders over te schakelen naar het ontzilten van zout water. Het behandelen van brak water heeft altijd de voorkeur, door de lagere kosten en lagere CO₂ footprint. Dit maakt het proces meer efficiënt doordat er altijd water aanwezig is, en er energie/kosten bespaard kunnen worden in vergelijking met een traditionele ontzilting (Dutch Water Sector , 2020). Maar dit zal hogere investeringskosten tot gevolg hebben, en zal een centrale zuivering vereisen door de omvang.

Voor verder onderzoek zou het modelleren van waterzuiveringen voor specifieke situaties een mogelijkheid zijn, zoals DESALT (Bianchi, 2020) . Zo kan bepaald worden welke technologieën het meest passend zijn voor specifieke waterkwaliteiten.

BRONVERMELDING

- Ahmed, M. A. (2018). Capacitive deionization: Processes, materials and state of the technology. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 178-192.
- AlMarzooqi, F. A. (2014). Application of Capacitive Deionisation in water desalination: A review. *Desalination* 342, 3-15.
- Anderson, M. A. (2010). Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete? *Electrochimica Acta* 55, 3845-3856.
- Badruzzaman, M. e. (2019). Selection of pretreatment technologies for seawater reverse osmosis plants: A review. *Desalination*, 78-91.
- Bakel, P. e. (2009). *Review of crop salt tolerance in the Netherlands*. Wageningen: Alterra Report 1926.
- Bal ab, J. &. (2011). *Water Optimalisatie Plan Fruitteelt*. Goes: ZLTO Advies .
- Bales, C. e. (2019). Low cost desalination of brackish groundwaters by Capacitive Deionization (CDI) – Implications for irrigated agriculture. *Desalination* 453, 37-53.
- Bonnelye, V. e. (2004). Reverse Osmosis on open intake seawater: pre-treatment strategy. *Desalinatino* 167, 191-200.
- Bunami, S. e. (2014). Application of nanofiltration for reuse of wastewater. *International Journal of Global Warming* 6, 325-338.
- Choi, J. e. (2019). Applications of capacitive deionization: Desalination, softening, selective removal, and energy efficiency. *Desalination* 449, 118-130.
- Christen, K. (2006). Desalination technology could clean up wastewater from coal-bed methane production. *Environ. Sci.* , 639.
- Dam, A. M. (2007). *Zouttolerantie van landbouwgewassen - Deelrapport Leven met zout water*. Wageningen: Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. .
- Department of Primary Industries . (2016). *Salinity tolerance in irrigated crops*. NSW Department of Primary Industries.
- Dutch Water Sector . (2020, July 15). *Singapore's dual-mode desalination plant operational* . Retrieved from <https://www.dutchwatersector.com/news/singapores-dual-mode-desalination-plant-operational>
- Fan, G. e. (2020). Operating parameters optimization of combined UF/NF dual-membrane process for brackish water treatment and its application performance in municipal drinking water treatment plant. *Water Process Engineering* 38, 101547.
- Farmerie, J. (2009, June 1). *Dissolved Air Flotation for Membrane Pretreatment* . Retrieved from WaterWorld: <https://www.waterworld.com/home/article/16199129/dissolved-air-flotation-for-membrane-pretreatment>

- Ghermandi, A. (2009). The advantages of NF desalination of brackish water for sustainable irrigation: The case of the Arava Valley in Israel. *Desalination and Water Treatment* 10, 101-107.
- Ginderachter, N. v. (2006). *Recirculatie van water in de glastuinbouw*. Brussel: Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap .
- Hilal, N. A.-Z. (2007). Performance of Nanofiltration Membranes in the Treatment of Synthetic. *Separation Science and Technology Vol 42*, 1-23.
- Izadpanah, A. &. (2012). The Ability of a Nanofiltration Membrane to Remove Hardness. *Water* 4, 283-294.
- Jezowska, A. e. (2009). Ultrafiltration as direct pre-treatment of seawater - a case study . *Desalination* 245, 723-729.
- Khan, M. S. (2018). Desalination of Seawater through Gas Hydrate Process: An. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 55, 65-73.
- Kim, H. e. (2021). Pretreatment for capacitive deionization: Feasibility tests using activated filter media and granule activated carbon filtration. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 93, 253-258.
- Lau, W. J. (2014). Ultrafiltration as a pretreatment for seawater desalination: A review. *Membrane Water Treatment* 5, 15-29.
- Lenntech. (n.d.). *Demineralized process water* . Retrieved from <https://www.lenntech.com/applications/demimeralized-process-water.htm>
- Lenntech. (n.d.). *Reverse Osmosis Pretreatment*. Retrieved from <https://www.lenntech.com/ro/ro-pretreatment.htm#ixzz6d00AxiY>
- Martinez-Alvarez, V. e. (2016). Seawater desalination for crop irrigation — A review of current experiences and revealed key issues. *Desalination* 381, 58-70.
- Matten . (n.d.). *mattenplatn.com*. Retrieved from Investing in good RO: <http://www.mattenplant.com/reverse-osmosis-ro/ro-overview/process-designs/>
- Mazlan, N. M. (2016). Energy consumption for desalination — A comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes. *Desalination* 377, 138-151.
- Pan, S. e. (2020). Brackish water desalination using reverse osmosis and capacitive deionization at the water-energy nexus. *Water Research* 183, 116064.
- Peleka, F. (2008). Application of flotation as pretreatment process during desalination. *Desalination*, 1-8.
- Projectbureau Kaderrichtlijn Water Schelde. (2008). *Op weg naar verbetering - De Kaderrichtlijn Water in het Scheldestroomgebied*.
- RPSEA Project 07112-12. (2009). *Technical assessment of produced water treatment technologies*.

- Schurer, R. e. (2013). Three years operational experience with ultrafiltration as SWRO pre-treatment during algal bloom . *Desalination and water treatment* 51, 1034-1042.
- Skuse, C. e. (2020). Can emerging membrane-based desalination technologies replace reverse osmosis? *Desalination* , 114844.
- Su, X. e. (2017). Effect of feed water characteristics on nanofiltration separating performance for brackish water treatment in the Huanghuai region of China. *Water Process Engineering* 19, 147-155.
- Suwaileh, W. (2020). Membrane desalination and water re-use for agriculture: State of the art and future outlook. *Desalination* 491, 114559.
- Tabatabai, S. (2014). *Coagulation and Ultrafiltration in Seawater Reverse Osmosis Pretreatment*. Delft: UNESCO-IHE.
- Tal, A. (2018). Addressing Desalination's Carbon Footprint: The Israeli Experience. *Water* 10, 197.
- Tanji, K. &. (2002). *Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas*. Rome: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.
- TU Delft . (n.d.). *ocw.tudelft.nl*. Retrieved from Drinking Water Treatment - Micro- and Ultrafiltration: <https://ocw.tudelft.nl/courses/drinking-water-treatment-1/subjects/11-micro-ultrafiltration/>
- Vlaanderen - Department Landbouw en Visserij. (n.d.). *lv.vlaanderen.be*. Retrieved from Praktijkgids Water in de land- en tuinbouw: <https://lv.vlaanderen.be/nl/voorlichting-info/publicaties/praktijkgidsen/praktijkgids-water-de-land-en-tuinbouw>
- Vroom, J. G. (2012). *Eerstelijnsrapportage Westerschelde - Beschikbare data van 1996 t/m 2010* . Deltares.
- Waal, L. d. (2020). *Brackish groundwater as drinking water source*. Nieuwegein, The Netherlands : KWR.
- Wafi, M. K. (2019). Nanofiltration as a cost-saving desalination process. *SN Applied Sciences* 1, 751.
- Waterportaal. (n.d.). *Waterbronnen - Alternatieve waterbronnen per sector*. Retrieved from Waterportaal.be: <https://www.waterportaal.be/WATERBRONNEN.aspx>
- Wimalasiri, Y. A. (2019). Assessment of small scale desalination by capacitive. *Goyder Institute for Water Research Technical Report Series No. 01/18*.
- Zarzo, D. C. (2012). Spanish experience in desalination for agriculture. *Desalination and Water Treatment* 51, 1-14.
- Zhao, S. Z. (2012). Brackish water desalination by a hybrid forward osmosis–nanofiltration system using divalent draw solute. *Desalination* 284, 175-181.

BIJLAGE I

In bijgevoegd bestand worden de huidige ontziltngstechnologieën uitvoeriger omschreven.

