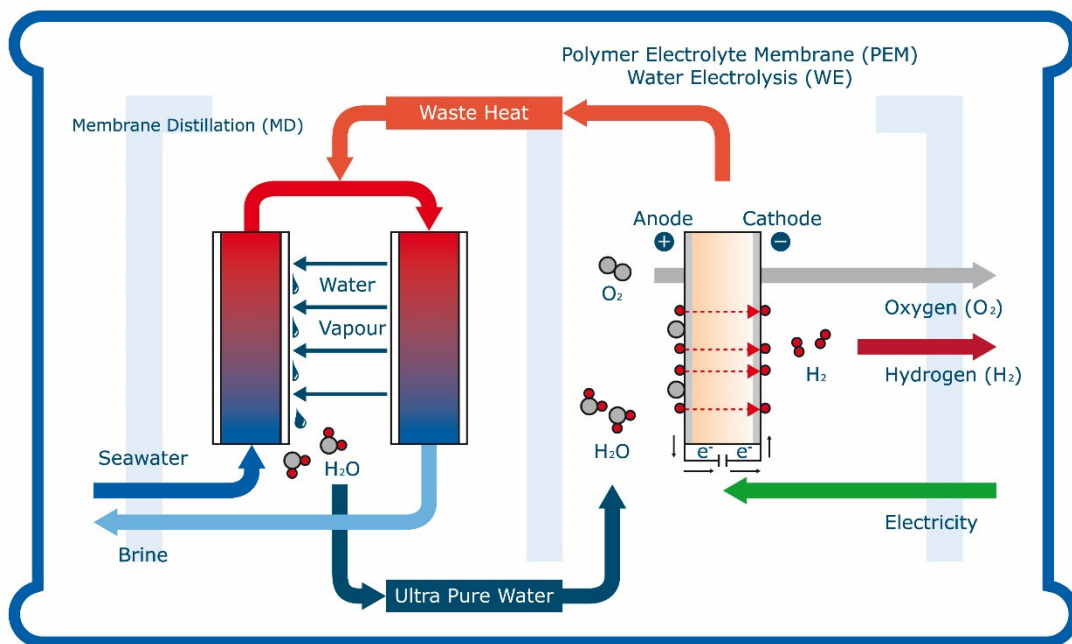


SEA2H2

Waterstof uit zeewater via MembraanDestillatie en Polymeer Elektrolyt Membraan Water Elektrolyse



Auteurs: Jolanda van Medevoort, Norbert Kuipers, Paul ten Hoopen
Programmalijn: Productie van Duurzame Waterstof

Samenvatting

Introductie

De productie van waterstof door elektrolyse en hernieuwbare energiebronnen biedt veel kansen voor het energiesysteem van de nabije toekomst. De "groene" waterstof kan worden gebruikt als brandstof voor de zware transportsector, chemische grondstof voor verschillende industriële processen en als energiedrager voor transport en opslag van hernieuwbare energie.

Polymeer Elektrolyt Membraan Water Elektrolyse (PEMWE) is een van de meest veelbelovende beschikbare technologieën die op grote schaal kunnen worden ingezet om groene waterstof te produceren. De kosten van waterstof geproduceerd door PEMWE zijn momenteel echter niet concurrerend met "grijze" waterstof geproduceerd uit fossiele brandstoffen. Lagere operationele kosten en in mindere mate lagere investeringskosten zijn nodig voor een positieve business case.

De laatste tijd is er veel belangstelling voor de offshore productie van groene waterstof doormiddel van elektriciteit opgewekt door grootschalige windparken. De voordelen van offshore waterstofproductie uit offshore windenergie zijn dat het geproduceerde waterstof de fluctuerende windenergie op grote schaal kan bufferen, en dankzij het hergebruik van reeds bestaande offshore olie- en gasinfrastructuur geen dure elektrische infrastructuur nodig heeft om de opgewekte wind energie naar de kust te transporteren. ..

Het elektrolyseproces vereist echter ook Ultra Puur Water (UPW) om goed te kunnen functioneren en een lange levensduur te garanderen. Het benodigde UPW zal ter plaatse uit zeewater geproduceerd moeten worden en zal kosten toevoegen aan de productie van waterstof. Membraandestillatie kan puur water uit zeewater produceren met behulp van rest warmte van de electrolyzer als drijvende kracht. De kosten van UPW zullen daarbij lager zijn dan bijvoorbeeld de toepassing van omgekeerde osmose die het algehele elektrisch rendement van het volledige waterstof systeem verlaagt omdat RO een elektrisch gedreven proces is.

Doelstellingen van het project

Het SEA2H2 project draagt bij aan de ontwikkeling en verlaging van de kosten van offshore groene waterstofproductie. Het belangrijkste doel is om een proof of concept te leveren voor een zeewater tot waterstof pre-pilot plant door membraandestillatie (MD) te integreren met polymeer elektrolyt membraan water elektrolyse. Het hybride pre-pilot MD-PEMWE-systeem heeft een nominaal stack vermogen van 50 kWe, wat overeenkomt met ongeveer 1 kg waterstof productie per uur. Waardevolle data wordt verkregen en geanalyseerd onder verschillende operationele omstandigheden zodat er meer inzicht wordt verkregen in de technische aspecten van het SEA2H2 concept.

De belangrijkste projectresultaten zijn:

- De ontwikkeling van een MD en een PEMWE demo installatie (subsystemen)
- De realisatie van een thermisch- en water geïntegreerde PEMWE- en MD-systeem dat op de meeste locaties eenvoudig kan worden ingezet en bediend
- Een MD-PEMWE demonstratie met een looptijd van ongeveer 1000 uur op een relevante locatie waar zeewater beschikbaar is
- Een techno-economische evaluatie voor het MD-PEMWE geïntegreerde proces op een schaal van 1, 10 en 100 kg waterstofproductie per uur

Resultaten

De belangrijkste resultaten binnen het project zijn:

- Een op afstand bestuurbaar MD-subsysteem dat eenvoudig kan worden geïntegreerd met het PEMWE-subsysteem en ook in standalone modus kan werken op een thermisch vermogen van 3-18 kWth
- Een PEMWE op afstand bestuurbaar subsysteem met een stackvermogen van 12-50 kW_e dat eenvoudig kan worden geïntegreerd met het MD-subsysteem en ook in standalone modus kan werken
- Een geïntegreerd MD-PEMWE systeem dat op afstand kan worden bediend
- Een zeewater intake voorzien van multimedia filter om zeewater in het geïntegreerde MD-PEMWE-systeem te pompen voor verdere verwerking
- ~1000 uur MD-PEMWE geïntegreerde demonstratie op het kade van Seaport Texel
- Een techno-economische analyse van het MD-PEMWE concept op productie schaal van 1, 10 en 100 kg waterstof per uur.

Conclusies en aanbevelingen

Er is een geïntegreerd MD-PEMWE systeem ontwikkeld en gerealiseerd voor het proof of concept van "Seawater to Hydrogen" (Sea2H₂) en deze is door middel van thermische synergie met succes gedemonstreerd.

Bij een nominaal stackvermogen van 50 kW produceerde het geïntegreerde systeem ongeveer 1 kg waterstof per uur, terwijl het bijna drie keer zoveel UPW produceerde dan vereist voor het PEMWE-systeem. Het systeem is "in het veld" getest op een locatie met de volledige blootstelling aan een ruw zeeklimaat gedurende een periode van ongeveer 1000 uur in de maanden oktober en november van 2021.

Uit de techno-economische analyse is gebleken dat grootschaligheid essentieel is voor een positieve business case. Verder spelen de kosten van elektriciteit, de prijs van waterstof en in mindere mate de kosten en prijs van water een doorslaggevende rol in de totale business case. Een verbeterde Return on Investment (ROI) kan worden gecreëerd als het overtollige water dat met het MD proces kan worden geproduceerd uit de restwarmte van de PEMWE verkocht kan worden.

Voor toekomstige ontwikkeling wordt aanbevolen dat het concept op grotere schaal wordt gedemonstreerd, op een offshore locatie met de PEMWE-MD-subsysteem volledig geïntegreerd in een enkele container om thermische verliezen te verminderen. Verder wordt aanbevolen om te beginnen met de selectie van een geschikte testlocatie en relevante certificerings- en veiligheidsmaatregelen vóór de start van het daadwerkelijke systeemontwerp.

INHOUD

Inhoud	4
1. Project details.....	5
2. achtergrond en doelstelling van het project.....	6
achtergrond.....	6
Project doelstellingen.....	6
3. Projectresultaten.....	8
WP1 analyse	8
Processtroomschema en functionele beschrijving	8
WP 2 Ontwikkeling van pre-pilot installatie.....	9
WP3 Testen en karakteriseren.....	12
WP4 Techno-economische beoordeling	15
WP5 Beheer en coördinatie	18
4. Conclusies, aanbevelingen en knelpunten.....	19
Conclusies.....	19
Aanbevelingen.....	19
knelpunten gedurende het project	19
5. Implementatie.....	21
Vervolgprojecten.....	21
Bijdrage aan de doelstelling van de regeling.....	21
Disseminatie	22

1. PROJECT DETAILS

Projectnummer	TWAS119017
Titel van het project	Waterstof uit zeewater via membraandestillatie en polymeer elektrolyt membraan water elektrolyse (SEA2H2)
Projectleider	Hydron Energie B.V.
Projectpartners	Wageningen Universiteit & Research (WUR) Hydron Energie B.V.
Duur van het project	1 oktober 2019 – 1 mei 2022
Publicatiedatum	15-05-2022
Vertrouwelijkheid	Openbaar

Dit project wordt gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, Nationale Regelgeving EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Contactgegevens

WUR

Jolanda van Medevoort

jolanda.vanmedevoort@wur.nl

Hydron Energy

Sander ten Hoopen

sander.tenhoopen@hydron-energy.com

2. ACHTERGROND EN DOELSTELLING VAN HET PROJECT

ACHTERGROND

Waterstofproductie door **Polymeer Elektrolyt Membraan Water Elektrolyse (PEMWE)** technologie biedt veelbelovende marktkansen. Het is de bedoeling dat via elektrolyse geproduceerde waterstof (m.a.w. groene waterstof) op grote schaal zal worden ingezet in de transport-, industriële- en energieopslagsector ([IRENA 2018](#)).

De voortdurende snelle uitbreiding van de offshore windenergiecapaciteit in het Noordzeegebied in combinatie met de beoogde ontmanteling van afgedankte olie- en gasplatforms, biedt kansen voor offshore waterstofproductie door middel van water elektrolyse installaties. **Grootschalige waterstofproductie op offshore locaties** aangedreven door hernieuwbare elektriciteit uit offshore wind/zonneparken kan profiteren van bestaande gasinfrastructuur om transportkosten te verlagen en grote investeringen met betrekking tot het elektriciteitsnet te voorkomen, omdat het transport van gassen aanzienlijk goedkoper is dan het transport van elektriciteit ([TNO 2016](#)).

Hoewel veelbelovend, brengt offshore waterstofproductie door middel van water elektrolyse technische- en economische uitdagingen met zich mee. Allereerst wordt de technologie momenteel als te duur ervaren voor kostenconcurrerende waterstofproductie ([ECN 2017](#)). Ten tweede vereist het elektrolyseproces **Ultra puur Water (UPW)** als grondstof. Conventionele offshore ontziltingsprocessen zoals omgekeerde osmose voegen kosten toe aan de waterstof productie technologie, wat een negatieve impact heeft op de genivelleerde kosten van waterstof (LCoH₂). Door toepassing van **membraandestillatie** op de vrijkomende warmte uit de electrolyzer kunnen kosten gereduceerd worden.

PROJECT DOELSTELLINGEN

Het kerndoel van het zeewater-tot-waterstof project (SEA2H2) is het verlagen van de kostprijs van H₂ door een significante reductie van de investerings- en operationele kosten van het geïntegreerde offshore H₂-uit-zeewater productieproces.

Om de levensduur en bedrijfszekerheid te garanderen voor PEM electrolyzers is UPW vereist. Ontzilting van zeewater op locatie op basis van membraandestillatie (MD) biedt veel meerwaarde t.o.v. het huidige standaardproces (zuiverder productwater, minder elektriciteits- en chemicaliënverbruik). Daarnaast maakt MD efficiënt gebruik van de restwarmte van het PEMWE proces. Tegelijkertijd wordt bespaard op de koelkosten van de electrolyzer. Hiermee wordt de efficiëntie en effectiviteit van het totale H₂-productieproces verhoogd en dus de productiekosten verlaagd.

Middels de ontwikkeling en beproeving van een volledig geïntegreerde pre-pilot installatie, waarin membraandestillatie voor de productie van UPW uit zeewater en PEM elektrolyse effectief worden gekoppeld, zal een Proof of Concept geleverd worden. Het SEA2H2 demonstratie project legt tevens een techno-economische fundament voor grootschalige offshore H₂ productie.

Een overzicht van de werkpakketten is weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Overzicht van werkpakketten in Sea2H2-project

WP	Korte beschrijving	Deelnemers (Lead)	Resultaten
1	Analyse (IO)	<u>WUR</u> , Hydron	Programma van criteria voor geïntegreerde proefinstallatie, functionele eisen MD- en PEM-subsystemen, massa- en energiebalansen
2	Ontwikkeling van een pre-pilot installatie (IO)	<u>Hydron</u> , WUR	Realisatie van een geïntegreerde pre-pilot H ₂ -productie-installatie bestaande uit PEM-elektrolyser- en MD-systeem
3	Testen en karakteriseren (IO)	<u>Hydron</u> , WUR	Proof of concept, testrapporten
4	Techno-economische beoordeling (IO)	<u>Hydron</u> , <u>WUR</u>	Kostenmodellen voor electrolyzer apparatuur en MD-installatie, rapport over techno-economische kenmerken van technologie
5	Projectmanagement en verspreiding	<u>Hydron</u> , <u>WUR</u>	Tijdige oplevering van projectresultaten, identificatie van risico's en risicobeheersing, beheer van projectafwijkingen met consortium, verspreiding, rapportage

3. PROJECTRESULTATEN

WP1 ANALYSE

Doel: In werkpakket 1 ontwikkelen de consortiumpartners een programma van criteria voor een pre-pilot installatie bestaande uit een installatie membraandestillatie proces, inclusief zeewater voorbehandeling , product water polishing en een PEMWE proces.

Resultaten: De volgende deliverables zijn gedefinieerd voor werkpakket 1:

- Processtroomschema en functionele beschrijving
- Massa- en energiebalansen
- Programma van functionele eisen en wensen

Resultaatbeschrijving:

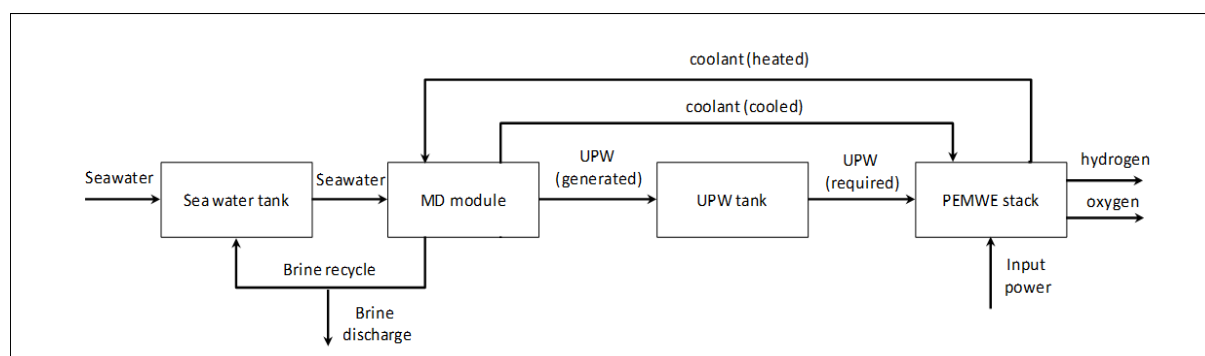
PROCESSTROOMSCHEMA EN FUNCTIONELE BESCHRIJVING

Het PEMWE systeem bepaalt de hoeveelheid UPW die door het MD-systeem moet worden gegenereerd uit restwarmte en zeewater. Het ontzilte water wordt gezuiverd tot graad 1 UPW en in het PEMWE-systeem gevoerd. Het PEMWE-systeem gebruikt elektrische stroom om de UPW elektrochemisch te splitsen in waterstof en zuurstof. De warmte die door het PEMWE-systeem wordt gegenereerd, als gevolg van ohmse verliezen in de stack, wordt door het MD-systeem gebruikt om het ontziltingsproces aan te sturen.

Er bestaan twee interacties tussen PEMWE en MD, namelijk:

- Een waterinterface waarbij het PEMWE-subsysteem gebruik maakt van UPW gemaakt door het MD-subsysteem uit zeewater
- Een thermische-energie-interface waarbij het MD-subsysteem gebruik maakt van de restwarmte die wordt gegenereerd door het PEMWE-subsysteem

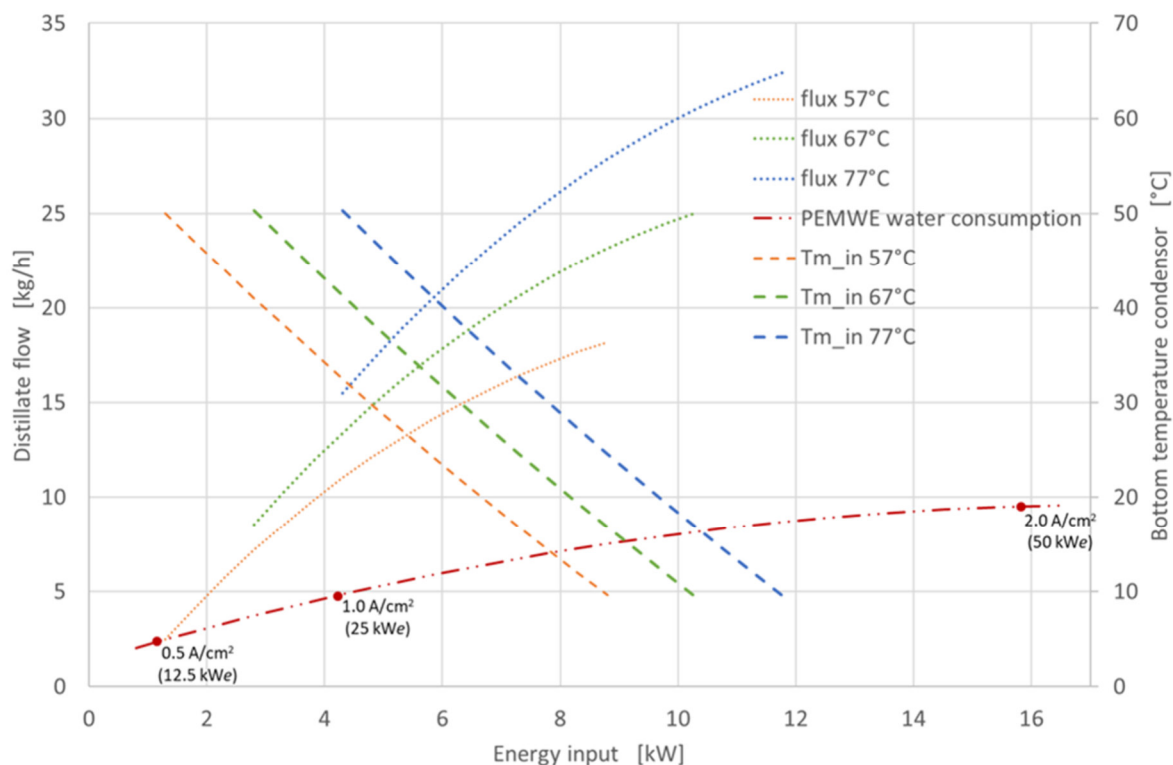
Figuur 1 toont in hoofdlijnen het proces schema van het SEA2H2 geïntegreerde systeem. Het systeem bestaat uit een MD- en PEMWE subsysteem met daartussenin een buffer voor het geproduceerde ultra puur water.



Figuur 1: Proces schema van het geïntegreerde SEA2H2 systeem. De in het koelmiddel van de PEMWE-stack opgenomen warmte wordt over het MD systeem gecirculeerd die deze warmte gebruikt om ultra puur water (UPW) te produceren. Het UPW wordt naar de PEMWE-stack gevoerd om te worden gebruikt voor de productie van waterstof en zuurstof.

Nadat het proces en de koppeling tussen het MD en PEMWE proces is vastgesteld zijn er massa- en energie balansen opgesteld. Het PEMWE systeem heeft een nominaal stackvermogen van 50 kW waarmee grofweg 1 kg waterstof kan worden geproduceerd per uur. De benodigde ultra puur water productie is hiervoor berekend op minimaal 0,16 L/min.

Een voorspelling is gedaan van de hoeveelheid water die kan worden geproduceerd met MD onder verschillende omstandigheden. Dit is uitgewerkt met een mathematisch MD model van WUR en weergegeven in Figuur 2. In deze grafiek is ook de door de electrolyzer benodigde hoeveelheid water weergegeven afhankelijk van het stackvermogen. Dit WUR model is gebruikt om in de aanloop naar het ontwerp van de pilots een goed werkgebied te selecteren.



Figuur 2: voorspelde MD destillaat flow (gestippelde lijnen) en invoer (bottom) temperatuur (gestreepte lijnen) voor een commercieel verkrijgbare MD module met een constante circulatie flow van 600 l/h bij 3 restwarmte temperaturen (60, 70 and 80 °C). Gecreëerd met WUR's membraan destillatie (Mathematisch) Model versie 3.13. De PEMWE water consumptie is ook getoond bij verschillende stack vermogens en de daarbij vrijgekomen hoeveelheid restwarmte (theoretisch).

Tot slot is er binnen dit werkpakket een programma van eisen voor de installatie opgesteld waaraan het totale systeem en de subsystemen aan dienen te voldoen. Hierbij zijn de systeem eisen opgesteld op het gebied van onder andere veiligheid, constructie, onderhoud, operatie en onderhoud.

WP 2 ONTWIKKELING VAN PRE-PILOT INSTALLATIE

Doel: Op basis van de deliverables van WP1 zal een ontwerp worden gemaakt voor de pre-pilot installatie die voorziene processen omvat (voorbehandeling zeewater, membraandestillatie, polishing en elektrolyse). Een MD- en PEMWE demo installatie wordt zo ontworpen, gebouwd en geïntegreerd dat maximale synergie wordt bereikt op zowel warmte- als wateroverdracht.

De nominale waterstofproductiecapaciteit van de pre-pilot installatie zal 1 kg/uur bedragen (Hydron's 50 kW PEMWE stack platform zal worden gebruikt). Daarnaast zal de UPW-productiecapaciteit ~ 10 kg per uur bedragen.

Resultaten: De volgende deliverables zijn gedefinieerd voor werkpakket 2:

- Realisatie van de membraandestillatie demo installatie
- Realisatie van de electrolyzer demo installatie
- Realisatie van het geïntegreerde MD-PEMWE systeem

Resultaatbeschrijving:

Een MD en PEMWE demo installaties zijn ontwikkeld, gebouwd, getest en in bedrijf gesteld. Beide installaties kunnen onafhankelijk van elkaar werken, maar ook in een geïntegreerde systeemconfiguratie.

Door budgetbeperkingen en onderschatte systeemkosten werd al snel duidelijk dat het bouwen van een geheel nieuwe MD-installatie niet haalbaar was. Daarnaast was het de wens om te werken met full scale commerciële modules in plaats van kleinschalige, zelfbouw modules. Daarom werd besloten om een bestaande MD demo installatie te updaten en aan te passen voor gebruik i.c.m. de electrolyzer en voor toepassing met commercieel verkrijgbare modules.

Het systeem is bij Wageningen Research zorgvuldig getest met leidingwater en synthetisch zeewater verkregen door zouten toe te voegen aan leidingwater. Figuur 3 toont zowel de binnen- als buitenkant van het transporteerbare lab (zeecontainer) waarin de MD Demo installatie is geïnstalleerd. Op de linker foto aan de voorzijde is de MD-installatie zichtbaar met de hoofdschakelkast met touchscreen om de installatie te bedienen. 3 modules (blauw) bevinden zich bovenop de installatie. Achter op de linker foto is de circulatiepomp (zwart) voor de warmte-integratie lus weergegeven (inclusief de expansievaten (rood) onder de pomp). Op de rechter foto is de buitenkant van de container weergegeven met een Visual over de volledige breedte van de container die speciaal voor dit project is ontworpen en op de container aangebracht.



Figuur 3: Membraandestillatiesysteem (links) in transporteerbaar lab met Visual van het project op de buitenwand (rechts).

Omdat op de demo locatie geen zeewater intake aanwezig was, was het ook noodzakelijk deze te ontwerpen en zelf aan te schaffen. Figuur 4 toont een foto van deze zeewaterintake (op de demo locatie) met het zandfilter (blauw), 3000 liter buffervat (zwart) en automatische kleppen (oranje). Dit zandfilter werkt volledig automatisch, maar kan ook handmatig bediend worden via het touch screen op de regelkast.



Figuur 4: Seawater intake zoals geïnstalleerd op kade van Seaport Texel, met het zandfilter (blauw), 3000 liter buffervat (zwart) en automatische kleppen (oranje). Voorzien van touch screen voor de bediening

Het systeem voor het bedienen van de PEMWE electrolyzer is ontworpen, gebouwd en getest bij Hydron Energy. Het systeem, PEMWE stack, voeding en bewakingsapparatuur zijn geïnstalleerd in een op maat gemaakte 15ft. high cube container. De container is door een gasdichte wand gesegmenteerd in een procescompartiment en een elektrisch compartiment. Op beide compartimenten zijn diverse ontluichtingspanelen aangebracht, zodat zich in de container geen explosieve gasconcentraties kunnen vormen. Het geproduceerde zuurstof- en waterstofgas wordt gekoeld tot een dauwpunt in het bereik van 10 tot 30 °C voordat het wordt verdund met lucht en afgevoerd naar de atmosfeer.

Na een vertraagde levering van de container is het electrolyzer stack en de elektrische subsystemen gebouwd en geïnstalleerd in overeenstemming met de technische documenten. Om de integriteit van het systeem te controleren, zijn er verschillende lektesten uitgevoerd met stikstof en water. Ook is er een speciale besturingsstrategie ontwikkeld en intern gecodeerd om het PEMWE-subsysteem te bewaken en te besturen. Het subsysteem is getest op maximaal 31 kW op het terrein van Hydron Energy.

Figuur 5 toont het PEMWE-systeem en de stack zoals gebouwd en uiteindelijk getransporteerd naar de uiteindelijke testlocatie.



Figuur 5: PEMWE-subsysteem met stack op de voorgrond.

WP3 TESTEN EN KARAKTERISEREN

Doel: Kpi's bepalen op het gebied van procesprestaties en efficiëntie voor het pre-pilot PEMWE en MD geïntegreerde systeem. Meer specifiek zal voor het MD-systeem het zeewater en het destillaat worden gemonitord, evenals de temperaturen en productflux. Temperatuur, druk, productgasstromen en waterweerstand worden nauwlettend gevolgd en geregistreerd door het PEMWE-systeem.

Resultaten:

- I. Karakterisering van de zeewater intake, brine en destillaat
- II. Testen van geïntegreerde pre-pilot installatie
- III. Rapport over installatieprestaties
- IV. Verslag over het subsysteem "Waterzuivering"
- V. Verslag over het subsysteem "Electrolyzer"
- VI. Verslag over geïntegreerde pre-pilot installatie

Beschrijving van het resultaat:

Het vinden van een geschikte locatie voor de MD-PEMWE pilot was een tijdrovend proces. De eisen voor een geschikte testlocatie waren tweeledig:

- Een elektriciteitsnetaansluiting van ten minste 400 V/250 A was vereist om de PEMWE- en MD-subsysteem van stroom te voorzien. Het grootste deel van dit vermogen was nodig voor de PEMWE-stack
- Voor de MD-installatie was een zeewater intake met multimedia filter (zandfilter) nodig

Uiteindelijk is er na lang zoeken via de contacten van WUR een locatie gevonden die zeer bereid was deze beschikbaar te stellen voor de demonstratie. In Figuur 6 is de demolocatie getoond aan de hand van luchtfoto's (google maps), een foto van de website van [Seaport Texel](#) en een foto gemaakt met behulp van een drone.



Figuur 6: Demo locatie, onderzoekshaven Seaport Texel

Op 4 oktober 2021 zijn beide subsystemen, de stroom verdeelkast en de zeewater intake vervoerd naar de geselecteerde demo locatie op de kade van Seaport Texel.

De systemen zijn vervolgens geïnstalleerd en ter plaatse geïntegreerd om tot de beoogde “zeewater naar waterstof” pre-pilot installatie te komen. Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 9 tonen de Sea2H2 installatie op de kade van Seaport Texel gezien vanaf de kade en vanuit de lucht (drone).



Figuur 7: Visual op de MD-container, de stroom verdeelkast (grijze RECO-container) en op de achtergrond de blauwe container met de PEMWE installatie



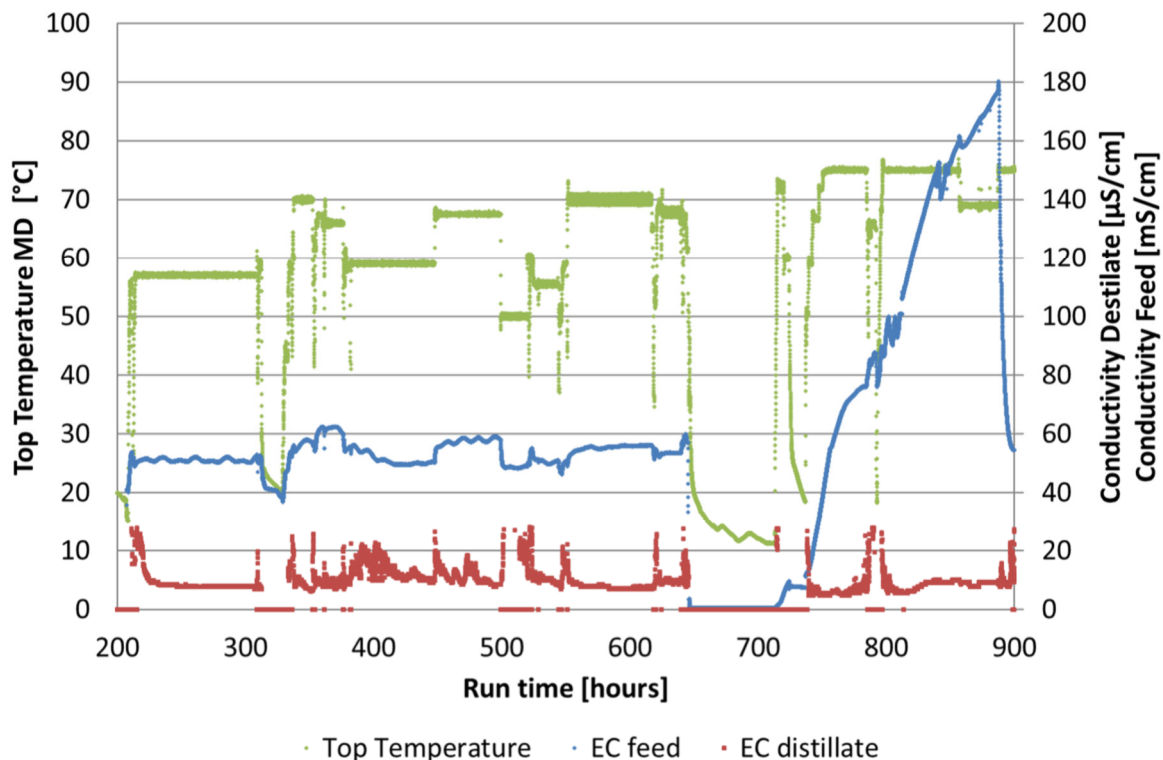
Figuur 8: PEMWE (blauwe container) en MD (grijze container) installatie met rechts op de kop van de kade de geïnstalleerde zeewater intake.



Figuur 9: Sea2H2 installatie en de Seaport Texel gezien vanuit de lucht (Dronebeelden) met uitzicht op de Waddenzee ten zuidoosten van de haven

De installatie en integratie verliep voorspoedig en het geïntegreerde systeem is over een periode van bijna 7 weken uitvoerig getest. Het te veel geproduceerde hoeveelheid water is weer teruggevoerd naar zee. Het PEMWE systeem is getest opeen stackvermogen tot 60 kW en temperaturen tot 80 °C. De geproduceerde gassen zijn eerst gekoeld, en vervolgens is het debiet nauwkeurig gemeten alvorens het geproduceerde waterstof en zuurstof gas via 2 schoorstenen is afgeblazen naar de atmosfeer. Verschillende temperaturen als ook zeewater toevoer volumes en kwaliteiten zijn beproefd waarbij in alle situaties het MD systeem het PEMWE systeem voldoende kon blijven koelen en water kon produceren dat geschikt is voor het PEMWE proces

Figuur 10 geeft een overzicht van de top temperatuur van de MD module en de geleidbaarheid van zowel de voeding van de MD module als het destillaat van het MD systeem over de gehele looptijd.



Figuur 10: Top temperatuur en geleidbaarheid van voeding en destillaat van het MD systeem over de gehele looptijd (na de eerste week installatie en inregelen). Vanaf 200 uur na start tot 650 uur is het MD systeem op zeewater gedraaid. Van 650-700 uur is het systeem met kraanwater gespoeld. Vanaf 700 uur tot 900 uur is het afgevoerde destillaat volume aangevuld met zeewater, maar is geen concentraat meer afgevoerd. Hierdoor is de geleidbaarheid continu toegenomen tot 180 mS/cm, wat ongeveer overeenkomt met een concentratiefactor van 7 t.o.v. gemiddeld zeewater. De geleidbaarheid van het destillaat blijft onder deze omstandigheden ook rond de 7 µS/cm.

Over de gehele looptijd lag de waterproductie uit het MD systeem tussen de 13 en 27 l/h afhankelijk van de bodem- en top temperatuur, circulatiewaam en concentratie. In alle gevallen (zelfs bij lage top temperatuur) was dit ruim voldoende om de electrolyzer van de benodigde hoeveelheid water te voorzien van 2.4 - 9.5 l/h bij een stack vermogen van resp. 12.5 – 50 kWe.

Over de gehele looptijd en ook onder de diverse weersomstandigheden zoals windrichting en windkracht (storm en onweer) heeft de zeewater intake zeer stabiel gedraaid en is er geen vervuiling in het MD systeem opgetreden.

WP4 TECHNO-ECONOMISCHE BEOORDELING

Doel: Een techno-economisch model ontwikkelen om inzicht te krijgen in de economische aspecten van offshore waterstofproductie door waterelectrolyse met zeewater als grondstof.

Resultaten:

- I. Analyse state-of-the-art KPI's voor electrolyzers
- II. Engineering kostenmodel voor offshore waterzuivering
- III. Engineering kostenmodel voor LCoH₂, TCO en ROI voor offshore waterstofproductie
- IV. Kostenprognose offshore waterstofproductie

Beschrijving van het resultaten:

De belangrijkste conclusies van de techno-economische beoordeling zijn:

- Het MD-PEMWE-systeem heeft een grote schaal nodig om kosteneffectief te zijn
- De kosten van elektriciteit zijn de meest dominante factor voor de LCoH₂
- Het gebruik van alle gegenereerde warmte van de PEMWE voor het MD-proces is gunstiger dan gedeeltelijk warmtegebruik wanneer geproduceerd water kan worden verwaard.
- Door het overtollig geproduceerde water van het MD-systeem te verwaarden, is een positieve ROI mogelijk waar dit zonder water niet mogelijk is.

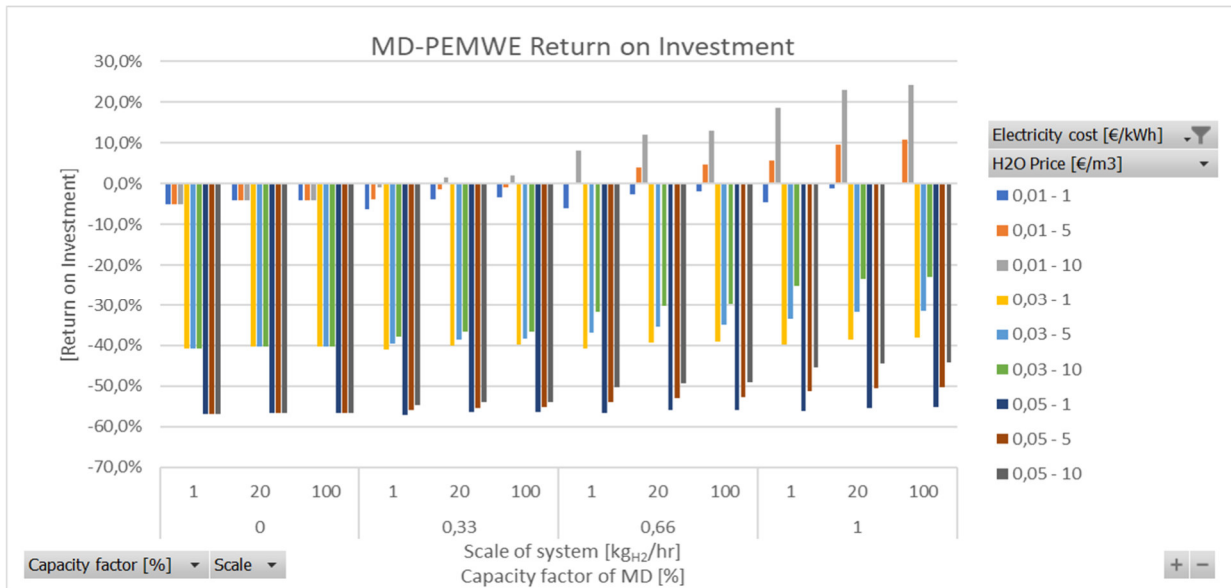
Voor het kostenmodel is uitgegaan van input gegevens van Hydron Energy voor de systemen die betrekking hebben op de PEMWE. Voor de systemen die betrekking hebben op de MD is uitgegaan van een publicatie¹ van de producent van de MD modules. .

Figuur 11 toont de invloed op de ROI van een geïntegreerd MD-PEMWE systeem voor verschillende productiecapaciteiten. Hierbij is een vergelijking gemaakt tussen de situatie waarbij de door de PEMWE benodigde hoeveelheid water wordt geproduceerd met RO en/of MD. De “capacity factor of MD” is de ratio van het thermisch koel vermogen van de MD installatie over het total benodigde koelvermogen. Bij een factor van 1 koelt de MD installatie de PEMWE installatie volledig. In deze situatie zal er een overschot aan UPW productie zijn welke tegen marktwaarde wordt afgezet. In dit kostenmodel is daarbij uitgegaan van een marktwaarde van 1, 5 en 10 €/m³. Opgemerkt moet worden dat de verkoopprijs van water sterk afhankelijk is van de locatie waar het MD-PEMWE-systeem is geïnstalleerd. Wanneer het overtollige water zich op een offshore platform bevindt, kan het ter plaatse worden gebruikt voor persoonlijk gebruik of gebruik in andere processen op het offshore platform. Alternatieven zoals waterproductie op of transport naar het platform kunnen tot 42 €/m³ water kosten². Wanneer dit kan worden weggelaten door gebruik te maken van het overtollige water uit de MD, neemt de ROI verder aanzienlijk toe. Bij een “capacity factor” van 0 wordt het PEMWE system volledig gekoeld door een dry-cooler en zal het UPW worden verkregen uit een lokale offshore RO installatie tegen een prijs aanname van 5 €/m³.

Het effect van een vergroot MD-systeem is duidelijk; een hogere capaciteitsfactor en systeemschaal in combinatie met een hoge verkoopprijs van het extra geproduceerde water heeft een positief effect op het rendement van de investering zoals kan worden afgeleid uit Figuur 11.

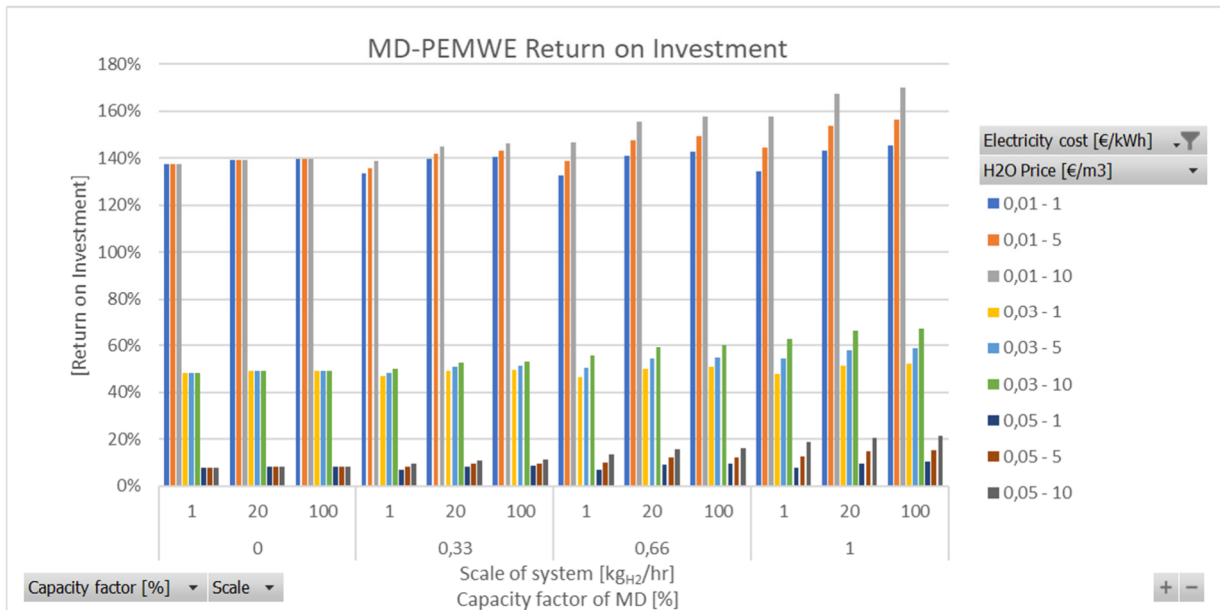
¹ *Techno-economic assesment of seawater reverse osmosis (SWRO) brine treatment with air gap membrane distillation (AGMD)*. M. Bindels, J. Carvalho, C. Bayona Gonzalez, N. Brand, B. Nelemans. s.l.: Elsevier, *Desalination*, 2020, *Desalination* 489 (2020) 114532

² *Modeling of water supply cost for offshore platforms*, N. Ismail, M.Z. Ahmad, M.N. Hussoin, A.N. Ariffin, Zainol I., *International journal of schientific & technoloy research* volume 8, issue 12, December 2019, ISSN 2277-8616



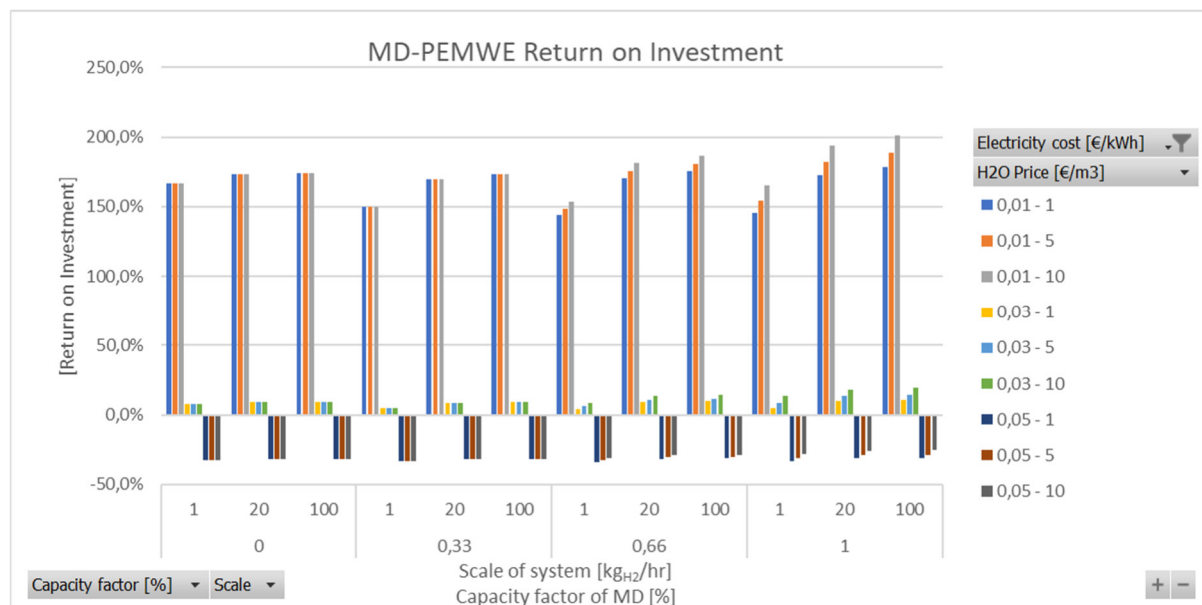
Figuur 11: Return on Investment voor waterstofproductie (PEMWE) tegen een prijs van 2 €/kg H₂ voor geïntegreerd systeem met MD. Met een variabele capaciteitsfactor tussen 0 (100% RO + dry cooler) en 1 (100% MD) en een systeemsgaal tussen 1 kg_{H₂}/uur (~50 kW) en 100 kg_{H₂}/uur (~5 MW).

De impact voor opbrengst (prijs) van waterstof heeft een aanzienlijke impact op de ROI. Als de prijs wordt verhoogd van 2 €/kg naar 5 €/kg, dan wordt er een aanzienlijk positievere business case gevonden, zie hiervoor Figuur 12.



Figuur 12: Return on Investment voor waterstofproductie (PEMWE) tegen een prijs van 5 €/kg H₂ voor geïntegreerd systeem met MD. Met een variabele capaciteitsfactor tussen 0 (RO) en 0,33 -1 (MD) en een systeemsgaal tussen 1 kg_{H₂}/uur (~50 kW) en 100 kg_{H₂}/uur (~5 MW).

In Figuur 13 is te zien dat de elektriciteitskosten een zeer dominante rol spelen in de ROI-investering van het systeem. Bovendien profiteren grootschaligere systemen (> 5 MW) van een synergie met MD-technologie, hoewel dit voordeel sterk afhankelijk is van de marktprijs voor het geproduceerde water³.



Figuur 13: Toekomstprognose (2050) voor het rendement op investeringen in waterstofproductie (PEMWE) tegen een prijs van 2 €/kg H₂ voor geïntegreerd systeem met MD. Met een variabele capaciteitsfactor tussen 0 (RO) en 0,33 - 1 (MD) en een systeemchaal tussen 1 kg_{H2}/uur (~50 kW) en 100 kg_{H2}/uur (~5 MW)

WP5 BEHEER EN COÖRDINATIE

Doel:

- I. Dagelijks projectvoortgangsmanagement, de rapportage en controle van de projectfinanciën
- II. Verspreiding van de projectresultaten

Resultaten:

- I. Twee tussentijdse verslagen
- II. Eindrapport
- III. Een geschikte testlocatie voor het geïntegreerde systeem
- IV. Locatiebezoek door RVO

Beschrijving van het resultaat:

Het SEA2H2-project werd gecoördineerd door Hydron Energy in nauwe samenwerking met WUR. Er werden verschillende projectvergaderingen en teleconferenties georganiseerd om de voortgang te volgen en systeeminterfaces te bespreken. Met 3^e partijen zijn diverse bijeenkomsten gehouden om een geschikte testlocatie voor het geïntegreerde systeem te vinden en te bespreken. Daarnaast is RVO uitgenodigd tijdens het testen aan de kade van Seaport Texel.

3 Modelling of water supply cost for offshore platforms, N. Ismail, M.Z. Ahmad, M.N. Hussoin, A.N. Ariffin, Zainol I., International journal of scientific & technology research volume 8, issue 12, December 2019, ISSN 2277-8616

4. CONCLUSIES, AANBEVELINGEN EN KNELPUNTEN

CONCLUSIES

Een geïntegreerd Membrane Distillation – Polymeer electrolyt Membrane Water Electrolyse systeem is ontwikkeld en het bewijs van het zeewater naar waterstof concept door middel van thermische synergie is met succes gedemonstreerd. Bij een nominaal vermogen van 50 kW produceerde het geïntegreerde systeem ongeveer 1 kg/h waterstof en produceerde het bijna drie keer zoveel ultrapuur water dan het PEMWE-systeem nodig had.

Het systeem is "in het veld" getest op een locatie met de volledige blootstelling van een zeeklimaat in oktober/november 2021. De veldtesten die binnen het SEA2H2-project zijn uitgevoerd, zijn een ware opstap geweest om het concept op open zee te testen.

Uit de techno-economische analyse is gebleken dat een grootschalige bedrijfsvoering essentieel is voor een positief rendement op de investering. Verder spelen de kosten van elektriciteit, de prijs van waterstof en in mindere mate de kosten en prijs van water een doorslaggevende rol in de totale business case. Een interessante toegevoegde waarde is dat de beschikbare restwarmte uit de PEMWE een overschot aan water kan opleveren, die verwaard kan worden door toepassing offshore.

AANBEVELINGEN

De belangrijkste aanbeveling specifiek voor deze demo betreft parasitaire verliezen in leidingen tussen het MD-PEMWE-systeem en de afstemming van de afmetingen van de systemen. Daarnaast was het MD systeem in verhouding tot het gehele systeem over gedimensioneerd. Om de warmte optimaal te benutten, moeten in een vervolg de systemen bij voorkeur in één container worden verpakt om de warmteoverdracht te kunnen optimaliseren en verliezen te verminderen.

Voor een demonstratie van het gecombineerde systeem was het gekozen stack vermogen van 50 kW ideaal en goed haalbaar, waardoor dit demo project succesvol is afgerond. Echter om van belang te zijn voor de offshore windenergie-industrie moet het nominale PEMWE-vermogen aanzienlijk worden verhoogd in een vervolgproject.

In deze rapportage is ingegaan op de verwaarding van overtollig geproduceerd water. Op afgelegen locaties met waterschaarste is het echter ook zeer gunstig om overtollig water te produceren. In deze situaties is het zeer nuttig om alle door PEMWE gegenereerde warmte in te zetten voor het MD-proces. Vanuit sociaal en milieuoogpunt kan het ook bijdragen aan de ontwikkeling van gebieden die water nodig hebben, zoals het kustgebied van de West-Afrikaanse landen. Een aanvullend onderzoek naar de maatschappelijke impact van meer drinkwaterbeschikbaarheid in combinatie met overvloedige zon voor waterstofproductie zou een interessant onderzoeksonderwerp kunnen zijn.

KNELPUNTEN GEDURENDE HET PROJECT

Hieronder volgt een korte lijst met knelpunten, die zich hebben voorgedaan in het project. Het moet benadrukt worden dat ondanks deze knelpunten de belangrijkste doelstellingen in het project zijn behaald en de demonstratie succesvol is afgerond.

Knelpunt 1: Er waren grote vertragingen in de levering van componenten en daarmee de realisatie van het PEMWE-systeem als gevolg van de Covid-19-pandemie.

Oplossing: Een projectverlenging van 7 maanden werd aangevraagd en door RVO gehonoreerd.

Knelpunt 2: Hydron Energy onderschatte de werklast van het ontwerpen, bouwen en testen van een PEMWE-systeem in containers. Er werden meer uren besteed dan verwacht.

Oplossing: Hydron Energy heeft meer uren bijgedragen aan het project.

Knelpunt 3: Het budget voor het MD-systeem was onvoldoende om een speciale MD-installatie te bouwen.

Oplossing: Een bestaande MD pilot werd gereviseerd en aangepast en daarmee geschikt gemaakt voor het SEA2H2 project.

Knelpunt 4: De eerder beoogde pilot locatie (met bestaande zeewater intake) bleek niet beschikbaar. Het inkopen van zeewater en het transporteren naar de testlocatie is kostbaar, tijdrovend en zeer inefficiënt en daarmee geen alternatief.

Oplossing: Een alternatieve demo locatie direct aan zee is gevonden echter hiervoor was het wel noodzakelijk een zeewater intake aan te schaffen. WUR heeft een mobiele zeewater intake op maat laten maken en installeren op de kade van Seaport Texel.

5. IMPLEMENTATIE

VERVOLGPROJECTEN

De intentie is om op grotere schaal (ten minste 1 MW) een pilot op een representatieve locatie te realiseren. Het projectplan hiervoor is nog niet beschikbaar.

Momenteel wordt geïnventariseerd of en tot welke schaal technologisch kan worden opgeschaald en tot welke schaal MD-PEMWE kan worden toegepast op een offshore platform.

Belangrijke partners in een vervolgproject zijn uiteraard de leverancier van de electrolyzer en MD installaties en de beheerder/eigenaar van een offshore platform, maar ook belanghebbenden zoals de beheerder/eigenaar van het windmolenpark en de netwerk beheerders van de gas en Electra infra structuur.

Zoals in de aanbevelingen aangegeven is een afgelegen locatie met waterschaarste een alternatieve case die onderzocht kan worden.

Zowel WUR als Hydron Energy staan open voor het bespreken van een vervolgproject met geïnteresseerde mogelijke partners.

BIJDRAGE AAN DE DOELSTELLING VAN DE REGELING

Dit project is geregistreerd bij RVO met de volgende Projectinformatie:

Innovatiethema('s)	Waterstof
Subsidieregeling	TSE-19-15-01-Waterstof
Stroomschema-onderdelen	Waterstof productie.
Projectnummer	TWAS119017

Het doel van de Programmalijs Waterstof is het ondersteunen van onderzoeks- en ontwikkelingsprojecten die bijdragen aan het realiseren van kostenreductie voor de inzet van waterstof als energiedrager in verschillende toepassingen (industrie, mobiliteit, energiesector en gebouwde omgeving) in 2030 door het verlagen van de investeringskosten en operationele kosten van bestaande en nieuwe technologie en systemen voor productie, transport, opslag en toepassing. Projecten moeten een aanmerkelijke verbetering van kosten, efficiency en betrouwbaarheid mogelijk maken met een groot herhalings- en doorgroeipotentieel, zicht geven op robuuste business cases en expliciet rekening houden met maatschappelijke inbedding en acceptatie bij de belangrijkste stakeholders voor implementatie van de innovatie.

De programmalijs waarop dit project van toepassing is:

Productie van waterstof met behulp van duurzame elektriciteit, met name uit wind en zon.

Projecten richten zich op:

1. kostenverlaging van elektrolyse van orde grootte 1000-1200 €/kW nu naar orde grootte 300-400 €/kW in 2030, door voorbereiding en ontwikkeling van pilotinstallaties van slimme systeemconcepten (minimaliseren van Balance of Plant), en verbeterde membranen en materialen die productie bij verhoogde druk mogelijk maken voor systemen in de orde van enkele tientallen tot honderden MW, met aandacht voor mogelijkheden om de componenten goedkoop en op grote schaal te kunnen produceren. Ook innovaties ten behoeve van

- geautomatiseerde massaproductie van elektrolyzers (manufacturability) maken hiervan onderdeel uit;
2. het verbeteren van de levensduur en het vertragen van het degradatiegedrag van elektrolyzers, ook onder dynamische belastingen, en het testen van componenten van materiaalleveranciers;
 3. goedkopere en/of betere zuiveringstechnologie (zoals gasreiniging en –opwerking) om van low-grade waterstof high-grade waterstof te maken.

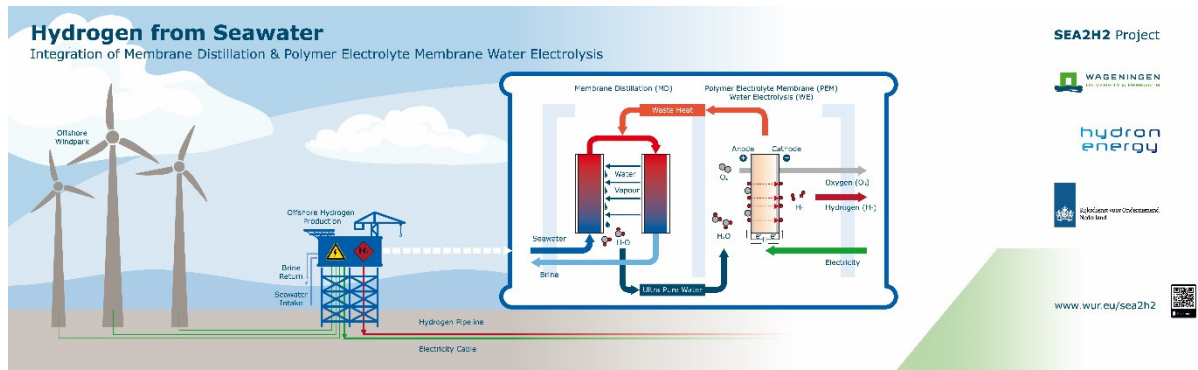
Hieraan is met dit project bijgedragen zowel op het gebied van punt 1 als 2:

1. Door de slimme integratie van membraandestillatie en elektrolyse wordt de restwarmte van de elektrolyse nuttig toegepast voor de productie van het benodigde ultra puur water. Waarbij tevens is gebleken dat de verwaarding van extra geproduceerd water (op overtollige restwarmte van de electrolyzer) de Return on Investment zeer positief beïnvloed en daarmee de overall kosten van de waterstof verlaagd.
2. De demo op locatie heeft laten zien dat onder zware omstandigheden zoals storm en onweer in een zeehaven, de systemen van zowel de PEMWE als de MD stabiele bedrijfsvoering laten zien wat een goede opstap is naar een grootschaliger systeem offshore

DISSEMINATIE

In de loop van het project zijn de volgende acties ondernomen met betrekking tot kennisverspreiding, public relations en publicaties:

- WUR en Hydron hebben op 6 april 2021 een presentatie gegeven over het project op de online kennissessie over waterstof georganiseerd door RVO; "kennissessies waterstof deel 1: water elektrolyse", met 185 deelnemers.
- WUR heeft op 28 oktober 2021 een presentatie gegeven over het Sea2H2 project tijdens de offshore energiebeurs en congres tour door Nederland voor een delegatie van executives en havenmeesters gehost door Pondera in Arnhem (NL).
- WUR ontwierp een Visual die als folie op de container met de MD-installatie werd aangebracht. Deze Visual en het projectplan werd ook gedeeld op de website van WUR (www.wur.eu/sea2h2) en de link naar de website werd gedeeld op LinkedIn. Een QR-code met een link naar deze site bevindt zich in de rechter benedenhoek van de Visual. Figuur 14 toont de volledige Visual en de voorpagina van dit rapport toont een uitsnede van de Visual met de schematische tekening van het werkingsprincipe van beide processen met geïntegreerde warmte en water. Figuur 3, Figuur 7 en Figuur 8 tonen de Visual op de container (resp. in Wageningen en op de demo locatie).
- Op 20 december 2021 verscheen een persbericht van Hydron Energy en deelde een mediabericht op LinkedIn met betrekking tot het PEMWE deel van het Sea2H2-project. Er zijn diverse internationale artikelen en blogs verschenen die verwijzen naar het persbericht.
- Op de AquaNL beurs in Gorinchem (NL) van 15-17 maart 2022 presenteerde WUR het Sea2H2 project op hun stand.
- Zodra het publieke rapport is afgerond, heeft WUR het voornemen een persbericht te delen over de resultaten van het project en om hun Sea2H2-webpagina te updaten.



Figuur 14: Visual op MD-container with logo's of partners