

Milieu-impactstudie HyDeer

groene waterstof in Lelystad

PUBLIEKE EINDRAPPORTAGE



Projectgegevens

Titel: Milieu-impactstudie HyDeer, groene waterstof in Lelystad

Auteurs: Ron Bol, Jos Boere, Ad van Wijk (Circul8 / Allied Waters)

Projectnummer RVO: TESNW-03670575

Penvoerder: Circul8 Waterstoffabriek BV, Lelystad

Projectperiode: maart 2024 – juni 2025

Datum rapport: eindrapport, 25 september 2025

Het project is uitgevoerd met subsidie van Groenvermogen, TSE Industrie studies, uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

SAMENVATTING

Circul8 beoogt gefaseerd productie van groene waterstof ter grootte van 105 MWe electrolysevermogen te realiseren nabij Lelystad en daarbij een aantal innovaties te demonstreren. Gezien de complexiteit van de investeringsbeslissingen was vooraf een uitgebreide studie noodzakelijk om het niveau van milieubescherming te maximaliseren. De realisatie van de 105 MWe electrolyser is het startpunt voor het ontwikkelen van een groeiende hydrogen valley in Flevoland, gebundeld in het FLHY-initiatief.

De milieu-impactstudie vormt een belangrijke schakel voordat verdere stappen richting realisatie van de productie van groene waterstof kunnen worden gezet.

Doel van de milieu-impactstudie is een drietal hoofdvragen te beantwoorden.

- a. Hoe kan het niveau van milieubescherming via een integraal ontwerp worden gemaximaliseerd? Elementen hierin zijn flexibilisering van het elektriciteitssysteem, watervoorziening uit lokale bronnen, nuttig inzetten van restwarmte en andere bijproducten, opslag van waterstof, conversie naar groene ammoniak en de landschappelijke inbedding.
- b. Hoe biedt het ontwerp voldoende flexibiliteit naar de toekomst? Hierbij te denken aan het gefaseerd opbouwen van de capaciteit, infrastructuur voor levering van groene waterstof per as dan wel via leidingen, faciliteiten voor levering van warmte resp. groene ammoniak.
- c. Hoe vertalen de ontwerpkeuzes zich naar de businesscase? Het integrale ontwerp, de gefaseerde realisatie en een nog prille waterstofmarkt met nog evoluerende en veranderende wet- en regelgeving en energiebeleid leveren belangrijke variabelen die meetellen bij het bepalen van de economische haalbaarheid

De verschillende activiteiten zijn gestructureerd in een viertal werkpakketen.

Conclusie algemeen

Het project HyDeer heeft alles in zich om een parel van de toekomst te worden:

- Gebruik van overvloedige lokale groene elektriciteit, met dempend effect op congestie van het stroomnet
- Duurzame watervoorziening gebruik makend van het natuurlijke systeem
- Realiseren van circulair gedachtegoed: nuttig gebruik van reststromen (pekeloplossing, ijzerslib) en restwarmte
- Een potentiële equivalente broeikasgasemissiereductie van circa 105 kton per jaar voor de eindproducten waterstof, afgeleide producten en de inzet van restwarmte
- Een geschikte locatie, waar veel aandacht is besteed voor een goede landschappelijke inbedding
- Een vergunningsaanvraag in de eindfase

Circul8 beoogt de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen) z.s.m. te starten. Sterk bepalend voor het investeringsbesluit zijn voldoende perspectief van een afzetmarkt en een verbetering van de businesscase nodig. Overheidsbeleid speelt daarbij een cruciale rol.

Conclusies specifiek

Gekoppeld aan de doelstellingen a, b en c zijn de conclusies als volgt.

ONTWERP

Flexibilisering van het energiesysteem

Het benodigde vermogen (20 105 MWe) voor de waterstofproductie speelt ruimte vrij op het lokale grid voor meer groene opwek. Alleen al door realisatie in de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen) vindt 3,5% minder curtailment (afschakelen van de opwek) plaats. Nuttig

inzetten van de restwarmte levert in de eerste fase al een potentieel van $>1,5 \text{ Mm}^3$ aardgasbesparing in de industrie op.

Reductie CO₂-emissie

Afhankelijk van het te kiezen scenario bedraagt de potentiële reductie van de CO₂-emissie 105 kton per jaar.

Lokale watervoorziening

Een robuust ontwerp is gemaakt dat garant staat voor voldoende beschikbaarheid van ultrapuur water, gebruik makend van lokaal, brak oppervlaktewater. Het concept is aangepast op de vraag vanuit het waterschap om een eigen strategische reserve aan te leggen met het oog op perioden van extreme droogte.

Groene pekkel

Bij het waterbehandelingsproces komt een geconcentreerde zoutoplossing (concentraat) vrij. Met de juiste methodiek laat deze stroom zich indikken tot een pekeloplossing die in beginsel geschikt is voor de gladheidsbestrijding. Aldus ontstaat een bijproduct met economische waarde.

Restwarmte

Voor de vrijkomende restwarmte is een nuttige bestemming gevonden, namelijk (1) indikken van het concentraat (zie boven) en (2) inzetten bij de industrie op het bedrijventerrein Oostervaart.

Opslag waterstof

Het ontwerp voorziet in lokale opslag van waterstof tot ca 9 t. Daarnaast is uitgewerkt hoe een deel van de waterstofproductie (equivalent aan 20 MWe electrolysevermogen) kan worden ingezet voor productie van ammoniak.

Ammoniak

Technisch zijn oplossingen gevonden voor de kleinschalige productie van ammoniak bij variabele belasting van de installatie. De casus is uitgewerkt voor een waterstofproductie op basis van 20 MWe electrolysevermogen. Een potentieel interessante optie is omzetting van de geproduceerde ammoniak naar salpeterzuur als nutriënt voor de tuinbouw.

Landschap

De waterstofproductie wordt landschappelijk optimaal ingebed. Langs de locatie van HyDeer wordt een groene bufferzone met een meanderende waterpartij aangelegd. Voor inbedding van een eventuele productie van ammoniak resp. salpeterzuur zijn geen plannen ontwikkeld (zie ook onder Businesscase).

FLEXIBILITEIT NAAR DE TOEKOMST

Gegeven de veelheid van variabelen moet het ontwerp voldoende flexibiliteit herbergen om toekomstbestendig te zijn. De verschillende onderdelen die in het kader van deze TSE-studie zijn onderzocht leveren zeer waardevolle informatie. In het ontwerp voor de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen) is het aantal externe afhankelijkheden geminimaliseerd. Levensvatbare opties kunnen hieraan nog wel worden toegevoegd, bijv. nuttig inzetten van restwarmte. De ervaringen uit de eerste fase vormen een basis voor de toekomstige opschaling. Voor zover dit in de toekomst zinvol en haalbaar is kunnen andere elementen worden ingebouwd, bijv. de productie van groene ammoniak en salpeterzuur. Deze studie heeft hiervoor een basis gelegd.

BUSINESSCASE

Waterstof

De inkomsten van waterstof zijn de resultante van de verkoopprijs en opbrengsten uit HBES/HWIs (toekomst: EREs), subsidies en netwerkdiensten, zover van toepassing. Deze extra opbrengsten zijn noodzakelijk om tot een levensvatbare businesscase te komen.

Warmte

Voor bedrijven die het gehele jaar warmte nodig hebben en niet verder weg zijn dan ca 2 km lig de kostprijs van teruggewonnen warmte substantieel onder de referentieprijs van warmte uit aardgas, als ook de warmteleiding wordt ingerekend. Ergo, valorisatie van de restwarmte is levensvatbaar, reeds in de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen).

Groene pekkel

Het restproduct groene pekkel kan nuttig worden ingezet als natte component voor gladheidsbestrijding. Er zijn voorraad tanks in de regio, die het hele jaar door kunnen worden bijgevuld. Aldus vertegenwoordigt groene pekkel een positieve waarde.

Ammoniak/salpeterzuur

Ammoniak resp. salpeterzuur zijn economisch niet aantrekkelijk als deze louter bij piekaanbod van waterstof worden geproduceerd. Ook bij continue productie kan e.e.a. alleen als een zeer zware premie wordt betaald voor de groene kleur.

Vervolgstappen

Na afronding van de impact-studie (medio 2025) ligt de focus bij de volgende activiteiten:

- Uitbouwen van het regionale netwerk o.a. via het FLHY-initiatief
- Verder ontwikkelen van het (lokale) afnamepotentieel voor groene waterstof
- Verbeteren van de businesscase via subsidies (EU, nationaal), EREs e.a.
- Besluitvorming en verder inrichten van de samenwerking Circul8 – Essent
- Afronden van het vergunningstraject
- Disseminatie via de openbare samenvatting van deze rapportage en communicatie-activiteiten in het kader van verdere marktontwikkeling en -bewerking

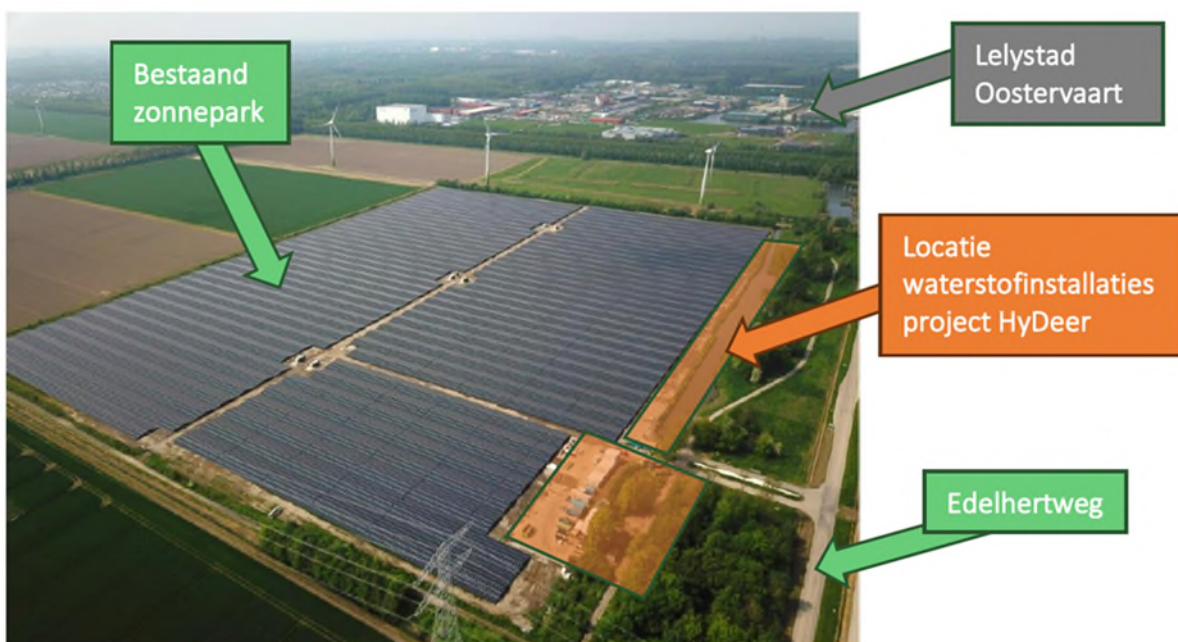
INHOUDSOPGAVE

1.	Introductie en doel	7
1.1.	Algemeen	7
1.2.	Probleemstelling	8
1.3.	Doelstelling	9
1.4.	Leeswijzer	9
2.	Uitvoering per werkpakket	10
2.1.	Algemene aanpak	10
2.2.	Werkpakket 1: milieu impact en koppelkansen	10
2.3.	Werkpakket 2: flexibilisering energiesysteem.....	20
2.4.	Werkpakket 3: BoD en pre-engineering.....	24
2.5.	Werkpakket 4: business case	29
3.	Conclusies en vervolg	33

1. Introductie en doel

1.1. Algemeen

Circul8 Waterstof Fabriek BV (Circul8) beoogt 105 MWe elektrolysevermogen te realiseren voor de productie van groene waterstof nabij Lelystad. De electrolyser wordt gebouwd naast een 45 MWp zonnepark. De realisatie hiervan zal in fasen worden uitgevoerd. In de loop van 2026/2027 moet de eerste fase, 20 MWe, gerealiseerd zijn. Daarna wordt vóór 2030 opgeschaald naar 105 MWe.



Figuur 1: situatieschets Edelhertweg Lelystad

Flevoland is een agrarische regio met veel duurzame energieproductie uit zon en wind. Het 45 MWp zonnepark van aanvrager Circul8 heeft de potentie om jaarlijks ca. 37.000 MWh hernieuwbare energie te leveren aan het lokale gesloten distributiesysteem (GDS) van Smart Grid Flevoland. Dit GDS heeft echter te maken met ernstige netcongestie. De projectie is de netcongestie op het GDS in de nabije toekomst kan oplopen tot ca. 10% van de potentiële elektriciteitsproductie. Netcongestie belemmert niet alleen de productie van duurzame energie, maar beperkt ook de economische groei van verschillende sectoren in de regio. Daarom wordt de realisatie van de 105 MWe electrolyser breed gedragen in de regio. De electrolyser staat centraal in de ambitie van de regio om een Hydrogen Valley te ontwikkelen. Deze ambities zijn vastgelegd in FLHY: Flevoland Hydrogen Valley ([Flevoland start eigen Hydrogen Valley \(horizonflevoland.nl\)](http://horizonflevoland.nl)).

De provincie Flevoland heeft een uitstekende uitgangspositie voor de introductie en het gebruik van groene waterstof:

- Er is een overvloed aan lokaal geproduceerde duurzame energie
- Er is een lokaal GDS (privaatelectriciteitsnet), dat wordt beheerd en geëxploiteerd door Equans, het Smart Grid Flevoland (SGF)

- Lelystad ontwikkelt een binnenvaarthaven (Flevokust Haven); waterstof voor binnenvaartschepen is een interessante toepassing
- In Flevoland bevindt zich de Wageningen Universiteit (WUR) die 1200 hectare land heeft met veel agrarische praktijk onderzoeksorganisaties; waterstof kan in de agrarische sector worden gebruikt voor machines en voertuigen op waterstof, als vervanger van aardgas in WKK in de glastuinbouw en voor lokale productie van groene meststoffen zoals ammoniak en salpeterzuur
- De economie van de provincie Flevoland wordt gekenmerkt door een sterke aanwezigheid van transport- en logistieke bedrijven
- Lelystad Airport, onderdeel van de Schiphol Group, met haar opleidingscentrum voor piloten, kan waterstof in de luchtvaart testen en piloten opleiden in het vliegen op waterstof
- Lelystad heeft een gasgestookte elektriciteitscentrale van 900 MW (2x450 MW) voor de opwekking van elektriciteit (Maxima centrale); beide gasturbines zijn omgebouwd om te kunnen draaien op een mengsel van waterstof en aardgas

Om de transitie naar een waterstofeconomie in goede banen te leiden, is het belangrijk dat er in de provincie electrolysecapaciteit wordt gecreëerd om de benodigde groene waterstof te produceren. Om deze transitie mogelijk te maken heeft de provincie het platform FLHY geïnitieerd (zie boven), waaraan Circul8 en een groot aantal andere partijen zich hebben geëngageerd.

1.2. Probleemstelling

De ambitie van Circul8 is om gefaseerd 105 MWe electrolysevermogen te realiseren en daarbij een aantal innovaties voor het eerst te demonstreren:

- Eigen watersysteem voor de productie van ultrapuur water omdat geen aansluiting op het drinkwater net kan worden verkregen
- Uitkoppeling van restwarmte van de electrolyser voor hergebruik om onder andere pekelzout te produceren uit de brijn van de waterbehandeling
- Directe koppeling van de productie van groene ammoniak aan een electrolyse; groene ammoniak kan worden gebruikt voor de productie van meststoffen en voor langdurige opslag van groene energie
- Aansturen van deze systemen zodat de electrolyser kostenefficiënt produceert en kan bijdragen aan flexibiliteit in het elektriciteitssysteem

Bij een dergelijke investeringsbeslissing zijn de uitgangspunten zeer complex en gaan deze verder dan alleen het technisch ontwerp. Zo spelen ook niet-technische aspecten een rol, met name het vergunningproces en landschappelijke inbedding om de lokale acceptatie te vergroten.

Uiteindelijk hebben al deze aspecten gevolgen voor de maximale milieuwinst en de kosten van de demonstratie installatie.

De uiteindelijke investeringsbeslissing zal grotendeels bepaald worden door:

- Ontwerp opties om de eerste fase (20 MWe) in te passen in een 105 MWe systeem
- Ontwerp opties voor het watersysteem om zelf ultrapuur water te produceren
- Optimale inzet van lokaal beschikbare duurzame energiebronnen
- Optimale inzet van restwarmte van de elektrolyse
- Mogelijkheden om groene waterstof lokaal af te zetten
- Lokale acceptatie en het verkrijgen van de benodigde vergunningen
- Uiteindelijke businesscase en milieu impact

Gezien de complexiteit van de investeringsbeslissing is vooraf een uitgebreide studie noodzakelijk om het niveau van milieubescherming te maximaliseren. De realisatie van de 105 MWe electrolyser is het startpunt voor het ontwikkelen van een groeiende hydrogen valley in Flevoland, gebundeld in het FLHY-initiatief.

1.3. Doelstelling

De milieu-impactstudie vormt een belangrijke schakel voordat verdere stappen richting realisatie van de productie van groene waterstof kunnen worden gezet.

Doel van de milieu-impactstudie is een drietal hoofdvragen te beantwoorden.

- b. Hoe kan het niveau van milieubescherming via een integraal ontwerp worden gemaximaliseerd? Elementen hierin zijn flexibilisering van het elektriciteitssysteem, watervoorziening uit lokale bronnen, nuttig inzetten van restwarmte en andere bijproducten, opslag van waterstof, conversie naar groene ammoniak en de landschappelijke inbedding.
- c. Hoe biedt het ontwerp voldoende flexibiliteit naar de toekomst? Hierbij te denken aan het gefaseerd opbouwen van de capaciteit, infrastructuur voor levering van groene waterstof per as dan wel via leidingen, faciliteiten voor levering van warmte resp. groene ammoniak.
- d. Hoe vertalen de ontwerpkeuzes zich naar de businesscase? Het integrale ontwerp, de gefaseerde realisatie en een nog prille waterstofmarkt met nog evoluerende en veranderende wet- en regelgeving en energiebeleid leveren belangrijke variabelen die meetellen bij het bepalen van de economische haalbaarheid

1.4. Leeswijzer

Hoofdstuk 2 volgt de structuur van het oorspronkelijke projectplan en de daarin beschreven werkpakketten. Hieraan is een paragraaf over procesmatige evaluatie toegevoegd. Elk onderdeel kent een eigen vraagstelling, uitvoering, beschrijving van resultaten en een verantwoording. Hoofdstuk 3 geeft de conclusies en de vervolgstappen weer.

2. Uitvoering per werkpakket

2.1. Algemene aanpak

Bij het inrichten van de productie en levering van groene waterstof speelt een veelheid van variabelen, waaronder de te kiezen technologie, distributiewijze, voorziening van elektriciteit en water en vergunningen. Wij voegen daar nog verdere opties aan toe: inzetten van warmte, productie van groene ammoniak en verwaarden van het restproduct groene pekkel. Aldus is de insteek van onze milieu-impactstudie breed, omdat we juist een aantal opties willen onderzoeken en zo mogelijk verder ontwikkelen, waarvan op voorhand niet vaststaat of deze in de praktijk ook allemaal realiseerbaar zijn.

De realiseerbaarheid heeft mede met schaalgrootte te maken; bijvoorbeeld past de ammoniakproductie op dit punt niet in de eerste fase (20 MWe). In deze eerste fase hebben we het aantal externe afhankelijkheden zoveel mogelijk geminimaliseerd. Bij de opschaling naar 105 MWe kunnen we dergelijke elementen wel in het concept opnemen, uiteraard afhankelijk van de technisch-economische haalbaarheid.

2.2. Werkpakket 1: milieu impact en koppelkansen

2.2.1. Basis of Design (BoD) waterstofinstallaties

Vraagstelling

De waterstofinstallatie bestaat onder meer uit electrolyzers, compressoren voor het verhogen van de druk, een vulstation voor het vullen van tubetrailers/Multi Element Gas Containers (MEGC) voor vervoer per as en toebehoren voor o.a. stroomtoevoer, veiligheid en optimale aansturing.

Tezamen vormt dit het basisontwerp.

Specifieke ontwerp vragen betreffen:

- Gefaseerde realisatie in stappen tot 105 MWe electrolysevermogen
- Integratie met waterbehandeling, warmte-uitkoppeling, productie van groene ammoniak
- Voorzieningen voor warmte-uitkoppeling

Uitvoering en resultaten

Binnen deze studie zijn de volgende onderwerpen uitgewerkt:

- 1) De BoD (Base of Design) voor de 1^e fase 20 MWe
- 2) Een globaal basis ontwerp voor de uitbreiding tot 105 MWe

1) BoD 1^e fase 20 MWe

Een volledige BoD is uitgewerkt voor de eerste fase van project HyDeer. De BoD heeft een leidende rol in het project. Hierin leggen we vast wat er gebouwd moet worden, waarom, en met welke technische en functionele eisen, zodat alle betrokkenen dezelfde uitgangspunten hanteren voor vergunningsaanvraag, business plan en offerte traject. Daarnaast dient de BoD om een duidelijke, onderbouwde en complete basis te leggen voor het verdere ontwerp en de engineering.

2) *Globaal Basisontwerp voor de uitbreiding tot 105 MWe*

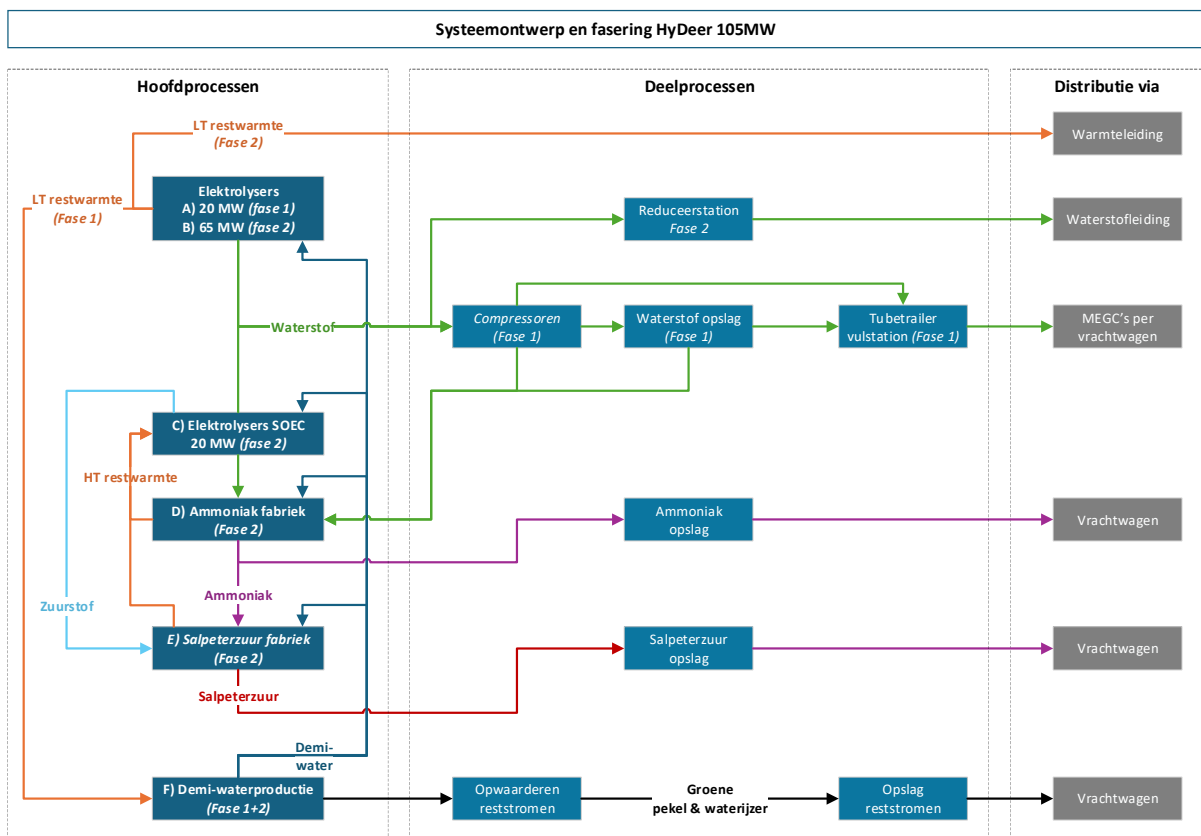
Voor de uitbreiding tot 105 MWe is een basisontwerp gemaakt. Binnen dit ontwerp is gestreefd naar een maximale integratie van de verschillende systeem- en procesonderdelen als omschreven in par. 2.2, 2.3 en 2.4.

Via deze aanpak worden energie en hoofd- en bijproducten zo goed als mogelijk benut zodat de milieu-impact wordt geminimaliseerd. Doel is daarmee tevens de business case te verbeteren.

In het ontwerp zijn de onderstaande systemen opgenomen. We lichten de diverse onderdelen verder toe:

- Waterstofproductie via elektrolyzers (A+B)
- Waterstofproductie via SOEC (hoge temperatuur) elektrolyzers (C)
- Ammoniakproductie (D)
- Salpeterzuurproductie (E)
- Demiwater productie (F)
- Opwaarderen reststromen (pekkel en waterijzer) uit demiwater productie
- Restwarmte productie (A+B+D+E)

Het systeemontwerp is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 - systeemontwerp en fasering van HyDeer 105 MW electrolyser vermogen

Tabel 1 - Energie- en massabalans basis ontwerp

	Eenheid	Fase 1	Fase 2				Fase 1+2
		A	B	C	D	E	F
Eindproduct		H ₂	H ₂	H ₂	NH ₃	HNO ₃	H ₂ O
Capaciteit	ton/h	0,36	1,17	0,53	2,2	4,1	22
Inputvermogen	MWe	20	65	20			
Vollasturen	uur/j	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	
Stroomverbruik	MWh/j	90.000	292.500	90.000	13.500	5.500	
Productie waterstof	ton/j	1.620	5.265	2.389			
Gebruik waterstof	ton/j				2.389		
Productie NH ₃	ton/j				13.439		
Gebruik NH ₃ t.b.v. HNO ₃	ton/j					4.774	
Productie zuurstof t.b.v. HNO ₃	ton/j			19.110			
Gebruik zuurstof t.b.v. HNO ₃	ton/j					19.110	
Productie HNO ₃ (100% wt.)	ton/j					17.673	
Productie HNO ₃ (60% wt.)	ton/j					24.742	
Gebruik demi-water	ton/j	17.820	57.915	26.277	4.032	7.069	
Productie demi-water	ton/j						113.113
Productie ijzerslib 1,0 w/w-%	ton/j						45,2
Productie pekkel 20 w/w-%	ton/j						353
Surplus restwarmte (T <60 °C)	MWh/j	18.000	58.500				
	m ³ a.e.q.	1.842.479	5.988.058				
Productie HT restwarmte	MWh/j				17.550	6.750	
Inzet HT restwarmte	MWh/j			23.850			

Tabel 2 – Indicatie van CO₂ emissiereductie per eindproduct

		A	B	C	D	E
Product		H ₂	H ₂	H ₂	NH ₃	HNO ₃
Levering aan eindafnemer	ton product/j	1.620	5.265	0	8.665	17.673
CO ₂ emissiefactor	ton CO ₂ eq./t	9,0	9,0	9,0	1,8	0,9
Waterstof	ton CO ₂ eq./j	14.580	47.385	0		
Ammoniak	ton CO ₂ eq./j				15.600	
Salpeterzuur	ton CO ₂ eq./j					16.610
Restwarmte (incl. 25% transportverliezen)	ton CO ₂ eq./j	2.460	7.994	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Totaal	kton CO₂ eq./j				105	

Energie- en massabalans

In Tabel 1 is de uitwerking t.a.v. energie en hoofd/deelstromen weergegeven van het totale systeem bij de in de tabel aangegeven vollasturen. In Tabel 2 is de indicatie van de CO₂ emissiereductie weergegeven per eindproduct.

Toelichting op het basis ontwerp: A) Waterstofproductie 1^e fase – 20 MWe

Het produceren van waterstof staat centraal in de 1^e fase. Er wordt 20 MWe electrolyservermogen gerealiseerd. De geproduceerde waterstof wordt op druk gebracht via compressoren, passend bij de 20 MWe waterstofproductiecapaciteit. De waterstof wordt via een vulstation geleverd aan tubetrailers of MEGC's en per as naar afnemers gedistribueerd. Afhankelijk van het vraagprofiel en beschikbaarheid/prijs van groene stroom wordt de waterstof tijdelijk opgeslagen of direct geleverd.

De installatie wordt zo uitgerust om toekomstige uitkoppeling van restwarmte mogelijk te maken. De vrijkomende – lage temperatuur – restwarmte wordt geleverd aan een warmteleiding en ingezet bij de demiwaterproductie (par. 2.2.2 en 2.2.3).

Toelichting op het basis ontwerp: B) Waterstofproductie 2^e fase – 65 MWe

In de 2^e fase wordt 65 MWe elektrolyse vermogen gerealiseerd. Deze waterstof wordt geleverd via een waterstofleiding. De huidige indicatie is dat een druk van maximaal 16 bar wordt toegepast in de waterstof leidingen in de regio, daarom dient de druk vóór distributie via een reduceerstation te worden verlaagd. De geproduceerde waterstof wordt primair geleverd aan de leiding maar kan afhankelijk van vraag en aanbod ook worden geleverd aan het vulstation in het geval de elektrolyzers in de 1^e fase vanwege onderhoud of uitval niet beschikbaar zijn.

Vanwege beperkingen in het aantal transportbewegingen bij het vervoeren van waterstof per as kan er nooit meer dan 20 MWe aan elektrolysevermogen per as worden getransporteerd.

Daarnaast kan de waterstof bij onderhoud of uitval van het SOEC-systeem (zie C) ook worden ingezet voor de productie van groene ammoniak. De installatie wordt zo uitgerust om toekomstige uitkoppeling van restwarmte mogelijk te maken. De vrijkomende – lage temperatuur – restwarmte wordt geleverd aan een warmteleiding en ingezet bij de demiwaterproductie (par. 2.2.2 en 2.2.3).

Toelichting op het basis ontwerp: C) Waterstofproductie 2^e fase – 20 MWe SOEC (par. 2.2.4)

De Solid Oxide Electrolysis (SOEC) elektrolyzers produceren primair waterstof voor de groene ammoniakfabriek maar kunnen ook leveren aan het vulstation of aan de leiding. De vrijkomende – hoge temperatuur – warmte uit het ammoniakproductie- en salpeterzuurproces wordt toegepast in de SOEC elektrolyzers waardoor het stroomverbruik per kg waterstof wordt verminderd. De vrijkomende zuurstof wordt gevoed aan een salpeterzuurfabriek.

Toelichting op het basis ontwerp: D) Ammoniakfabriek 2^e fase (par. 2.2.4)

De ammoniakfabriek wordt primair gevoed met waterstof uit de SOEC elektrolyzers en met stikstof verkregen uit lucht via het zg. Haber-Bosch proces. De helft van de geproduceerde ammoniak wordt gevoed aan de salpeterzuurfabriek. De andere helft van de productie wordt via vrachtwagens aan de eindgebruikers geleverd. De vrijkomende – hoge temperatuur – warmte uit het Haber-Bosch proces en de salpeterzuurproductie wordt gevoed aan de SOEC elektrolyzers.

Toelichting op het basis ontwerp: E) Salpeterzuurfabriek 2^e fase (par. 2.2.4)

De salpeterzuurfabriek wordt met ammoniak gevoed vanuit de ammoniakfabriek. Zuurstof voor het salpeterproductieproces wordt geleverd vanuit de SOEC elektrolyzers. Het salpeterzuur wordt met demiwater verdund tot een oplossing van 60 % w/w salpeterzuur.

Toelichting op het basis ontwerp: E) Demiwater productie 2^e fase (par. 2.2.2)

Het water dat benodigd is voor waterstofproductie, proceswater voor de ammoniakproductie en het maken van een salpeterzuuroplossing, wordt geleverd vanuit de demiwater voorziening. De vrijkomende pekeloplossing wordt in beginsel via vrachtwagens afgevoerd naar opslag tanks in de regio t.b.v. gladheidsbestrijding in het winterseizoen (par. 2.2.3).

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Circul8 met bijdragen van Summit Engineering, Ekinetix, Bio-Ventures, RAACC Advies, Sweco en Allied Waters.

2.2.2. Voorziening van ultrapuur water

Vraagstelling

De electrolyser heeft ultrapuur water nodig om waterstof te produceren. Ultrapuur water moet voldoen aan strenge eisen (ASTM type 1). Stoichiometrisch is 9 ton ultrapuur water nodig per ton geproduceerde waterstof. Het bruto waterverbruik – inclusief verliezen die optreden tijdens behandeling – bedraagt meer dan het dubbele. Drinkwater is voor dit doel niet beschikbaar, en daarom moet onderzocht worden welke lokale bronnen geschikt gemaakt kunnen worden: hemelwater, oppervlaktewater, grondwater of effluent van een RWZI. We werken in twee stappen:

- (1) Van bronwater naar demiwaterkwaliteit: dit is de focus van deze studie
- (2) Van demiwater naar ultrapuur water: deze polishing vindt plaats bij de electrolyser, en blijft in deze studie verder buiten beschouwing

Het ontwerp moet voorzien in:

- Continue beschikbaarheid van water en zoveel mogelijk constante kwaliteit
- Inpasbaarheid in relatie tot lokale beheersmaatregelen
- Minimale emissies en minimaal gebruik van chemicaliën

Uitvoering en resultaten

Op uurbasis bedraagt de demiwaterbehoefte:

- 4 m³/u bij 20 MWe
- 22 m³/u bij 105 MWe
- 3 m³/u bij de het produceren van ammoniak en salpeterzuur als onderdeel van het 105 MWe systeem

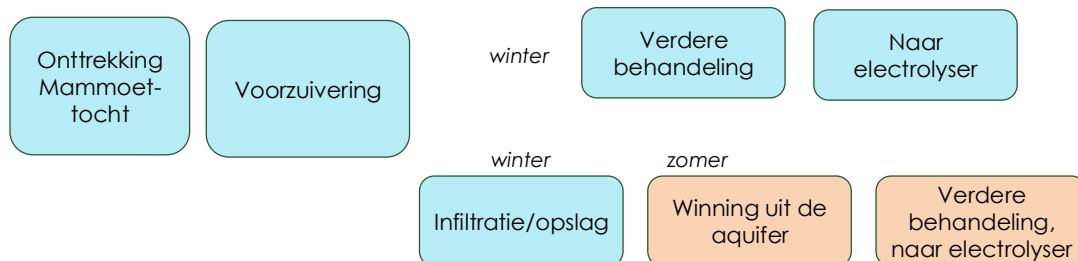
Uit een beschouwing van de verschillende bronnen blijkt lokaal oppervlaktewater vanuit de Oostervaart/Mammoettocht de beste keuze, met dien verstande dat winning in het natte seizoen (zeg oktober – april) de beste kaarten heeft, dit om een tweetal redenen:

- Kwaliteit: het hogere zoutgehalte en de hogere eutrofiëringsgevoeligheid in het zomerseizoen
- Kwantiteit: de eis van een eigen strategische reserve voor perioden van extreme droogte

Vanuit deze gedachte is een concept uitontwikkeld dat is gebaseerd op onttrekking van oppervlaktewater tijdens het natte seizoen gekoppeld aan ondergrondse berging in de aquifer (ASR, Aquifer Storage and Recharge). Zie Figuur 2. Het systeem is uitgewerkt voor de eerste fase (20 MWe), en is zodanig opgezet dat dit zich modulair laat uitbreiden tijdens de verdere opschaling.

Voor zover reststromen ontstaan bij de waterbehandeling, zie Tabel 3, vinden deze een nuttige toepassing. Ook de uiteindelijke brijn zetten we om in een bruikbaar product; zie onder groene pekkel. Het gehele concept is innovatief en technisch haalbaar.

Als tijdelijk alternatief dan wel noodvoorziening bestaat de mogelijkheid effluent te behandelen op de RWZI van Lelystad, en vervolgens demiwater per tankwagen aan te voeren naar de locatie van HyDeer. Met enige aanpassing kan dit met hetzelfde waterbehandelingsproces als omschreven in Tabel 3.



Figuur 2 - schematisch overzicht van demineralized water productie

Het ontwerp zorgt voor continue beschikbaarheid van demineralized water bij minimaal verbruik van chemicaliën en nuttige inzet van reststromen. Op hoofdlijnen is de inpasbaarheid van het gehele systeem waterbehandeling – ASR besproken met waterschap Zuiderzeeland.

Tabel 3 - waterbehandelingsproces

Behandeling	Verwijdering van	Reststroom
Zeven – Coagulatie – Ultrafiltratie (Z-C-UF)	Zwevend/colloïdaal materiaal, micro-organismen	Waterrijzer (terug naar landbouw, ook bruikbaar in biovergisting)
Granular Activated Carbon (GAC)	Opgeloste organische stoffen, bestrijdingsmiddelen, medicijnresten	Geen (GAC gaat naar externe regeneratie)
Nanofiltratie (NF) met lage recovery (zeg 30-40%)	Tweewaardige ionen, DOC	Mild concentraat, terugvoeren naar het watersysteem
Reverse Osmosis (RO)	Zouten	Contraat naar verdere verwerking
Ionenwisseling (IEX)	Ammonium	Regeneraat naar verdere verwerking
➤ Demineralized water naar ELY		Spoelwater met laag zoutgehalte naar vijver
➤ Contraat naar indamping		<ul style="list-style-type: none"> • Desillaat naar demineralized water • Pekel 20 w/w-% t.b.v. nuttige inzet

Winter (natte periode)

Onttrekking uit de Mammoettocht/Oostervaart
Zeven – Coagulatie – Ultrafiltratie (Z-C-UF)
Granular Activated Carbon (GAC)
Twee deelstromen:
• Verdere behandeling en naar ELY
• Infiltratie in de aquifer
Nanofiltratie (NF) met lage recovery (zeg 30-40%)
Reverse Osmosis (RO)
Ionenwisseling (IEX)
➤ Demineralized water naar ELY
➤ Contraat naar indamping

Zomer (droge periode)

Onttrekking uit de aquifer
Beluchting
Zeven – Coagulatie – Ultrafiltratie (Z-C-UF)
Granular Activated Carbon (GAC)
Nanofiltratie (NF) met lage recovery (zeg 30-40%)
Reverse Osmosis (RO)
Ionenwisseling (IEX)
➤ Demineralized water naar ELY
➤ Contraat naar indamping

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Allied Waters met bedragen van KWR (ASR-studie), Colubris (kostenraming waterbehandeling) en Circul8.

2.2.3. Groene pekkel

Vraagstelling

Het oppervlaktewater dat als bron dient bij de productie van ultrapuur water bevat veel zouten. De meeste componenten worden in het waterbehandelingsproces verwijderd. Wat overblijft is een geconcentreerde oplossing van voornamelijk natrium en chloride. Deze brijn kan verder worden ingedikt tot een geconcentreerde pekeloplossing, welke in beginsel inzetbaar is in de gladheidsbestrijding.

Onderzoeksvragen zijn hier:

- Wat is de te verwachten samenstelling van de brijn?
- Wat zijn de kwaliteitseisen voor pekkel die wordt ingezet bij gladheidsbestrijding?
- Wat moet worden gedaan om de brijn in te dikken, zodanig dat deze voldoet aan de kwaliteitseisen van pekkel voor gladheidsbestrijding, 'groene pekkel'?

Uitvoering en resultaten

De kwaliteitseisen van pekkel voor gladheidsbestrijding zijn geformuleerd in NEN-EN 16811-1 (2016), zie Tabel 4.

Tabel 4 - macro-eisen pekkel voor gladheidsbestrijding volgens NEN-EN 16811-1 (2016)

Parameter	Normwaarde
NaCl	18 – 26 %-w/w
Sulfaat	Max. 0,6 %-w/w
Water onoplosbare bestanddelen	Max. 0,03 %-w/w
pH	5 – 10
Koolwaterstoffen	Max 100 mg/kg

Het waterbehandelingsproces (Tabel 3) werkt toe naar een brijnsterkte 20 %-w/w NaCl. Uitgaande van de gemiddelde bronwaterkwaliteit (in: KWR, 2025) impliceert dit een totale indikkingsfactor van circa 300. Voor de laatste stap – van brijn naar pekkel – gebruiken we een deel (<20 %) van de restwarmte van de electrolyser.

De parameters in Tabel 4 zijn haalbaar, uitgaande van:

- Optimale membraankeuze voor sulfaatretentie tijdens de nanofiltratie-stap
- Zo nodig toepassen van een pH correctie
- Een mogelijke extra stap gericht op de koolwaterstoffen; op dit punt is de norm niet eenduidig omschreven, ergo is nader overleg met de afnemer nodig

Tabel 5 - spore-metalen in bronwater en pekel

Stof	Bron gem. µg/l	Brijn 'worst case' mg/kg (*)	Brijn norm, max. mg/kg (*)
Al, Aluminium	N.b.	N.b.	50
As, Arseen	0,99	1,3	2,5
Cd, Cadmium	0,02	0,03	2
Co, Cobalt	0,4	0,5	2
Cr, Chroom	0,8	1,1	5
Cu, Koper	1,3	1,7	5
Hg, Kwik	0,01	0,01	0,5
Ni, Nikkel	1,7	2,3	5
Pb, Lood	0,19	0,3	5
Zn, Zink	3,4	4,5	20

(*) uitgedrukt op d.s. basis

Potentieel kritisch is het gehalte van spore-metalen. Deze worden deels verwijderd in de diverse stappen van de waterbehandeling. Nemen we daarentegen een worst case benadering (Tabel 4) dan gaan we ervan uit dat alle metalen uit het bronwater in de pekel terecht komen. Zelfs dan blijven we binnen de normwaarden voor wegeenzout. Voor Al zijn geen data beschikbaar; de verwachting is dat ook de concentraties van Al ruim binnen de norm liggen.

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Allied Waters met bijdragen van Colubris en Circul8.

2.2.4. Groene ammoniak

Vraagstelling

In het HyDeer project wordt de geproduceerde waterstof (1) direct afgenomen door een gebruiker of (2) opgeslagen in drukvaten. Een alternatief voor (2) is omzetten in ammoniak via het Haber-Bosch proces, een synthese o.b.v. waterstof en stikstof (N₂).

Normaliter gebruikt de industrie hiervoor grijze waterstof die wordt geproduceerd uit aardgas. Standaard zijn continu werkende, grote installaties met een productiecapaciteit >100.000 ton ammoniak per jaar. Daarentegen zouden we bij HyDeer het proces voeden met groene waterstof, welke in wisselende hoeveelheden beschikbaar is, waardoor de productie discontinu is. Daarnaast is de schaal van opereren veel kleiner dan bovengenoemd, eerder 10.000 ton ammoniak per jaar. De volgende vragen:

1. Is het proces op discontinue basis en op genoemde schaalbaar mogelijk?
2. Zijn er emissies, en zo ja, hoe deze te beperken?
3. Zou e.e.a. op of nabij de locatie van HyDeer ingepast kunnen worden, en vergunbaar zijn?
4. Hoe ziet de economie van het proces eruit?

Uitvoering en resultaten

Het proces

Faciliteiten voor continue productie van ammoniak op een schaal 10.000 t per jaar zijn tegenwoordig leverbaar; zie bijv. [Home - Proton Ventures](#). Regelbaar bedrijven wordt tot dusverre niet toegepast, ook niet buiten Nederland. Voor een gegeven installatie ligt hierbij de uitdaging niet zozeer bij het afschalen (bijv. Van 100 naar 20% van de capaciteit), maar bovenal bij het opschalen. Belangrijk is dat temperatuurschommelingen in de reactor beperkt blijven. Dit kan worden bereikt door een (elektrische) heater in te bouwen speciaal voor dit doel.

In de praktijk draait een installatie bij voorkeur permanent op minimaal 10% van de capaciteit, zodat de belasting kan pendelen tussen 10 en 100%. Om dit mogelijk te maken moet vooraf een buffervoorraad waterstof beschikbaar zijn om de installatie gedurende een gewenste periode (zeg 1 tot enkele dagen) te kunnen laten doordraaien. Met genoemde maatregelen is het mogelijk om ammoniak te produceren met een variabele belasting van de installatie.

Tijdens het onderzoek is een aanvullende optie geïdentificeerd, i.e. de productie van salpeterzuur door omzetting van ammoniak. Achterliggende gedachten zijn tweërlei:

- Proces: de omzetting van ammoniak naar salpeterzuur is sterk exotherm, en levert daarbij de benodigde warmte om het SOEC-type electrolyser in te zetten (par. 2.2.1); deze SOEC heeft een significant hoger rendement in de productie van waterstof
- Afzetmarkt: verdund salpeterzuur is een gangbare meststof die in de tuinbouw wordt ingezet; Flevoland heeft veel tuinbouw in de regio

Emissies

Emissies zijn beperkt tot lekverliezen van ammoniak en i.c. salpeterzuur NO_x . De installaties worden zodanig ontworpen en bedreven dat dergelijke verliezen tot een absoluut minimum worden beperkt. Inschatting van kwantitatieve impact op de locatie van HyDeer verlangt een nadere studie. Vooral is de verwachting dat de impact beperkt zal zijn.

Locatie HyDeer

De locatie van HyDeer houdt het midden tussen een industriële omgeving aan de westzijde (bedrijventerrein Oostervaart en snelweg) en een agrarisch achterland in oostelijke richting. De voetafdruk van de beoogde installaties zou ruimschoots passen op de locatie. Nu voorziet het huidige bestemmingsplan niet in syntheseprocessen als ammoniak- en salpeterzuurproductie alsmede opslag van beide stoffen. Dit is een aandachtspunt zodra e.e.a. opportuun is vanuit economisch perspectief.

Economische aspecten

Conceptueel is de conversie van (piekaanbod van) waterstof naar stoffen (ammoniak, salpeterzuur) die in de lokale markt kunnen worden afgezet, een goede gedachte. Lokale inbedding en vergunningverlening zijn uitdagend. Wat betreft de economie van het geheel is het de vraag in hoeverre e.e.a. haalbaar is. Ammoniak wordt in bulkhoeveelheden geproduceerd, en de marktprijs wordt gedicteerd door ontwikkelingen op wereldschaal. Alleen bij relatief optimistische aannamen van elektriciteitsprijzen en bij inrekenen van subsidies lijkt de casus haalbaar.

In de technische uitwerking (par. 2.2.1, par. 2.3 en 2.4) hebben we 20 MWe electrolysevermogen galloceerd aan de productie van ammoniak en derivaten. Dit levert informatie op die in breder verband kan worden gebruikt.

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Bio-Ventures met bijdragen van Allied Waters en Circul8.

2.2.5. Warmteuitkoppeling

Vraagstelling

De electrolyser produceert naast waterstof ook restwarmte, die normaliter via luchtkoeling wordt afgevoerd. Circul8 stelt zich als doel deze restwarmte nuttig in te zetten.

Belangrijke vraagstukken hierbij zijn:

- Hoeveel restwarmte kan worden teruggewonnen, en met welk patroon in de tijd?
- Welke afnemers kunnen overweg met het (variabele) aanbod aan restwarmte?
- Welke technische en niet-technische mogelijkheden zijn er om de variatie in het aanbod op te vangen?
- Hoe en bij welke temperatuur kan de restwarmte worden geleverd?

We richten ons hierbij op de restwarmte die vrijkomt bij de PEM-electrolyse (par. 2.2.1 en 2.4.4). De extra warmte die vrijkomt bij de productie van groene ammoniak resp. salpeterzuur (par. 2.2.4) wordt gekoppeld aan de SOEC-electrolyser.

Uitvoering en resultaten

Bij de productie van groene waterstof komt de warmte vrij bij een gemiddelde temperatuur rond 55 °C. Het patroon waarmee de warmte vrijkomt zal niet geheel lineair zijn met de waterstofproductie, aangezien het omzettingsrendement niet constant is en warmteverliezen ook van meerdere factoren afhangen.

Een realistisch uitgangspunt is dat over de looptijd van het project gemiddeld 20 % van het opgenomen elektrisch vermogen als warmte kan worden teruggewonnen. Hierin inbegrepen is de toenemende warmteproductie door stackdegradatie. Bij vollast betekent dat voor:

- Eerste fase (20 MWe): 4 MW_{th}
- Opschaling naar 105 MWe: 21 MW_{th}

Voor de eerste fase (20 MWe) is gerekend met een beschikbaarheid van 18.000 MWh_{th} op jaarbasis.

Voor de afname van warmte is het gunstig dit zo dicht mogelijk bij de locatie van HyDeer te zoeken, dit i.v.m. kosten voor de aanleg van warmteleidingen en optredende warmteverliezen. Het afnamepotentieel in de omgeving is geïnventariseerd (tabel 6). De voorkeur ligt bij afnemers die jaarrond een warmtebehoefte hebben. Dan is alleen kortstondige opslag nodig om enkele dagen te kunnen overbruggen.

Bij seizoensgebonden afname zou warmte over langere perioden gebufferd moeten worden. Dit verlangt een verdere geohydrologische studie. Randvoorwaarde is hierbij dat deze warmteopslag geen obstakel wordt voor de aanleg van een zoetwateropslag (ASR, par. 2.2.2).

Tabel 6 - Inventarisatie van potentiële warmtevraag in de omgeving

Locatie	Warmte-vraag in MW _{th} (prognose)	Afstand in km	Verdeling over de seizoenen
Eigen gebruik ultrapuur water (par. 2.2.2/2.2.3)	0,4	<0,1	Jaarrond, naar rato van productie waterstof
Green Smart Economy Hub (Circul8)	1,2	0,4	Deels seizoen, deels jaarrond
Casus A	4	0,7	Jaarrond (productie)
Casus B	0,8	1,8	Seizoen (ruimteverwarming)
Casus C	8	2,0	Jaarrond (productie)
Casus D	2	2,2	Seizoen (ruimteverwarming)
Casus E	2	2,5	Jaarrond (productie)
Casus F	22	1,0 .. 2,5	Jaarrond (productie)
Casus G	2	5	PM

Onder de potentiële afnemers in de industrie vinden we interessante opties gelet op het type proces en bijbehorende werktemperatuur. Een globale berekening van kosten en baten (besparingen) laat zien dat dit een levensvatbare business case kan leveren.

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Circul8 met bijdrage van Allied Waters.

2.3. Werkpakket 2: flexibilisering energiesysteem

2.3.1. Vraagstelling

De regio Flevoland heeft te maken met netcongestie, ook op het lokale grid (SGF). In het HyDeer project zetten we (overschotten aan) duurzame energie in voor de productie van groene waterstof, warmte en groene ammoniak/salpeterzuur. Hiermee wordt de bestaande capaciteit voor groene elektriciteitsproductie beter benut dan wel wordt ruimte vrijgemaakt voor extra nieuwe capaciteit voor groene elektriciteitsproductie.

Leidraad in de vraagstelling vormt de impact op het elektriciteitssysteem van:

- Productie van groene waterstof
- Terugwinnen en inzetten van restwarmte
- Productie van groene ammoniak en salpeterzuur

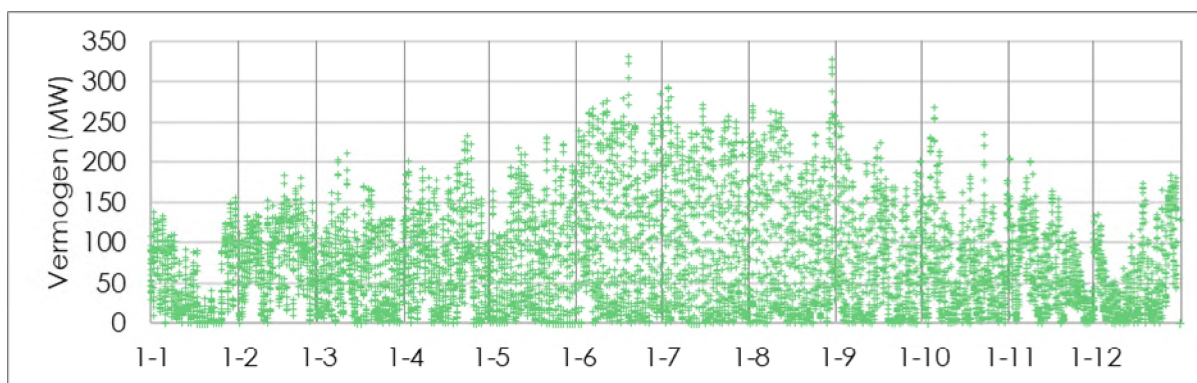
In dit werkpakket worden de gegevens uit WP1 gebruikt en de mogelijkheden uitgewerkt voor de flexibilisering van het energiesysteem, specifiek het elektriciteitssysteem. Activiteiten zijn:

- Inventarisatie van productieprofielen van duurzame elektriciteit op het SGF

- Verwerken van de analyse resultaten t.b.v. het bepalen van de verdere dimensionering van de deelsystemen en het opstellen van de energiebalansen (par. 2.2.1)
- Zoveel als mogelijk gebruiken van duurzame energie-overschotten van het SGF door deze te gebruiken voor tijdelijke opslag van groene waterstof en de productie van groene ammoniak en salpeterzuur

2.3.2. Productie van groene waterstof

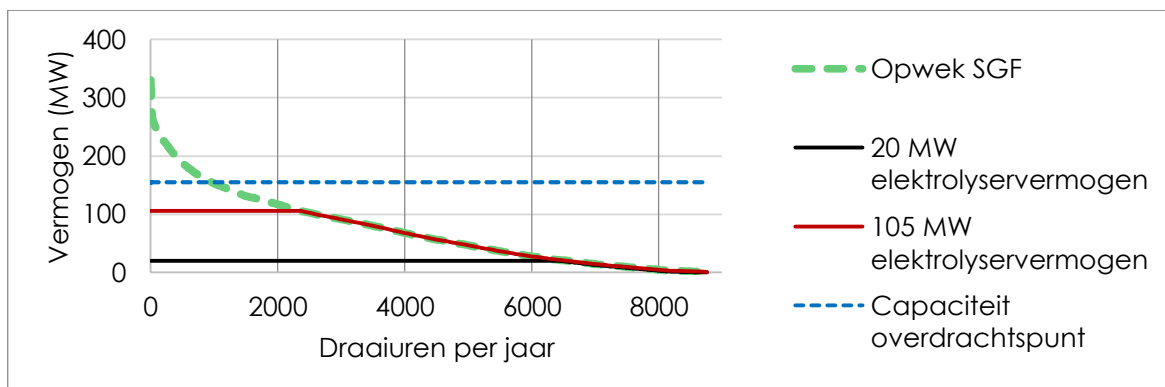
De productie van groene waterstof is bepaald o.b.v. gesimuleerde productiedata op SGF. Op jaarbasis kan er ca. 560.000 MWh aan elektriciteit uit zon en wind worden geproduceerd, zie de uurlijkse visualisatie hiervan in Figuur 3. Het opgestelde vermogen aan zon en wind (ca. 330 MW(p)) is hoger dan de aansluitcapaciteit (ca. 155 MVA) op het overdrachtspunt bij TenneT. Door curtailment wordt er ca. 6,5% (40.000 MWh) minder elektriciteit geproduceerd dan mogelijk is.



Figuur 3 - Weergave van uurlijkse productie op SGF (jaar 2024)

Op basis van deze productiedata is uitgewerkt hoeveel vollasturen de 20 resp. 105 MWe installaties maken als deze alleen worden ingezet op basis van beschikbare elektriciteit op het SGF, zie Figuur 4¹. Hieruit is berekend dat de installaties resp. tot 2.600 en 9.300 ton groene waterstof per jaar kunnen produceren, zie ook Tabel 7.

¹ Hierbij is aanvullend stroomgebruik voor stackdegradatie, compressie van waterstof en het opereren van de ammoniak-, salpeterzuur-, en demi-waterfabriek nog niet ingerekend. Het totaal benodigde vermogen zal hierdoor toenemen, het aantal vollasturen daalt daardoor.



Figuur 4 - Jaarbelastingduurkromme inzet 20 en 105 MWe elektrolysevermogen

In Tabel 7 is het overzicht weergegeven van de belangrijkste resultaten uit de inzetanalyse. Ten aanzien van de reductie van curtailment is te zien dat het gecurtailde volume met ca. 3,5 % en 6,0 % afneemt bij inzet van resp. 20 MWe en 105 MWe installaties.

Tabel 7 – Overzicht belangrijkste vollasturen analyse

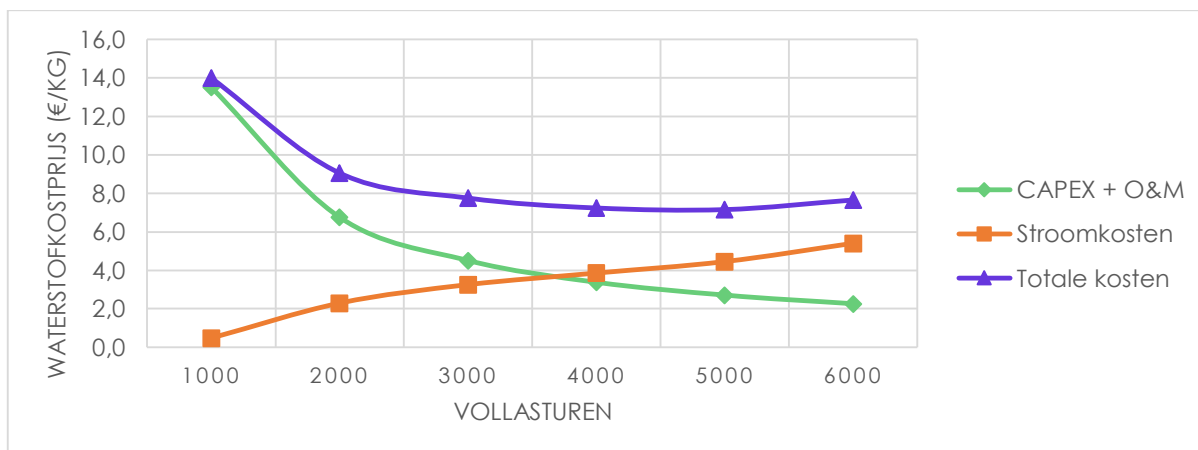
Onderdeel	Eenheid	20 MWe	105 MWe
Vollasturen	uur/jaar	7.400	4.900
Waterstofproductie	ton/jaar	2.600	9.300
Stroomverbruik	MWh/jaar	156.000	510.000
Reductie curtailment	MWh/jaar	23.300	38.500

Werkelijke inzet van de elektrolyzers

In de praktijk zal echter niet worden gekozen voor het maximaliseren van het aantal vollasturen. Uit de onderliggende analyse van Figuur 5 blijkt namelijk dat meer vollasturen leiden tot een oplopende totale kostprijs van de waterstof. De totaalprijs is in de analyse opgebouwd uit de som van de twee hoofdcomponenten (CAPEX + O&M en stroomkosten) en weergegeven als functie van het aantal vollasturen.

Waar de CAPEX + O&M kosten dalen bij meer vollasturen doordat de vaste kosten worden uitgesmeerd over een grotere waterstofproductie, nemen de kosten voor stroom juist toe bij meer vollasturen. Dit komt doordat de elektrolyzers bij meer vollasturen steeds meer gebruik moeten maken van steeds duurdere stroom, dit effect is zichtbaar in de figuur.

De optimale kostprijs bevindt zich bij benadering bij de laagste resultante ('Totale kosten') van zowel de CAPEX + O&M kosten en de stroomkosten. De 'sweet-spot' voor de inzet ligt in dit geval rond de 4.000 - 5.000 vollasturen per jaar. Dit uitgangspunt is gehanteerd voor het bepalen van de jaarlijkse productievolumes in Tabel 1.



Figuur 5 – Productiekosten waterstof als functie van het aantal vollasturen

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Circul8 met bijdragen van Allied Waters.

2.3.3. Inzetten van restwarmte

Restwarmte wordt op een aantal manieren toegepast:

- A) Vanuit de electrolyzers (A+B)
- B) Vanuit de ammoniakproductie (D)
- C) Vanuit de salpeterzuurproductie (E)

Ad A) Bij de 20 MWe en 65 MWe electrolyzers zal lage temperatuur restwarmte via het interne koelsysteem vrijkomen als de electrolyzers in bedrijf zijn. Deze warmte wordt normaal gesproken afgevoerd naar de lucht maar wordt via een warmtewisselaar beschikbaar voor nuttige inzet. Deze inzet bestaat enerzijds uit de levering aan een regionale warmteleiding en aan de levering aan de demiwaterfabriek. De regionale warmteleiding dient in de toekomst warmte te leveren aan bedrijven in Lelystad. Restwarmte inzet bij de demiwaterproductie dient voor het indikken van de daar vrijkomende reststromen.

In beide gevallen is de restwarmte alleen beschikbaar op het moment dat de electrolyzers in bedrijf zijn. Alleen voor kortstondige warmteopslag worden buffers aangelegd, op locatie HyDeer en/of bij aangesloten bedrijven. De productie van demiwater wordt wel gebufferd, hierdoor kunnen vraag- en aanbod tijdelijk worden ontkoppeld.

Ad B) en ad C) De ammoniakfabriek produceert ammoniak via het Haber Bosch proces. De salpeterzuurfabriek produceert salpeterzuur via het Ostwald proces. Beide processen zijn exotherm waardoor er restwarmte op hoge temperatuur ter beschikking is in de vorm van stoom. Deze restwarmte wordt geleverd aan de SOEC-elektrolyzers. De SOEC-elektrolyzers en de ammoniakfabriek volgen hetzelfde productieprofiel waardoor restwarmte op het juiste moment beschikbaar is. Op momenten dat de installaties worden opgestart en er nog geen restwarmte beschikbaar is worden elektrische heaters ingezet totdat het systeem in evenwicht is.

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Circul8 met bijdragen van Bio-Ventures, Summit Engineering en Allied Waters.

2.3.4. Productie van groene ammoniak

Zie par. 2.2.4. De productie van groene ammoniak volgt het productieprofiel van de SOEC-electrolyzers, waarbij de productie van groene ammoniak in de basis alleen mogelijk is als de SOEC elektrolyzers in werking zijn. De helft van de geproduceerde ammoniak wordt – eventueel tussentijds opgeslagen – en per vrachtwagen afgevoerd.

De andere helft van de geproduceerde ammoniak wordt samen met zuurstof uit de SOEC-electrolyser omgezet naar salpeterzuur. De salpeterzuurproductie is daarmee alleen mogelijk als de SOEC-electrolyzers in werking zijn en er groene ammoniak wordt geproduceerd. De salpeterzuurproductie volgt zodoende het productieprofiel van de SOEC-electrolyzers en de ammoniakproductie. Het geproduceerde salpeterzuur wordt verdund met water tot 60% salpeterzuur. Dit mag vervoerd worden per vrachtwagen naar de afnemers.

Verantwoording

Dit onderdeel is uitgevoerd door Bio-Ventures met bijdragen van Circul8 en Allied Waters.

2.4. Werkpakket 3: BoD en pre-engineering

2.4.1. Vraagstelling

Op basis van de studies ad par. 2.2 en 2.3 maken we ontwerpkeuzen in aansluiting op het BOD dat in par. 2.1 is omschreven. Hier houden we rekening met de gefaseerde opstart van 20 MWe naar 105 MWe electrolysevermogen. Belangrijke vragen in deze fase van pre-engineering zijn:

- Hoe ziet het totale processchema eruit voor de eerste fase van 20 MWe?
- Idem voor de fase 105 MWe?
- Hoe is het landschap van aanbieders van de sleutelcomponenten (water- en stroomvoorziening, electrolyser, compressor en opslag)?
- Hoe ziet de begroting eruit voor beide fasen, 20 MWe resp. 105 MWe?
- Hoe kan e.e.a. optimaal landschappelijk worden ingebed?

Op diverse onderdelen hebben we onderzoek verricht waarvan de resultaten in een latere fase bij de engineering kunnen worden toegepast.

Verantwoording

Werkpakket 3 is uitgevoerd door Circul8 met bijdrage van Summit Engineering, Bio-Ventures, Ekinetix, RAACC en Allied Waters.

2.4.2. Processchema's en lay-out

Een belangrijke algemene ontwerpvraag zit in de keuze voor een 'containerised' systeem versus 'engineered' systeem voor de electrolyzers (zie par. 2.4.4):

- Containerised systeem: kant en klaar systeem met 5 MWe capaciteit elk; een gebruikelijke oplossing voor installaties met een totale capaciteit tot 50 MWe
- Engineered systeem: speciaal ontworpen voor de gegeven doelcapaciteit, opgebouwd vanuit skids; de aanpak voor grotere installaties, zeg vanaf 100 MWe

Voor het project HyDeer zal de eerste fase (20 MWe) in elk geval containerized worden uitgevoerd. Ook voor de volgende fase zijn we uitgegaan van de containerised oplossing, gezien het voordeel van een stapsgewijze, modulaire uitbreiding. Het kan zijn dat – afhankelijk van de ontwikkelingen in de waterstofvraag – in de volgfase wordt gekozen om een deel van de capaciteit als een engineered systeem te bouwen.

Binnen deze haalbaarheidsstudie zijn processchema's en lay-outs uitgewerkt voor 20 resp. 105 MWe electrolysevermogen. Het 105 MWe processchema is uitgewerkt voor de gehele waterstofinstallatie. Zie voor de uitsnede Figuur 6. Bij het ontwerpen van dit processchema stond de vergunningsaanvraag voor 105 MWe electrolyser vermogen centraal.

Gedurende het project is op basis van voortschrijdend inzicht een gedetailleerder processchema en bijbehorende lay-out uitgewerkt voor de 1^e fase (20 MWe). De integratie van de 1^e fase binnen de uitbreiding van 105 MWe is geschetst in Figuur 6.

Zoals toegelicht in de algemene aanpak (paragraaf 2) is hier een zo beperkt mogelijke scope gehanteerd om de 1^e fase van het project sneller richting realisatie te brengen. De totale integratie van waterstofproductie incl. o.a. ammoniakproductie en demi-waterproductie is echter wel uitgewerkt binnen het basis ontwerp. Zie verder paragraaf 2.2.1.



Figuur 6 - Overzicht lay-out fase 1 en fase 2 o.b.v. containerised opzet

Tussen de weg aan de noordzijde en de strook waar de electrolyzers zijn gepland (figuur 1 en 6) wordt een meanderende waterpartij aangelegd. Rond de waterpartij komen struiken en bomen. Dit 'mini-park' creëert een groene bufferzone. Van het geheel heeft Circul8 een animatie gemaakt: [Project Hydeer - CIRCULO8](#).

2.4.3. Onderzoek leveranciers en pre-engineering

Tijdens de projectperiode heeft Circul8 zich gericht op het realiseren van een installatie voor de productie van groene waterstof en het vullen van tubetrailers via compressoren en een speciaal vulstation. In de eerste fase hebben we onderzoek gedaan bij diverse leveranciers van relevante systemen en componenten. De ontvangen informatie is zorgvuldig beoordeeld op technische haalbaarheid, operationele aspecten en betrouwbaarheid. Vervolgens zijn gesprekken gevoerd met meerdere leveranciers om meer inzicht te krijgen in hun oplossingen en om technische details verder af te stemmen.

Parallel daaraan heeft Circul8 ook EPCM (Engineering, Procurement, Construction and Management) aanbieders benaderd met het oog op integrale uitvoering van het project. Voor meerdere EPCM-aanbieders zijn dit soort type waterstofprojecten nieuw. Eén van de uitdagingen van die nieuwheid is dat EPCM-aanbieders doorgaans hogere premies zetten op o.a. het inkooptraject.

Om een goed beeld te krijgen van de o.a. de projectaanpak, toe te passen (inkoop)premies en het omgaan met de risico's (zoals budget en planning) binnen het project heeft Circulo8 daarom uitgebreid onderzoek gedaan naar potentiële EPCM-aanbieders. Op basis van de pre-engineering studie zijn voorkeursleveranciers geselecteerd voor zowel de elektrolyzers, compressoren, stationaire opslag en EPCM-partij.

Er zijn veel verschillende aanbieders van waterstofapparatuur, variërend van complete, kant-en-klare electrolysesystemen en tubetrailer-vulstations tot leveranciers van meetapparatuur, kleppen en andere appendages. In deze studie is de nadruk gelegd op het identificeren van de meest geschikte leveranciers voor de meest kritieke en kapitaalsintensieve onderdelen: elektrolyzers, compressoren, stationaire waterstofopslag en de middenspanningsapparatuur vanaf het inkooppunt op het SGF. De keuze van leveranciers voor de overige componenten wordt naar verwachting overgelaten aan de EPC-partij. Om ervoor te zorgen dat deze partij bij de verdere selectie de juiste uitgangspunten hanteert, wordt consequent uitgegaan van het BoD-document, zie bijlage A.

2.4.4. Electrolyzers

Electrolyzers worden op verschillende manieren aangeboden:

- A) *Containerised systemen*
- B) *Skid-mounted*

A) *Containerised systemen*

De meeste aanbieders van electrolysesystemen leveren kant-en-klare systemen in containervorm met een totaal vermogen van ca. 1,2 MW tot 5,0 MW (resp. 22 tot 90 kg H₂/h) van zowel alkaline, PEM- en SOEC-techniek. Doorgaans bestaan deze systemen uit twee tot drie zeecontainers waarin alle noodzakelijke apparatuur is geïnstalleerd zoals voor het leveren van gelijkstroom voor de stacks, het produceren en nabehandelen van waterstof, het verwerken van restwarmte via koelsystemen en de waterbehandeling.

Bij deze containerised units is een hoge mate van standaardisatie toegepast. De voordelen zijn o.a. het kunnen testen van de gehele installatie in de fabriek, eenvoudigere certificatie en schaalvoordelen bij het produceren van veel van dezelfde units. Bovendien draagt een containerised unit bij aan een relatief snelle installatie bij levering op de projectlocatie. De werkzaamheden on-site worden daardoor doorgaans beperkt tot onder meer het aansluiten van bekabeling, piping, installatie van bijvoorbeeld de drycooler en commissioning.

Het kunnen toepassen van de reststromen zuurstof en warmte is vaak nog geen standaard optie en vergt daarom een aanpassing van de scope waarvoor een meerprijs wordt gerekend. Een andere standaard leveringsoptie betreft de waterbehandeling. Deze waterbehandeling gaat normaal gesproken uit van het gebruik van drinkwaterkwaliteit; aan boord van de container unit is een waterbehandeling die uiteindelijk zuivert tot ultrapuur water.

B) *Skid-mounted systemen*

Bepaalde aanbieders kiezen voor het leveren van deelsystemen kant-en-klaar op skids. Sommige leveranciers leveren bijvoorbeeld alleen de stacks of een combinatie van stacks en de waterbehandeling of gasnabehandeling. Afnemers van de stacks zijn partijen die 'engineered' systemen bouwen. De ontwikkelaar van zo'n project dient zelf te zorgen voor de zgn. Balance of Plant (BoP) om een werkend systeem te bouwen. Naast de selectie van de BoP moet ook een gebouw worden ontworpen waar de verschillende installatie-onderdelen op een veilige manier gebruikt kunnen worden.

2.4.5. Compressoren

Bij de compressoren is een vergelijkbaar beeld zichtbaar als bij de electrolyserfabrikanten. Daarnaast zijn er ook aanbieders die een bredere scope hanteren en compressor inclusief de tubetrailer vulstations leveren:

- A) Turn-key systeem (compressoren en tubetrailer vulstation)
- B) Containerised systemen
- C) Skid-mounted systemen

A) Turn-key systeem (compressoren en tubetrailer vulstation)

De aanbieder levert een geheel systeem waarbij de scope ligt bij de aangeleverde waterstof tot en met het systeem dat wordt gebruikt voor het vullen van MEGC's. Daarbij wordt doorgaans ook het afreksysteem inbegrepen. Dit soort aanbieders hanteren een opzet die het meest lijkt op een EPC-aanpak (Engineering, Procurement and Construction).

Bij deze aanpak is de aanbieder verantwoordelijk voor het ontwerp, de inkoop van alle benodigde onderdelen en de volledige realisatie van het project tot en met de ingebruikname. Dit biedt voor de ontwikkelaar o.a. het voordeel van één aanspreekpunt en minimale coördinatie-inspanning. Vaak wordt hierbij ook ondersteuning geleverd bij het vergunningentraject en bij de integratie van het systeem in het hele waterstofsysteem.

B) Containerised systemen

Diverse aanbieders leveren kant-en-klare compressorsystemen. In opzet lijkt dit het meest op de aanpak zoals bij de complete electrolysersystemen. De compressoren worden geleverd in containerised units met daarin alle benodigde componenten vanaf stroomtoevoer, compressie en bijvoorbeeld een drycooler of koelmachine voor het beter beheersen van de procescondities.

Deze systemen bieden als voordeel dat deze min of meer plug-and-play geïnstalleerd kunnen worden. Hierdoor kunnen installatiekosten aanzienlijk worden gereduceerd. Bovendien maakt de standaardisatie het makkelijker om onderhoud en vervanging te plannen en kan de schaalbaarheid van het systeem eenvoudiger worden gerealiseerd door meerdere units parallel te schakelen.

C) Skid-mounted systemen

Er zijn ook aanbieders die alleen specifieke onderdelen leveren van een volledig systeem. Vaak gaat het dan om alleen de compressoren, aangeboden als skid-mounted units – op een frame gemonteerd en klaar voor integratie. Koelsystemen, besturing, behuizing en afvaltechniek ontbreken doorgaans.

Dit type aanbod is vooral geschikt voor partijen met eigen technische expertise, zoals systeemintegratoren of eindgebruikers met een engineeringafdeling. Het biedt flexibiliteit en ruimte voor maatwerk, maar vraagt meer coördinatie en verantwoordelijkheid voor integratie, veiligheid en prestaties. Daardoor kunnen implementatie en inbedrijfstelling meer tijd en afstemming vergen.

2.4.6. Stationaire opslag

Stationaire opslag van waterstof kan in grote lijnen worden onderverdeeld in twee categorieën, specifiek wanneer het gaat om de opslag van gasvormige waterstof;

- A) Losse waterstofcilinders/opslagtanks
- B) Containerised systemen

A) Losse waterstofcilinders/opslagtanks

Diverse fabrikanten bieden een grote variatie aan o.a. in materiaal, druk, volume en gewicht van cilinders en tanks. Overall gezien is er keuze uit stalen tanks of cilinders, glasvezelversterkte

cilinders of koolstofvezelcomposiet cilinders met drukniveaus tussen ca. 20 en 1.000 bar. Afhankelijk van de toepassing heeft elke optie zijn eigen voor- en nadelen.

B) Containerised systemen

Dit zijn complete, geïntegreerde opslagsystemen die waterstofcilinders bevatten binnen een container of behuizing. Dit maakt het systeem modulair en eenvoudig te integreren. Containerised systemen combineren vaak opslag, drukregulatie en veiligheidsvoorzieningen. Doordat het product gestandaardiseerd is zijn er verschillende voordelen rondom certificering, inspectie en onderhoud.

2.4.7. EPCM-partij

Het realiseren van een project van deze schaal met de gestelde doelen (o.a. budget, planning, kwaliteit en veiligheid) vereist tijdens zowel de voorbereidingsfase als de bouw- en ingebruiknamefase veel zorg en aandacht. Hiervoor is gekwalificeerd personeel met de juiste competenties essentieel. Daarnaast is het doel om een EPCM-partij in te zetten t.b.v. de inkoop van niet-directieleveringen. Hiervoor zijn diverse EPCM-partijen benaderd en beoordeeld op diverse criteria, zoals aanpak, referenties, duurzaamheid, ervaring met de realisatie van vergelijkbare waterstofprojecten, technische expertise, kwaliteitsborging, flexibiliteit, risicomangement, planning en veiligheidsbeleid.

Naast het bouwen en succesvol in gebruik nemen van de installaties door een EPCM-partij is het uitvoeren van periodiek onderhoud en storingsopvolging cruciaal tijdens de operationele fase. De voorkeur vanuit Circul8 is om de te selecteren EPCM-partij ook deze activiteiten uit te laten voeren. Hiervoor worden in de volgende fase van het project aanbiedingen uitgevraagd bij zowel de EPCM-aanbieders als separate onderhoudspartijen waarna een selectieprocedure zal volgen om daarmee de onderhoudspartij te kunnen selecteren.

2.4.8. Investeringsbegroting

De begroting voor de 1^e fase is tot stand gekomen op basis de resultaten uit de pre-engineering, het selectieproces van aanbieders van waterstofinstallaties en aanbieders van EPCM. Voor de uitbreiding tot 105 MWe is gewerkt op basis van aannames bij een grotere schaal aangevuld met kentallen en ervaringsgetallen.

Tabel 8 – Investeringsbegroting

Onderdeel	(1 ^e fase) 20 MWe	Cumulatief 105 MWe
Elektrolyzers en compressoren	€ 27.700	€ 96.800
Waterstofopslag, buffering en vulstation	€ 7.600	€ 7.600
Randapparatuur, automatisering, veiligheiden en spares	€ 1.200	€ 2.500
Stroomtoevoer (MS/LS), leidingen, kleppen & appendages	€ 5.900	€ 15.100
Civiele werkzaamheden	€ 4.000	€ 9.600
Ontwikkelkosten	€ 5.900	€ 8.000
EPC (proj. management en toeslagen)	€ 2.500	€ 4.000
Subtotaal	€ 54.800	€ 143.600
Demi water	€ 1.600	€ 9.600
Ammoniakfabriek excl. electrolyser	€ 0	€ 53.000
Salpeterzuurfabriek	€ 0	€ 20.000
Totaal	€ 56.400	€ 226.200

2.5. Werkpakket 4: business case

2.5.1. Vraagstelling

De kennis die is opgedaan in werkpakket 1, 2 en 3 dient als basis om de technische en financiële haalbaarheid van het HyDeer project te bepalen. Het draait hierbij om de volgende elementen:

- De business case van de waterstofproductie
- De levensvatbaarheid van aanvullende activiteiten: restwarmte, groene ammoniak, groene pekel
- De aankoppel mogelijkheden in de omgeving, de 'hydrogen valley'

Verantwoording

Werkpakket 4 is uitgevoerd door Circul8 en Allied Waters.

2.5.2. Businesscase

Uitgangspunten voor de kostprijzen

- Prijspeil 2025
- Afschrijftermijn 10 jaar
- WACC 7%
- Subsidies Niet ingerekend
- Stroomprijs 70 €/MWh
- Demi-water 10 €/m³

Kosten

In Tabel 10 staan de belangrijkste resultaten weergegeven t.a.v. investeringen, jaarlijkse kosten en de uiteindelijke kostprijs voor onderstaande systemen.

- Waterstofproductie via elektrolyse, compressie, opslag en tubetrailervulstation A)
- Waterstofproductie via elektrolyse B)
- Waterstofproductie via SOEC elektrolyzers (C)
- Ammoniakproductie (D)
- Salpeterzuurproductie, 60% oplossing (E)

Op basis van de investeringen en uitgangspunten is vervolgens de kostprijs van elk eindproduct bepaald. Zie daarvoor Tabel 10.

Tabel 9 – Investeringen

		A	B	C+D	E
Vermogen elektrolyzers	MWe	20	65	20	
Investering waterstofproductie	k€/j	55.000	68.000	19.500	
Investering ammoniakfabriek	k€			53.000	
Investering salpeterzuurfabriek	k€				20.000
<i>Totale investering</i>	<i>k€</i>	<i>55.000</i>	<i>68.000</i>	<i>72.500</i>	<i>20.000</i>

Tabel 10 – Kostprijs

		A	B	C + D	E
CAPEX	k€/j	7.800	9.700	10.300	2.800
OPEX incl. elektriciteit	k€/j	9.800	23.100	10.100	11.300
Som	k€/j	17.600	32.800	20.400	14.100
Productie	ton/j	1.600	5.250	13.400	24.700
Kostprijs ex works	€/ton			1.500	560
	€/kg	11,0	6,2		
Levering af		Vulstation tot 500 bar	Leiding < 16 bar		

Inkomsten

De inkomsten bestaan uit verschillende elementen:

- De verkoopprijs van waterstof, ammoniak resp. salpeterzuur
- Opbrengsten uit HBES resp. HWIs (toekomst: EREs)
- Opbrengsten uit subsidies, zoals OWE
- Opbrengsten uit netwerkdiensten voor zover van toepassing

Voor al deze groene producten geldt dat de afzetmarkt en daarmee de marktprijs zich nog moet ontwikkelen.

Businesscase

De investeringsraming voor de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen) is onderbouwd met offertes en is daarmee betrouwbaar. Voor de vervolgfase zijn globale investeringsramingen gemaakt die een hogere onzekerheid hebben, mede gezien het feit dat de realisatie in alle gevallen verder in de toekomst ligt. De precieze kostprijs in beide fasen hangt mede af van de financiële parameters voor het bepalen van de CAPEX, de uiteindelijke stroomprijs en verdere aanscherping van de kosten voor O&M.

De grootste onzekerheden – ook al in de komende jaren – zitten veeleer in de opbrengsten. Duidelijk blijkt dat voor de eerste fase (20 MWe) significante opbrengsten ad b-d nodig zijn om een rendabele businesscase te ontwikkelen, i.e. inkomsten die de kosten volledig dekken en een zekere marge genereren. Bij de opschaling (B en verder) wordt het beeld voor waterstof veel gunstiger in verband met de levering via leidingen i.p.v. een vulstation. Productie van ammoniak resp. salpeterzuur zou alleen uit kunnen als een premie wordt betaald voor de groene kleur.

2.5.3. Brede context

De vraag naar groene waterstof ontwikkelt zich vooralsnog traag. Dit heeft meerdere oorzaken, die voor een belangrijk deel door PBL (maart 2025) in kaart zijn gebracht. Vanzelfsprekend is een voldoende perspectief op afname van te produceren groene waterstof (volume resp. prijs) cruciaal voor Circul8. Daar ligt voor Circul8 nu de absolute prioriteit, voordat door kan worden geschakeld

in de realisatie van waterstofproductie. De overheid speelt hierbij een sleutelrol, en wel langs verschillende lijnen:

- Stimuleringsbeleid: diverse regelingen die in de afgelopen jaren door overheden zijn geïntroduceerd (EU, nationaal, regionaal) vormen een sterke stimulans voor groene waterstof
- Voeren van een consistent beleid: in dit kader is een buitengewoon slecht voorbeeld het afblazen/uitstellen van de regelgeving rond zero-emissie zones in binnensteden, dit op het allerlaatste moment eind 2024; verder is het de eis rond inmengen van RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) in 2025 verzacht tot 4% in 2030, dit tegen 42% volgens EU RED III (Kamerbrief, 2025)
- Verder doorvoeren van de systematiek van HBEs/HWIs (in de toekomst: EREs)
- Aanbestedingsbeleid: de overheid kan een sterke aanjagersrol vervullen door groene oplossingen (waaronder die met groene waterstof) te waarderen in aanbestedingen, zowel op nationaal, regionaal als lokaal niveau

Het bedrijf Circul8 stelt oplossingen rond groene energie en duurzaam vastgoed centraal. Over de hele linie is sprake van een synergie met het project HyDeer.

3. Conclusies en vervolg

Conclusie algemeen

Het project HyDeer heeft alles in zich om een parel van de toekomst te worden:

- Gebruik van overvloedige lokale groene elektriciteit, met dempend effect op congestie van het stroomnet
- Duurzame watervoorziening gebruik makend van het lokale natuurlijke systeem
- Realiseren van circulair gedachtegoed: nuttig gebruik van reststromen (pekeloplossing, ijzerslib) en restwarmte
- Een geschikte locatie, waar veel aandacht is besteed aan een goede landschappelijke inbedding
- Een vergunningsaanvraag in de eindfase

Circul8 beoogt de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen) z.s.m. te starten. Sterk bepalend voor het investeringsbesluit zijn voldoende perspectief van een afzetmarkt en een verbetering van de businesscase nodig. Overheidsbeleid speelt daarbij een cruciale rol.

Conclusies specifiek

Gekoppeld aan de doelstellingen zoals geformuleerd in par. 1.3 zijn de conclusies als volgt.

ONTWERP

Flexibilisering van het energiesysteem

Het benodigde vermogen (20 .. 105 MWe) voor de waterstofproductie speelt ruimte vrij op het lokale grid voor meer groene opwek. Alleen al door realisatie in de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen) vindt 3,5% minder curtailment (afschakelen van de opwek) plaats. Nuttig inzetten van de restwarmte levert in de eerste fase al een potentieel van $>1,5 \text{ Mm}^3$ aardgasbesparing in de industrie op.

Lokale watervoorziening

Een robuust ontwerp is gemaakt dat garant staat voor voldoende beschikbaarheid van ultrapuur water, gebruik makend van lokaal, brak oppervlaktewater. Het concept is aangepast op de vraag vanuit het waterschap om een eigen strategische reserve aan te leggen met het oog op perioden van extreme droogte.

Groene pekel

Bij het waterbehandelingsproces komt een geconcentreerde zoutoplossing (concentraat) vrij. Met de juiste methodiek laat deze stroom zich indikken tot een pekeloplossing die in beginsel geschikt is voor de gladheidsbestrijding. Aldus ontstaat een bijproduct met economische waarde.

Restwarmte

Voor de vrijkomende restwarmte is een nuttige bestemming gevonden, namelijk (1) indikken van het concentraat (zie boven) en (2) inzetten bij de industrie op het bedrijventerrein Oostervaart.

Opslag waterstof

Het ontwerp voorziet in lokale opslag van waterstof tot circa 9 t. Daarnaast is uitgewerkt hoe een deel van de waterstofproductie (equivalent aan 20 MWe electrolysevermogen) kan worden ingezet voor productie van ammoniak.

Ammoniak

Technisch zijn oplossingen gevonden voor de kleinschalige productie van ammoniak bij variabele belasting van de installatie. De casus is uitgewerkt voor een waterstofproductie op basis van 20 MWe electrolysevermogen. Een potentieel interessante optie is omzetting van de geproduceerde ammoniak naar salpeterzuur als nutriënt voor de tuinbouw.

Landschap

De waterstofproductie wordt landschappelijk optimaal ingebed. Langs de locatie van HyDeer wordt een groene bufferzone met een meanderende waterpartij aangelegd. Voor inbedding van een eventuele productie van ammoniak resp. salpeterzuur zijn geen plannen ontwikkeld (zie ook onder Businesscase).

FLEXIBILITEIT NAAR DE TOEKOMST

Gegeven de veelheid van variabelen moet het ontwerp voldoende flexibiliteit herbergen om toekomstbestendig te zijn. De verschillende onderdelen die in het kader van deze TSE-studie zijn onderzocht leveren zeer waardevolle informatie. In het ontwerp voor de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen) is het aantal externe afhankelijkheden geminimaliseerd. Levensvatbare opties kunnen hieraan nog wel worden toegevoegd, bijv. nuttig inzetten van restwarmte. De ervaringen uit de eerste fase vormen een basis voor de toekomstige opschaling. Voor zover dit in de toekomst zinvol en haalbaar is kunnen andere elementen worden ingebouwd, bijv. de productie van groene ammoniak en salpeterzuur. Deze studie heeft hiervoor een basis gelegd.

BUSINESSCASE

Waterstof

De inkomsten van waterstof zijn de resultante van de verkoopprijs en opbrengsten uit HBEs/HWIs (toekomst: EREs), subsidies en netwerkdiensten, zover van toepassing. Deze extra opbrengsten zijn noodzakelijk om tot een levensvatbare businesscase te komen.

Warmte

Voor bedrijven die het gehele jaar warmte nodig hebben en niet verder weg zijn dan ca 2 km ligt de kostprijs van teruggewonnen warmte substantieel onder de referentieprijs van warmte uit aardgas, als ook de warmteleiding wordt ingerekend. Ergo, valorisatie van de restwarmte is levensvatbaar, reeds in de eerste fase (20 MWe electrolysevermogen).

Groene pekel

Het restproduct groene pekel kan nuttig worden ingezet als natte component voor gladheidsbestrijding. Er zijn voorraadtanks in de regio, die het hele jaar door kunnen worden bijgevuld. Aldus vertegenwoordigt groene pekel een positieve waarde.

Ammoniak/salpeterzuur

Ammoniak resp. salpeterzuur zijn economisch niet aantrekkelijk als deze louter bij piekaanbod van waterstof worden geproduceerd. Ook bij continue productie kan e.e.a. alleen als een zeer zware premie wordt betaald voor de groene kleur.

•

Vervolgstappen

Na afronding van de impact-studie (medio 2025) ligt de focus bij de volgende activiteiten:

- Uitbouwen van het regionale netwerk o.a. via het FLHY-initiatief
- Verder ontwikkelen van het (lokale) afnamepotentieel voor groene waterstof
- Verbeteren van de businesscase via subsidies (EU, nationaal), EREs e.a.
- Besluitvorming en verder inrichten van de samenwerking Circulo – Essent
- Afronden van het vergunningstraject
- Disseminatie via de openbare samenvatting van deze rapportage en communicatie-activiteiten in het kader van verdere marktontwikkeling en -bewerking

Referenties

Provincie Flevoland, FLHY, Flevoland Hydrogen Valley – Een strategie voor een gedegen start van een waterstofeconomie in Flevoland. Impact Hydrogen (2023)

Van Wijk et al., Groene energie voor iedereen, hoe waterstof en elektriciteit onze toekomst dragen. Allied Waters (2023)

NEN-EN 16811-1, Uitrusting voor de winterdienst – Ontdooiingsmiddelen – Deel 1: Natrium chloride – Eisen en beproevingsmethoden (2016)

PBL, Groene waterstof: de praktische uitdagingen tussen droom en werkelijkheid (maart 2025)

Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Kamerbrief voortgang waterstofbeleid (juli 2025)