

UNIPER



Productie van groene waterstof op de Uniper Maasvlakte locatie

Onderzoeksrapport
groene waterstof



Vertegenwoordiger: Fred Hage
Studentbegeleider: Marjoleine van Dootinck
Uitvoerende student: Ruben Eelsing

Titel: Productie van groene waterstof op de Uniper Maasvlakte locatie

Ondertitel: Onderzoeksvoorstel Groene waterstof

Versie: 5.0

Cursusnaam: Thesis

Datum: 7-6-2021

Opdrachtgever: In opdracht van Uniper Maasvlakte

Vertegenwoordiger: Fred Hage

Opdrachtnemers: Ruben Eelsing

Studentnummer: 73917

Begeleidend docent: Marjoleine van Dootingh

Leerjaar: 4^e leerjaar

Opleiding: Engineering

Specialisatie: Energy & Proces Engineering

Instelling: HZ University of Applied Sciences

Afkortingenlijst

	AFKORTINGEN	BETEKENIS
	CCS	Carbon Capture & Storage
	MPP (1,2,3)	Maasvlakte Power Plant
STOFFEN	CH ₄	Methaan
	CO ₂	Koolstofdioxide
	CO	Koolstofmonoxide
	e	Elektron
	H ₂	Waterstof
	H ₂ O	Water
	Ni	Nikkel
	Ni and Ni Alloys	Nikkel, nikkel legeringen
	Ni, Ni – Co alloys	Nikkel, nikkel - Kobalt legeringen
	Ni, Fe, Co oxides	Nikkel, IJzer, Kobalt oxide
	Ni–Mo Alloys	Nikkel-Molybdeen legeringen
	Pt, Pt–Pd	Platinum, Palladium
	OH	Hydroxide
	RuO ₂ , IrO ₂	Rutheniumdioxide, Iridiumdioxide

Tabel 1 Afkortingen

Samenvatting

De Nederlandse regering zet stappen om Nederland te behoeden voor verdere klimaatveranderingen. Dit is vast gelegd in het akkoord van Parijs waarin staat dat de opwarming van de aarde beperkt moet worden. Dit houdt in dat opwekking van energie door middel van fossiele brandstoffen moet stoppen en de uitstoot van CO₂ te beperken. Uniper is een internationaal bedrijf dat zich bezig houdt met het produceren van energie. Zij maken op dit moment nog gebruik van verschillende elektriciteitscentrales waaronder de kolencentrale op de Maasvlakte in Rotterdam. Dit betekent voor Uniper dat de kolencentrale per 2030 gaat worden uitgefaseerd.

Het doel van dit onderzoek is om te achterhalen welke mogelijkheden er zijn voor het produceren van groene waterstof op de locatie Uniper Maasvlakte. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: Welke groene waterstof productie installatie is geschikt om een continue levering van 60000 Nm³/h te garanderen naar de afnemers via de Maasvlakte infrastructuur? Een groene waterstof productie installatie is een methode die gebruikt maakt van duurzame grondstoffen en hernieuwbare energie.

Om een antwoord te kunnen geven op de bovenstaande onderzoeksvraag zijn zeven verschillende productietechnologieën behandeld en getoetst in een multi criteria analyse. Hierin is naar voren gekomen dat Steam methane reforming, elektrolyse, kraken van ammoniak en het vergassen van biomassa het beste naar voren komen als groene productietechnologie voor Uniper Maasvlakte.

Al deze technologieën hebben ook nadelen en dat is voornamelijk de toevoer van duurzame grondstoffen of energie. Daarom wordt er aanbevolen om verschillende technologieën te combineren worden. Eventueel vervolg onderzoek zou kunnen uitwijzen dat andere onder ontwikkelde technologieën beter zijn in de toekomst.

Abstract

The Dutch government is taking steps to protect the Netherlands from further climate change. This is laid down in the Paris Agreement in which global warming must be limited. This means that energy generation by means of fossil fuels must stop and CO₂ emissions must be limited. Uniper is an international company engaged in the production of energy. At the moment, they do not yet use various power stations, including the coal-fired power station on the Maasvlakte in Rotterdam. For Uniper, this means that the coal-fired power station will be phased out by 2030.

The aim of this research is to find out what options there are for producing green hydrogen at the Uniper Maasvlakte location. The following research question has been formulated for this: Which green hydrogen production is suitable for guaranteeing a continuous supply of 60,000 Nm³ / h to customers via the Maasvlakte infrastructure? A green hydrogen production installation is a method that uses sustainable raw materials and renewable energy.

In order to answer the above research question, seven different production technologies were treated and tested in a multi-criteria analysis. It has emerged that Steam methane reforming, electrolysis, cracking of ammonia and the gasification of biomass come out best as green production technology for Uniper Maasvlakte.

All these technologies also have disadvantages and that is mainly the supply of renewable energy. Therefore it is recommended to combine different technologies. Possible further research could show that other under-developed technologies are better in the future.

INHOUD

1.	Inleiding.....	8
1.1	Organisatieomschrijving	9
1.2	Probleemstelling	9
1.3	Scope	10
1.4	Op te leveren producten	11
1.5	Leeswijzer	11
2.	Theoretisch kader.....	12
2.1	Begrip: Waterstof H ₂ Grijs / Blauw / Groen	12
2.2	Begrip: Waterstof infrastructuur	13
2.3	Theorie: Waterstof productietechnologieën	14
2.3.1	Productie van waterstof via elektrolyse	14
2.3.2	Pyrolyse en vergassing van biomassa	16
2.3.3	Vergassing van biomassa in superkritisch water	18
2.3.4	Fotokatalyse (Foto-elektrochemische cel, PEC)	18
2.3.5	Metal fuels voor de productie van waterstof.....	18
2.3.6	Fertilizer als waterstofdrager	19
2.3.7	Steam methane reforming	20
2.4	Begrip: Waterstof opslag	21
2.5	Begrip: Gedemineraliseerd water	23
3.	Methode.....	25
3.1	Methode per deelvraag	25
3.2	Validiteit en betrouwbaarheid.....	27
3.3	Kwaliteitsbewaking	28
4.	Resultaten	29
4.1	Eisen en randvoorwaarden voor productie en levering van groene waterstof	29
4.1.1	technische beschikbaarheid pijpleidingen	30
4.1.2	Nieuwe waterstofinfrastructuur	31
4.1.3	Regelgeving bijmengen waterstof	32
4.2	Geschikte groene waterstofproductietechnologieën	32
4.2.1	Multi criteria analyse groene productietechnologieën waterstof	33

4.2.2 Onderbouwing Multi criteria analyse groene productietechnologie	34
4.2.3 Methode 1	35
4.2.4 Methode 2	36
4.2.5 Methode 3	38
4.2.6 Methode 4	39
4.3 Waterstofopslag	40
4.3.1 Multi criteria analyse waterstof opslag methode	41
4.3.2 Zout cavernes	42
4.3.3 Vloeibaar opslaan	43
4.3.4 Opslag in de waterstofinfrastructuur	43
4.4 Opties voor duurzame grondstoffen en utilities voor de productie van groene waterstof	45
4.5 Invloedhebbende factoren op een continue levering van waterstof	47
5. Conclusie	49
6. Discussie	51
7. Aanbeveling	52
8. Nawoord	53
Bibliografie	54
Appendix I Overzicht centrales	60
Appendix II Vergelijking elektrolyse methode	61
Appendix III Metaalpoeders	62
Appendix IV Massabalans berekening SMR	63
Appendix V Kostenoverzicht SMR	66
Appendix VI Technische parameters elektrolyse en subsidie	67
Appendix VII Massa balans elektrolyzer	68
Appendix VIII Schematische tekening Haber-Bosch proces	70
Appendix IX Massabalans ammoniak kraken	71
Appendix X Zoutstructuren	72
Appendix XI Windparken offshore	73
Appendix XII Windsnelheden	74

1. INLEIDING

Uniper Benelux produceert en levert energie aan groot verbruikers. In Nederland heeft Uniper vier gascentrales in Den Haag, Leiden, Rotterdam en Rotterdam / Capelle aan den IJssel en een kolencentrale op de Maasvlakte. De Uniper kolencentrale bestond uit twee ketels gebouwd in 1973 en 1974, Maasvlakte Powerplant 1 en Maasvlakte Powerplant 2, met ieder een vermogen van 550 MW. Beide ketels zijn vervolgens gesloten in het jaar 2017. In 2008 is Uniper begonnen met de bouw van Maasvlakte Powerplant 3, die een vermogen heeft van +- 1100 MW, ter vervanging van MPP1 en MPP2. In 2015 is MPP3 in bedrijf genomen en draait nog tot heden. In 2008 is een besluit genomen om via Carbon Capture & Storage CO₂ af te vangen bij de MPP3 centrale, dit wordt ook wel het ROAD-project genoemd (RvO, 2020). De regelgeving voorziet echter op dat moment niet in ondergrondse opslag van CO₂ op de Noordzee waardoor het project geen doorgang vond.

De overheid heeft maatregelen genomen om verdere klimaatveranderingen tegen te gaan en dit is vastgelegd in het Nederlandse klimaatbeleid. Het Nederlandse klimaatbeleid is een onderdeel van het akkoord van Parijs om de uitstoot van broeikassen terug te dringen. Dit is een overeenkomst tussen de overheid en bedrijven in Nederland om de opwarming van de aarde te beperken. Het klimaatakkoord houdt in dat de CO₂ uitstoot verminderd moet worden met 49% in 2030 ten opzichte van 1990 (Rijksoverheid, 2021). Uniper streeft naar een hoger tempo en willen met al hun energieproductie klimaatneutraal zijn in 2035 en dit vraagt om investeringen in duurzame technologieën voor de opwekking van energie (Uniper, 2021). Een van de ontwikkelingen die Uniper Maasvlakte gaat door maken is de productie van groene waterstof. Groene waterstof is waterstof die geproduceerd wordt door middel van hernieuwbare energiebronnen en grondstoffen.

De Maasvlakte is een ideale locatie voor de aanlanding van groene stroom van de offshore windmolen parken door middel van het bestaande elektriciteitsnetwerk infrastructuur van TenneT. Hierdoor is het mogelijk om groene energie te gebruiken voor waterstofproductie. Uniper is een samenwerking aangegaan met de Port of Rotterdam en Gasunie voor het aanleggen van waterstoftransportinfrastructuur in de haven van Rotterdam. Daarnaast heeft Uniper de wens om op lange termijn een waterstof-hub te maken en eventueel waterstof te distribueren via een pijpleiding naar Duitsland.

1.1 ORGANISATIEOMSCHRIJVING

Uniper is van origine een Duits energiebedrijf en een afsplitsing van E.ON. Sinds 2016 heeft E.ON de kolen en gascentrales ondergebracht bij Uniper. Uniper heeft verschillende vestigingen in de Benelux. Zo produceren zij elektriciteit, warmte en stroom in Nederland en in de Benelux worden deze producten geleverd aan zakelijke klanten. Naast de productie van basislast elektriciteit levert Uniper op de Maasvlakte ook allerhande netondersteuning aan TenneT (Uniper, 2021). In Appendix 1 staat een overzicht van de verschillende productielocaties. Naast de vestigingen in de Benelux heeft Uniper ook nog vestigingen in Engeland, Zweden, Rusland, Hongarije en in Duitsland is het hoofdkantoor gevestigd. Uniper heeft meer dan 11500 werknemers in dienst die samen werken aan de productie en handelen in energie. Uniper heeft als visie om te streven naar een efficiëntere en schonere energievoorziening tegen een eerlijke prijs. Hieruit is dan ook de volgende missie geformuleerd: “Vandaag de dag is de missie in de energiesector het produceren van meer energie en minder CO₂.” Een van de grootste ontwikkelingen die Uniper doormaakt is het terug brengen van de uitstoot van CO₂ (Uniper, 2021).

1.2 PROBLEEMSTELLING

Sinds 11 december 2019 is er een nieuwe wet van kracht die een verbod legt op het gebruik van kolen bij de productie van elektriciteit (Wet verbod op kolen bij elektriciteitsproductie, 2019). Door deze wet moeten alle kolencentrales gesloten worden per 2030. Met deze maatregel moet de uitstoot van CO₂ verder gereduceerd worden.

Door het nieuwe aangenomen wetsvoorstel (Wet verbod op kolen bij elektriciteitsproductie, 2019) moet ook Uniper de kolencentrale op de Maasvlakte sluiten in 2030. Daarom moet Uniper zich ontwikkelen in nieuwe methoden voor het opwekken van energie om te kunnen concurreren in de energiesector. Een grote nieuwe ontwikkeling die zij willen doormaken op de Maasvlakte is het produceren van waterstof. De Uniper Maasvlakte is een locatie die zeer geschikt is voor de productie van waterstof op grote schaal. De belangrijkste reden hiervoor is de beschikbare ruimte, de beschikbaarheid van de bestaande infrastructuur, de toevoer van groene energie en omliggende waterstof gebruikende industrieën.

Waterstof is een belangrijke grondstof voor veel processen in de chemische en raffinage-industrie, waarbij een continue levering essentieel is. Daarom moet de leveringszekerheid en beschikbaarheid in lijn zijn met de eisen van de klant. Het klimaatakkoord specificeert dat waterstofproductie op basis van fossiele brandstoffen zoals aardgas niet meer gewenst is en daarvoor alternatieve methode voor de productie van groene en blauwe waterstof. De focus ligt op het onderzoeken van een industriële installatie die groene waterstof produceert met een capaciteit van 60000 Nm³/h. Om een antwoord te formuleren op het onderzoek dat wordt uitgevoerd, is de volgende hoofdvraag opgesteld:

“Welke groene waterstof productie installatie is geschikt om een continue levering van 60000 Nm³/h te garanderen naar de afnemers via de Maasvlakte infrastructuur?”

Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. Wat zijn de eisen en randvoorwaarden om groene waterstof te produceren en groene waterstof te leveren in de waterstofinfrastructuur?
2. Wat zijn de meest geschikte groene waterstofproductietechnologieën op basis van eisen van open toegang tot de waterstofinfrastructuur?
3. Wat is een geschikte manier van het opslaan van waterstof?
4. Welk apparatuur is geschikt om 60000 Nm³ / uur waterstof te leveren, zoals compressoren en ondersteunende diensten, behandelings- en leveringsapparatuur om groene waterstof (99,95 vol%) te leveren in de waterstofinfrastructuur met een druk van 40 barg?
5. Welke duurzame grondstoffen en utilities kunnen ingezet worden voor de productie van groene waterstof.
6. Hoeveel demin water is er nodig voor de productie van 60000 Nm³/h waterstof?
7. Welke invloeden zijn van belang voor Uniper Maasvlakte voor een continu levering van waterstof?
8. Wat zijn de kosten die nodig zijn voor het realiseren van groene waterstof productie installatie?

1.3 SCOPE

In deze paragraaf wordt de scope beschreven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen punten die wel worden uitgevoerd en welke punten niet worden uitgevoerd.

Punten die binnen dit onderzoek vallen:

- De haalbaarheidsstudie wordt uitgevoerd tot op het niveau van conceptueel design. Hieronder wordt verstaan van het opleveren van een overzicht met haalbare productietechnologieën van groene waterstof.
- De conversie van geproduceerd groen waterstof naar ammonia zal oppervlakkig worden behandeld.

Punten die buiten dit onderzoek vallen:

- De productie van blauwe waterstof zal niet worden behandeld, de resultaten van dit onderzoek kunnen daarvoor gebruikt worden.

- Er zal geen rekeningen gehouden worden met wetgeving en vergunningen omtrent waterstof.
- Er zal niet onderzoek uitgevoerd worden naar de elektriciteitsbehoefte van Uniper Maasvlakte m.b.t. een 100 MW elektrolyzer.
- Onderzoek naar het afvangen van CO₂.

1.4 OP TE LEVEREN PRODUCTEN

Er zal een haalbaarheidsonderzoek worden uitgebracht waarin de technische en economische haalbare opties voor de Maasvlakte waterstof productiefaciliteiten, injectie in de waterstofinfrastructuur en import van waterstof in diverse vormen dient te worden beschreven, waaronder:

- Definitie van belangrijke infrastructuurapparatuur en -technologieën
 - Energiebehoefte
 - Productietechnologieën
 - Aansluiting infrastructuur
 - Waterstofdruk en zuiverheid
- Korte procesbeschrijvingen inclusief eenvoudige PFD's
- Beschikbare hulpprogramma's en specificaties
- Plotplan
 - Fabrieksindeling
 - Ruimtevereisten en de beschikbaarheid daarvan
- Eindrapport haalbaarheidsonderzoek

1.5 LEESWIJZER

In hoofdstuk twee staat het theoretisch kader, hierin worden alle belangrijke begrippen, theorieën en modellen toegelicht. In hoofdstuk drie wordt de methode behandeld, hierin wordt per deelvraag beschreven hoe het antwoord gevonden is. De resultaten kunnen gevonden worden in hoofdstuk vier, hierin wordt gekeken naar verschillende productietechnologieën en andere belangrijke factoren. Vervolgens wordt in hoofdstuk vijf de conclusie beschreven en daarna in hoofdstuk zes de discussie. Hierna volgt hoofdstuk zeven met de aanbeveling en tot slot wordt in hoofdstuk 8 het nawoord weergegeven.

2. THEORETISCH KADER

In dit hoofdstuk worden alle belangrijke begrippen, definities, modellen en theorieën met betrekking tot de productie en transport van waterstof bij Uniper behandeld. Er wordt per begrip, definitie, model of theorie een toelichting gegeven om zo een sterke basis te creëren voor het onderzoek en de deelvragen te beantwoorden.

2.1 BEGRIP: WATERSTOF H₂ GRIJS / BLAUW / GROEN

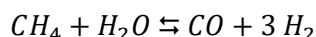
Waterstof is een element dat het meeste voorkomt in het universum, circa 90% van de atomen zijn waterstof. H-atomen zijn een cruciaal onderdeel voor de vorming van alle organische stoffen in het universum. De meest voorkomende stof die het element H₂ bevat is water (H₂O) (Gasunie, 2019). Voor de productie van waterstof is energie nodig, dit kan op veel verschillende manieren gedaan worden. Voor de productie kan gebruikt gemaakt worden van hernieuwbare en niet hernieuwbare energievormen. De verschillende kleuren waterstof zeggen alleen iets over de grondstof en energiebron die gebruikt wordt bij de productie van waterstof.

In Nederland wordt tegenwoordig grootschalig ingezet op ontwikkelingen van waterstof. Zo zijn er projecten bezig in de Eemshaven in Groningen, North Sea Port in Zeeland en op de Maasvlakte in Rotterdam. Al deze locaties hebben veel potentie voor de productie van waterstof vanwege omliggende industrieën. Ook beschikken al deze plekken over aansluitingen met groene windenergie van zee (RVO, 2021).

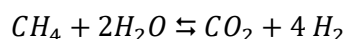
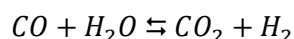
Een studie die uitgevoerd is door (Abad & Dodds, 2020) heeft aangetoond dat het woord 'groene' waterstof verschillende definities kan hebben voor toekomstige normen voor hernieuwbare waterstof. Een van de eerste vermeldingen van groene waterstofeconomie in Europa, is de verklaring van 2007 (Gurmai, Wijkman, Prodi, Guidoni, & Turmes, 2007) voor het opzetten van een groene waterstofeconomie in Europa. Hoewel er verschillende technische standaarden zijn voor waterstof (ISO 14687 "Hydrogen Fuel Quality" (iso, 2019), ISO/TC 197 "Hydrogen Technologies" (iso.org, 2021) ; IEC TC/105 "Fuel Cells" (iec, 2021); CEN/CLC/SFEM/WG "Hydrogen" (Weidner, Honselaar, & Cebolla, 2016)), zijn precieze definities voor het woord 'groen' verschillend. Zo kunnen regeringen zelf verschillende interpretaties hebben omtrent groene waterstof. De definitie die in dit onderzoek wordt toegepast voor groene waterstof, is waterstof die geproduceerd wordt door middel van hernieuwbare bronnen en met duurzame energie.

Steam Methane Reforming

De meeste H₂ die op het moment geproduceerd wordt in de wereld is *grijze waterstof*. Dit wordt gedaan via het productieproces SMR wat staat voor Steam Methane Reforming. Hierbij wordt hogedruk stoom samengevoegd met methaan tot de volgende reactievergelijking:



De bovenstaande vergelijking is de eerste stap in de vorming van waterstof en is een endotherm proces, dat wilt zeggen dat energie nodig is om het proces te laten verlopen. Het kraken van aardgas vindt plaats bij een temperatuur van ongeveer 850° C. De vervolg stap in dit proces is de water-gas shift reactie. Hierbij reageert CO uit het syngas samen met stoom om vervolgens meer waterstof te krijgen zoals in de volgende vergelijking (Chen I.-T. , 2010):

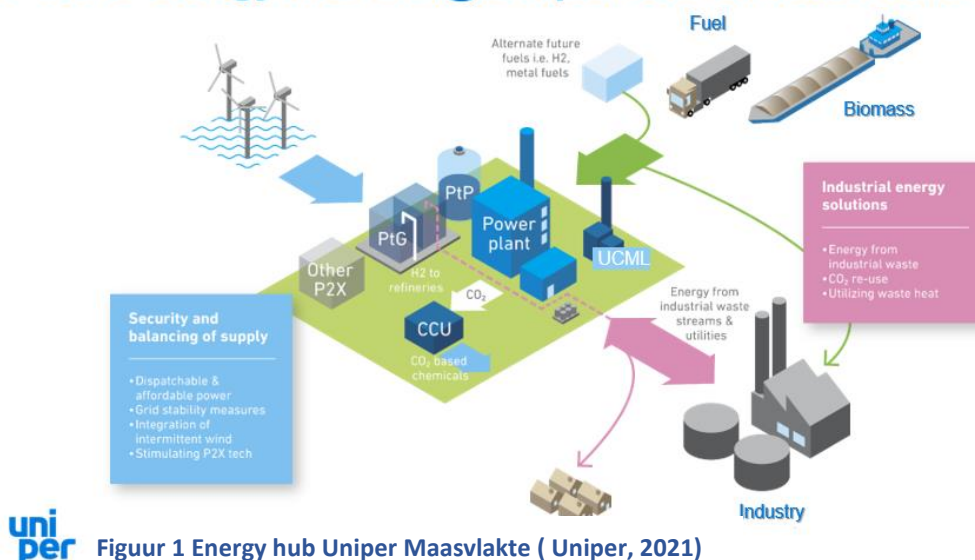


In Nederland wordt waterstof nu nog op de zelfde manier geproduceerd en zoals te zien is in de bovenstaande vergelijking ontstaat hierbij CO₂. Het verschil tussen *blauwe en grijze waterstof*, is dat bij *blauwe waterstof* 80 tot 90% van de CO₂ wordt afgevangen. Beter bekend als Carbon Capture & Storage (CCS). Hierbij wordt de opgevangen CO₂ uit het proces opgeslagen in lege gasvelden.

2.2 BEGRIP: WATERSTOF INFRASTRUCTUUR

Het woord ‘infrastructuur’ is een Engels woord voor ruggengraat en samen met waterstof verwijst dit naar de waterstofinfrastructuur. Op dit moment is Air Liquide de enige leverancier van waterstof in Nederland en hebben een private waterstofinfrastructuur van 1000 km tussen Rotterdam, Zeeland, België en Noord Frankrijk. In de omgeving Rotterdam heeft Air Products een waterstofnetwerk van ongeveer 60 km. Een studie van DNV GL (DNV GL, 2017) heeft aangetoond dat leidingen van het hogedrukaardgasnet geschikt zijn om tot 100% waterstof te transporteren.

Future energy hub 2.0 @ Uniper site of Maasvlakte



Momenteel vindt het transport van waterstof van gasvormige en vloeibare waterstof plaats per vrachtwagen, echter grootschalige toepassingen kunnen alleen met pijpleidingen plaats vinden. Daarom is een pijpleidinginfrastructuur van groot belang om de kosten te reduceren bij langjarig gebruik. Welke leidingen beschikbaar zullen zijn in de nabije toekomst, zal neer komen op de vraag en aanbod van aardgas (Gigler & Weeda, 2018). Om de bestaande infrastructuur goed te kunnen gebruiken, zijn verschillende waterstofproductie-hubs nodig (knooppunten). Als er op grote schaal waterstof geproduceerd gaat worden, zullen de verschillende waterstofstromen die daarbij komen kijken verdeeld moeten worden via de hub, zie figuur 1.

2.3 THEORIE: WATERSTOF PRODUCTIETECHNOLOGIEËN

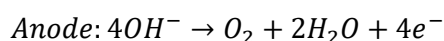
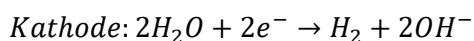
In deze paragraaf worden verschillende productietechnologieën behandeld, de focus hierbij ligt voornamelijk bij groene waterstof productietechnologieën.

2.3.1 PRODUCTIE VAN WATERSTOF VIA ELEKTROLYSE

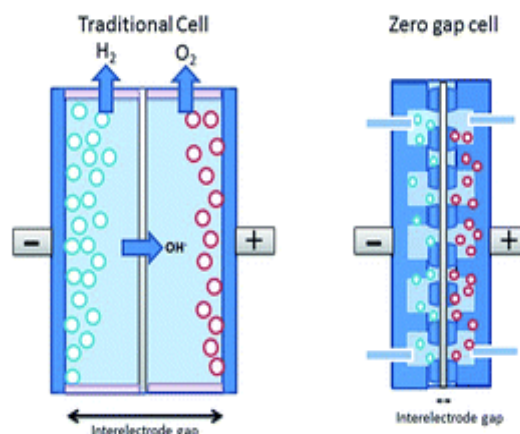
Hieronder worden vier verschillende productietechnologieën besproken die op basis van elektrolyse werken. In Appendix II staat een overzicht van de karakteristieken van de verschillende technologieën.

Alkaline elektrolyse

Alkaline elektrolyse (AEL) is een technologie die ontwikkeld is tot megawatt schaal. Het principe van alkaline elektrolyse is zeer simpel. Doordat er een elektrische stroom door het water gaat, ontstaan de twee producten uit het water, namelijk zuurstof en waterstof. Dit geeft de volgende reactievergelijking:



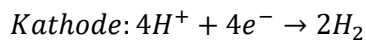
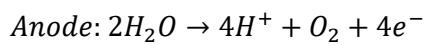
De AEL-cel bestaat uit twee elektrodes die ondergedompeld is in een sterk geconcentreerde alkalische elektrolyt. De twee elektroden worden in een zero-gap formatie opgesteld zoals te zien is in figuur 2. Dit is een formatie waarbij poreuze elektroden ruimtelijk gesepareerd zijn door een dun diafragma waardoor de gassen gescheiden worden. Het diafragma is permeabel voor OH^- ionen en water (Miller, et al., 2020).



Figuur 2 Verschil tussen een traditionele en een zero-gap cell (Phillips, 2021)

Proton exchange membrane

Proton exchange membrane (PEM) water electrolyse is een nieuwe technologie die zeer goede prestaties en stabiliteit vertoont. Hierbij wordt een vast zuur membraan (perfluorosulfonzuur-membraan) gebruikt in plaats van een vloeibaar membraan. Het zuurmembraan vervoert H^+ kationen van de anode naar de kathode en separeert de waterstof en zuurstof die geproduceerd worden tijdens de reactie.

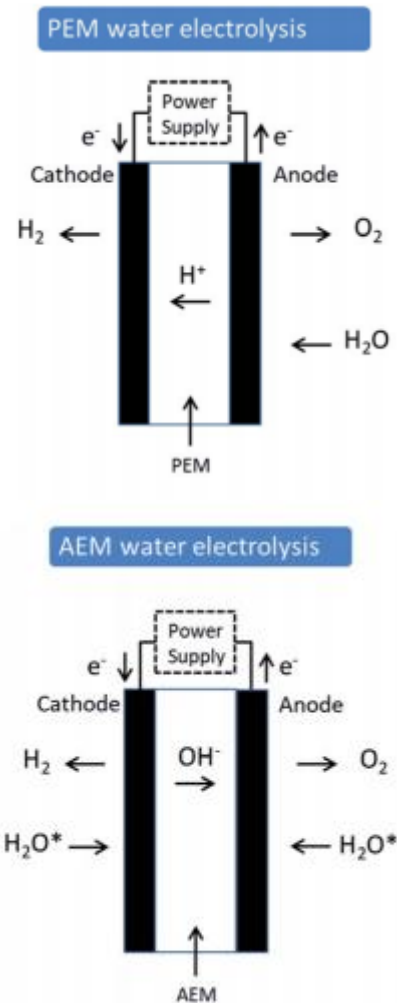
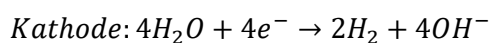
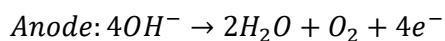


Door de lage pH waarde en het hoge metaaloppervlakte in de pT-elektrodes is de dynamiek van de waterstofreactie veel hoger dan bij alkalische elektrolyse. PEM-elektrolyse is ook veiliger doordat een bijtende elektrolyt ontbreekt. Nog een voordeel bij het gebruik van deze elektrolyse is dat de kathode onder hoge druk kan functioneren terwijl de anode onder atmosferische druk kan blijven werken (Miller, et al., 2020).

Anion exchange membrane (AEM)

Een AEM elektrolyzer werkt bijna het zelfde als een normale alkaline elektrolyse cel, het enige verschil hier tussen is het conventionele diafragma. Die wordt vervangen door een anion exchange membraan in alkaline water elektrolyse. De alkalische omgeving wordt bezorgd door positief geladen functionele groepen op de hoofd polymeerketen.

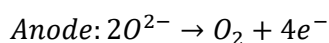
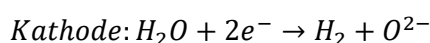
AEM technologie is een zeer stabiele productietechnologie van waterstof, alleen is de voortgang van onderzoek nog op laboratorium niveau en moet het nog grote ontwikkelingen doormaken. Voor AEM geldt de volgende reactievergelijking (Miller, et al., 2020):



Figuur 4 AEM water elektrolyse cel (Miller, et al., 2020)

Solid oxide elektrolyse cell

Een solid oxide elektrolyse cell (SOEC) is een cel die bestaat uit een vaste structuur van 3 lagen. Dit is een poreuze kathode, elektrolyt en een poreuze anode. Stoom wordt aangevoerd aan de kathodezijde en wordt vervolgens gereduceerd tot waterstof en oxide ionen. De vrij gekomen oxide ionen migreren door de elektrolyt naar de anode waar ze samenkomen met andere oxide ionen om zuurstofmoleculen te vormen. Net als de AEM technologie is SOEC een veel belovende technologie, alleen is deze ook nog maar ontwikkeld op laboratorium niveau. De volgende reactievergelijking is van belang voor SOEC:



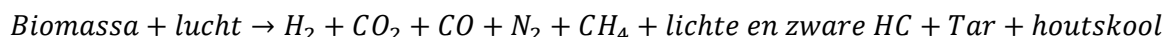
Tabel 2 laat een overzicht zien van de verschillende elektrolyse technologieën, hierin is te zien dat AEL en PEM ontwikkeld zijn tot MW-schaal. De andere technologieën vergen verdere ontwikkelingen voordat deze concurrerend kunnen zijn.

Tabel 2 Elektrolyse methode (TKI, 2021)

<i>Elektrolyse technologieën</i>	<i>Afkorting</i>	<i>Werkings temperatuur</i>	<i>Vermogen</i>
Alkaline elektrolyse	AEL	60 – 70°C	1 – 5 MW
Proton Exchange Membrane	PEM	60 – 70°C	1 – 5 MW
Anion Exchange Membrane	AEM	60 – 70°C	-
Solid Oxide elektrolyse cell	SOEC	600 – 800°C	-

2.3.2 PYROLYSE EN VERGASSING VAN BIOMASSA

Pyrolyse van biomassa is een proces waarbij de biomassa omgezet wordt in een gas, vloeistof of vaste brandstof (Parthasarathy, 2013). Tijdens het proces ondergaat de biomassa verschillende stappen, zo wordt het eerst gedroogd, daarna vindt er pyrolyse plaats en vervolgens de reductie- en verbrandingsreacties. De pyrolyse verwijdert alle vluchtige stoffen die vrijkomen zoals CO, CO₂ of andere koolwaterstoffen. In de laatste stap wordt door middel van partiële verbranding gasvormige producten geproduceerd. Dit levert de volgende reactievergelijking:



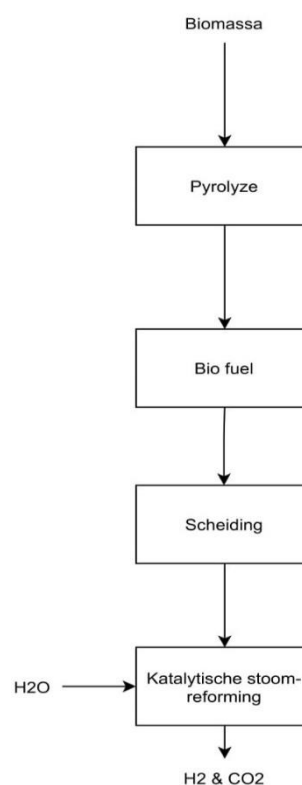
Het bovenstaande proces kan worden verbeterd door gebruik te maken van stoom bij de vergassing. (Nipattumakul, Ahmed, Kerdsuwan, & Gupta, 2010) beschrijven in hun studie dat de opbrengst van waterstof bij stoomvergassing drie maal groter is dan vergassing met lucht bij pyrolyse. In principe is deze manier van waterstofproductie hetzelfde als dat bij SMR, alleen is de voeding anders. Dit geeft de volgende reactievergelijking:



Biomassa bestaat bijna alleen maar uit cellulose, hemicellulose en lignine. De samenstelling hiervan varieert enorm. Deze componenten in de biomassa spelen een grote rol bij de afbraak, zo levert een hoog gehalte van cellulose en lignine meer gasvormige producten en dit resulteert weer in meer waterstof uit biomassa.

De opbrengst van waterstof uit biomassa hangt af van de samenstelling en het alkaligehalte. De grootte van het materiaal dat gepyrolyseerd wordt is ook van belang. Zo zorgen kleinere deeltjes voor een groter oppervlakte per massa-eenheid. Hierdoor wordt de warmteoverdracht tussen deeltjes beter en neemt de efficiëntie ook toe. De verbeterde vergassingsreactie draagt vervolgens weer bij aan een betere H₂- en CO-productie. In figuur 6 staat een schematische afbeelding die het pyrolyse proces beschrijft.

Ook speelt het vochtgehalte in biomassa een grote factor in de productie van waterstof. Biomassa bevat doorgaans een hoog percentage vocht (naast koolhydraten en suikers). De aanwezigheid van een hoog vochtgehalte in de biomassa is weer nadelig voor de temperatuur in het pyrolyse proces. Daarom vereisen veel biomassavergassingstechnologieën dat de biomassa wordt gedroogd om het vochtgehalte te verlagen voordat deze in het pyrolyse proces wordt gevoerd (GSTC, 2021).



Figuur 5 Blokschema thermochemische productie waterstof (Pyrolyse)

2.3.3 VERGASSING VAN BIOMASSA IN SUPERKRITISCH WATER

Vergassing van biomassa in superkritisch water is een thermochemische methode voor de productie van waterstof. Onder normale omstandigheden heeft water 3 fases; vast, vloeibaar en gas. Als de druk en temperatuur verhoogd worden tot het punt dat water super kritisch wordt (22,1 MPa en 374 °C), dan is er geen onderscheid meer tussen de gasfase en de vloeistoffase. Water is een oxidatiemiddel en kan reageren met de koolstofatomen uit de biomassa. Zuurstof moleculen worden dan overgebracht van het water naar de biomassa om CO₂ en H₂ te vormen. Door het gebruik van superkritisch water bij deze methode, verliest het zijn polaire karakter. Hierdoor kunnen organische stoffen veel beter oplossen en zouten zeer slecht (Gerard, 2019).

2.3.4 FOTOKATALYSE (FOTO-ELEKTROCHEMISCHE CEL, PEC)

In een foto-katalytisch water splitsingssysteem worden halfgeleidende foto-katalytische poeders in water gedispergeerd. Hierbij wordt een vaste stof in een vloeistof verdeeld met een verschil in dichtheid. Bij de belichting van deze stof door middel van een geschikte lichtbron wordt waterstof geproduceerd. Om de productie van waterstof via foto-katalytische watersplitsing te verbeteren, moeten foto-katalysatoren met hoge kristalliniteit en deeltjesgrootte gebruikt worden. De hoge kristalliniteit zorgt er voor dat er minder structurele defecten zijn en kleine deeltjesgrootte zal naar verwachting de diffusielengte van de foto-gegenereerde ladingdragers naar de reactieplaatsen verkorten (Hakki, AlSalka, Mendive, Ubogui, & dos Santos Claro, 2018).

2.3.5 METAL FUELS VOOR DE PRODUCTIE VAN WATERSTOF

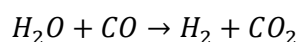
Waterstof kan ook gemaakt worden door een reactie van een metaal met water. Hierbij ontstaat niet alleen waterstof, maar ook grote hoeveelheden warmte. De metalen die hiervoor gebruikt kunnen worden zijn veel voorkomende metalen zoals aluminium, magnesium en silicium. De metaalpoeders als brandstof zijn veilig op te slaan en te vervoeren. Ook zullen naar verwachting metaalpoeders een oneindig lange houdbaarheid vertonen als deze goed beschermd worden tegen vocht. Naast de producten waterstof en thermische energie uit de metaal-waterreactie, ontstaan er ook bijproducten zoals metaaloxiden en hydroxiden. Deze zijn in meeste gevallen chemisch inert en zijn makkelijk op te vangen.

Uit een eerdere studie (Yavor, Goroshin, Bergthorson, & Frost, 2021) is gebleken dat aluminiumpoeder de grootste hoeveelheid H₂ per massa-eenheid produceert over het temperatuurbereik. Na aluminiumpoeder komt magnesiumpoeder als tweede optie naar voren als het gaat om de productie van waterstof. Mangaanpoeder dat bij hoge temperaturen (120 en 150° C) de grootste hoeveelheid waterstof per volume-eenheid produceert, laat zien dat er een kritische energiedrempel is. Deze test is uitgevoerd in een batchreactor met 16 verschillende commerciële industriële metaalpoeders en met een watertemperatuur van 80 tot 200° C. Mangaanpoeder samen

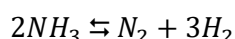
met aluminium- en magnesiumpoeder zijn uit de test naar voren gekomen als zeer aantrekkelijke poeders voor het dienen van brandstof in waterstofproductie. In de Appendix III staat een overzicht van de verschillende gebruikte metaalpoeders.

2.3.6 FERTILIZER ALS WATERSTOFDRAGER

Yara is een bedrijf dat gespecialiseerd is in de productie van mest op basis van ammoniak. Ammoniak is een molecuul dat bestaat uit 3 waterstof atomen en 1 stikstofatoom. Voor de productie van mest maakt Yara gebruik van het Haber-Bosch proces. Het Haber-Bosch proces was een van de meest succesvolle en best bestudeerde reacties en is vernoemd naar Fritz Haber (1868–1934) en Carl Bosch (1874–1940) (Chen, Perathoner, Ampelli, & Centi, 2019) . Het Haber-Bosch proces is een proces dat ammoniak vormt uit waterstof en stikstof onder hoge druk en temperatuur. De stikstof (N) die nodig is in dit proces wordt uit de lucht gehaald. De waterstof is afkomstig van water dat reageert met koolstofmonoxide tot koolstofdioxide en waterstof, zie onderstaande reactievergelijking:



Het Haber-Bosch proces kan ook omgedraaid worden waarbij ammoniak afbreekt in waterstof en stikstof. Dit wordt ook wel het omgekeerde Haber-Bosch proces genoemd. Wat deze manier zo aantrekkelijk maakt voor de vorming van waterstof, is de afwezigheid van CO₂ en ammoniak is een grondstof die via een duurzaam proces gemaakt kan worden. Verder heeft ammoniak een hogere energiedichtheid dan waterstof en maakt het een goede waterstofdrager. Het ontleden van ammoniak in waterstof is een endotherme reactie, wat betekent dat het energie nodig heeft om de reactie te laten verlopen, zie onderstaande reactievergelijking (Chein, 2009):



Tabel 3 Vergelijking waterstof met ammoniak (Yara, 2020)

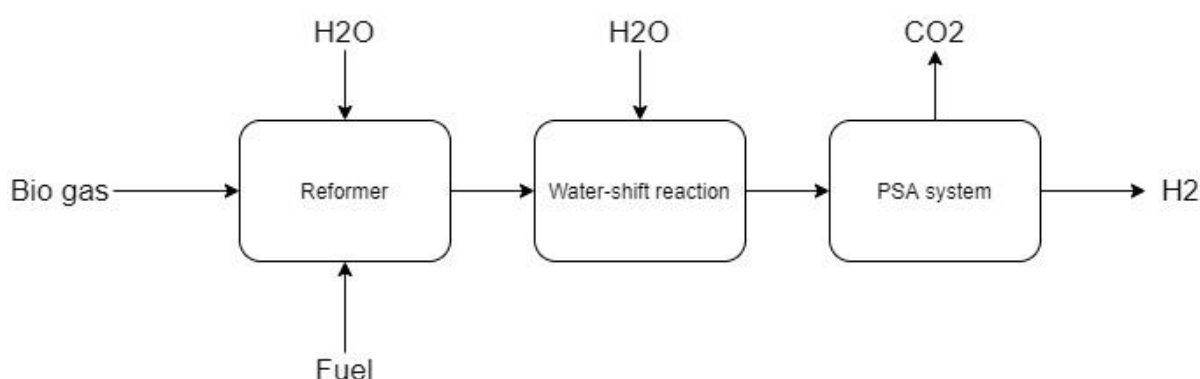
	AMMONIAK	WATERSTOF
TEMPERATUUR VOOR VLOEIBARE FASE	-33 °C	-253 °C
NODIGE ENERGIE PER KG	5.22 kJ/kg	33.33 kJ/kg
BRANDBAAR	Brandbaar	Erg brandbaar
GIFTIG	Ja	Nee

2.3.7 STEAM METHANE REFORMING

Zoals eerder beschreven maakt SMR gebruik van aardgas en stoom waarbij het bij een temperatuur van 850 graden Celsius en 25 bar H_2 en CO_2 produceert. Blauwe waterstof wilt zeggen dat de CO_2 die vrijkomt bij SMR wordt afgevangen. Nieuwe regulaties van de overheid zorgen er voor dat bedrijven steeds minder CO_2 uitstoot mogen hebben of CO_2 neutraal moeten zijn. Een oplossing voor de CO_2 die vrijkomt is het opslaan in lege gasvelden (TKI, 2021).

Conventionele technologieën voor de productie van waterstof zijn voornamelijk gebaseerd op fossiele brandstoffen. Om te zorgen dat het productieproces CO_2 neutraal wordt, moet er wat veranderen in feedstock. Een studie die is uitgevoerd door (Susmozas, Iribarren, & Dufour, 2013) blijkt dat de gebruikelijke feedstock die nodig is voor SMR, ook vervangen kan worden door een 'groene' feedstock.

De groene feedstock is biomassa die omgezet wordt in bio gas onder bepaalde omstandigheden. Bio gas is een gasvormige brandstof die bestaat uit koolmonoxide, kooldioxide, waterstof, methaan, andere koolwaterstoffen, water en sporen van houtskool en teer. Wanneer als vergassingsmiddel zuivere stoom wordt gebruikt, ontstaat een syngas met een hoog waterstofgehalte. Voor dit proces is een externe energiebron nodig om aan de warmtevraag te voldoen. Deze warmte wordt geleverd door een andere reactor waarbij kool als brandstof geldt. Dit wordt ook wel indirecte vergassing genoemd. Vanwege het hoge waterstofgehalte in het geproduceerde syngas en de hernieuwbare aard van biomassa, kan SMR met biomassa een geschikte kandidaat zijn voor duurzame productie van waterstof. Waterstof productie door middel van een groene feedstock met SMR kan worden beschouwd als CO_2 neutraal. Dit kan worden gecombineerd met CCS waarbij de CO_2 afgevangen en opgeslagen wordt. Dit levert een negatieve CO_2 balans op, wat weer gunstig kan zijn voor andere processen.



Figuur 6 Schematische blokdiagram SMR

In de reformer reageert bio gas met stoom onder een druk van 3 tot 25 bar. Dit proces gebeurt in de nabijheid van een katalysator om vervolgens te reageren tot waterstof, koolstofmonoxide en koolstofdioxide. Vervolgens gaat het in de volgende stap de water-gas shift reactie aan. Hierbij reageert koolstofmonoxide met stoom om nog meer waterstof en koolstofdioxide te produceren. In de laatste stap, het PSA systeem, worden koolstofdioxide en andere onzuiverheden gefilterd.

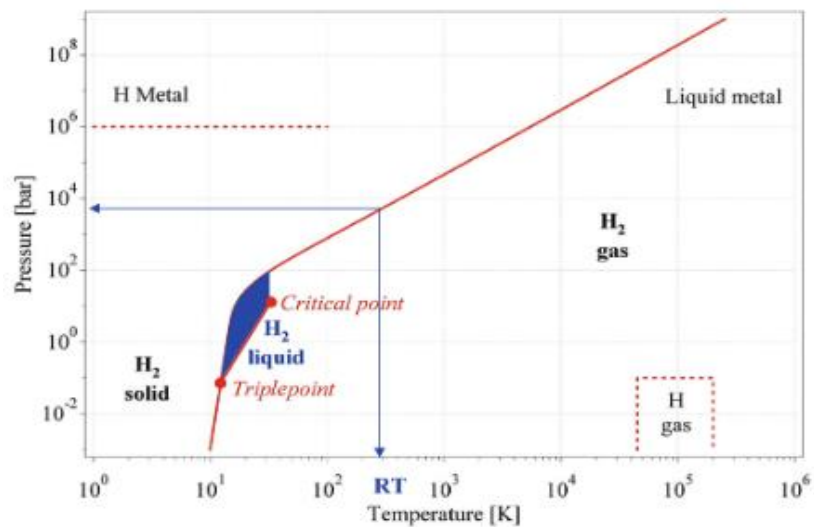
2.4 BEGRIP: WATERSTOF OPSLAG

Vorige studies hebben aangetoond dat er verschillende manieren zijn voor het opslaan van waterstof. Een manier voor het opslaan van waterstof die in dit onderzoek als eerste beschreven wordt, is het opslaan van waterstof in zoutcavernes. Dit kan op grote schaal worden toegepast en maakt het daarom een zeer geschikte methode (Ozarslan, 2012). In Noord-Nederland in de provincie Groningen is de ondergrond zeer geschikt voor het benutten van de zoutcavernes. Gasunie is van plan om hier een grootschalige waterstofopslag in te realiseren. Deze cavernes worden dan gebruikt voor het bufferen van waterstof om het verschil in vraag en aanbod op te vangen. Ook is het mogelijk om uit te breiden naar 4 extra cavernes voor een totale opslagcapaciteit van 20kton waterstof (Gasunie, 2021).

Een auto die op waterstof rijdt, heeft een gemiddelde tankinhoud van 5 tot 8 kilo en kan tot 100 kilometer per kilogram waterstof rijden (Green planet, 2021). Met een opslag van ongeveer 230000 m³ zou dit betekenen dat er genoeg capaciteit is om in een keer 2,5 tot 4 miljoen auto's vol te tanken. De ECN doet onderzoek naar de inzet van duurzame energie en hebben een schatting gemaakt naar de theoretische potentiële behoefte van waterstof in Nederland. In de schatting worden alle huidige en toekomstige ontwikkelingen op het gebied van waterstof meegenomen. Dit zou neer komen op een maximum potentieel van 710 PJ of 66 miljard m³ waterstof (Noort, 2017). Uit een studie die is gedaan door GasUnie blijkt dat de huidige vraag en aanbod 175 PJ aan waterstof is (GasUnie, 2019). Dit zou neer komen op een factor vier groter dan de huidige vraag.

Ten tweede kan opslaan van waterstof gedaan worden in hoge druk cilinders. Hierin wordt de waterstof opgeslagen in gasvorm. Tegenwoordig zijn hoge druk gascilinders verder ontwikkeld en kunnen drukken van 50 tot 70 MPa aan (NPROXX, 2019). Nieuwe lichtgewicht composiet cilinders die worden ontwikkeld kunnen nog grotere drukken aan. Hierbij kan waterstof een dichtheid van 36 kg/m³ bereiken wat ongeveer de helft is als dat van de vloeibare vorm. De ideale eigenschappen voor deze tanks zijn een hoge treksterkte, lage dichtheid en reageren niet met waterstof (Zuttel, 2003).

Ten derde kan waterstof opgeslagen worden in een vloeibare staat in cryogene tanks. Vloeibare waterstof wordt opgeslagen bij 21,2 K bij een atmosferische druk. Om waterstof vloeibaar te maken, wordt gebruik gemaakt van het Joule-Thomson effect. In de natuurkunde is dit een beschrijving voor een temperatuursverandering van een vloeistof of een gas die een smoorklep wordt geforceerd.



Figuur 7 schematische tekening van waterstof. Vloeibaar waterstof bestaat alleen tussen het "triplepoint" en het kritische punt (Zuttel, 2003).

Het gas wordt eerst gecomprimeerd en vervolgens gekoeld in een warmtewisselaar. Daarna gaat het door een smoorklep waarbij het Joule-Thomson expansie ondergaat. Echter warmt waterstof op bij expansie door een smoorklep bij kamertemperatuur. Om waterstof bij expansie te laten afkoelen, moet de temperatuur lager zijn dan de inversietemperatuur van 202 K. Dit kan gedaan worden door het voor te koelen met vloeibaar stikstof. De inversietemperatuur is een kritische temperatuur grens waaronder een niet-ideaal gas dat uitzet bij constante enthalpie, een daling in temperatuur ondergaat en een stijging boven de kritische temperatuur. Een gedeelte van het waterstofgas wordt omgezet in vloeistof en dat wordt gescheiden van de stroom. Het overige afgekoelde gas gaat terug naar de warmtewisselaar waarbij het proces herhaald wordt (Zuttel, 2003).

Ten vierde kan waterstof worden opgeslagen door middel van metaalhydride. Waterstof reageert hierbij met overgangsmetalen en legeringen bij verhoogde temperaturen om hydriden te vormen. De reactie tussen waterstof en metalen gaat het beste bij elektropositieve elementen omdat deze het meest reactief zijn. Aangezien de entropieverandering grotendeels gelijk is aan de verandering van moleculair waterstofgas naar vaste waterstof, is dit de standaard entropie van waterstof ($S_0 = 130 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) en daarom is $\Delta S_f = -130 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ voor alle metaal-waterstof systemen. De enthalpie karakteriseert de stabiliteit van deze metaal-waterstofverbinding. Om een evenwichtsdruck van 1 bar bij 300 K te bereiken, moet $\Delta H = 39,2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ zijn. De entropie voor de

formatie van metaalhydride leidt tot een exotherme reactie ($\Delta Q = T \cdot \Delta S$). Dezelfde warmte moet weer geleverd worden aan de metaalhydride om de waterstof te ontbinden (Zuttel, 2003).

Als laatst kan waterstof worden opgeslagen in complexe samenstelling van metalen. Het belangrijkste verschil tussen de complexe en metallische hydriden is de overgang naar een ionische of covalente verbinding bij waterstofabsorptie. De waterstof in de complexe hydriden bevindt zich vaak in de hoeken van een tetraëder met B of Al in het midden. De negatieve lading van het anion, $[BH_4]^-$ en $[AlH_4]^-$, wordt gecompenseerd door een kation, bijvoorbeeld Li of Na (Zuttel, 2003).

Tabel 4 Opslagmethodes (De dichtheid ρ , de werktemperatuur T in °C en druk in bar) (Zuttel, 2003)

Opslag methode waterstof	ρ_v [kg / m ³]	T [°C]	P [bar]
Hoge druk gas cilinders	<40	25	800
Vloeibare waterstof in cryogene tanks	70.8	-252	1
Waterstofopslag d.m.v. metaalhydride	150	25	1
Waterstofopslag d.m.v. complexe samenstellingen	150	>100	1

2.5 BEGRIP: GEDEMINERALISEERD WATER

Gedemineraliseerd water is water waaruit bijna alle zouten verwijderd zijn. Voor de locatie Uniper Maasvlakte zijn er twee manieren voor het verkrijgen van gedemineraliseerd water. Het inkopen van demiwater bij Evides en zelf demiwater produceren. Het zelfstandig produceren van demiwater gebeurt nu nog niet bij Uniper, maar als onderzoek uitwijst dat de kwaliteit van het demiwater van Evides niet goed genoeg is, kan Uniper er voor kiezen om het zelf te produceren. De specificaties van het demiwater dat geleverd wordt door Evides kan worden terug gevonden in tabel 6.

Een van de meest voorkomende technieken voor demiwaterproductie is reverse osmose (RO). Osmose is een proces dat voorkomt in de natuur bij planten, maar dit proces, kan ook omgedraaid worden en heet reverse osmose (RO) (Samco, 2021). Bij dit proces wordt water via een pomp door een kunstmatig membraan heen gedrukt waarbij bijna alle zouten achter blijven. Het rendement van dit proces wordt bepaald door de grootte, de polariteit en lading van de te filteren stoffen. Als voorstap voor RO kan ultra filtratie (UF) worden toegepast. Dit is een stap waarbij zeer kleine deeltjes gescheiden worden op grootte. Als laatste stap kunnen ionen verwijderd worden uit het water door middel van een ionenwisselaar. Deze methode haalt alle ongewenste ionen uit het water.

Al deze verschillende stappen dragen bij aan het zuiveren van water tot gedemineraliseerd water, maar door ze te combineren wordt de kwaliteit van het gedemineraliseerd water nog beter. Voor de elektrolyzer is demiwater nodig waarbij bijna 100% van de zouten en mineralen gefiltreerd zijn. De gefiltreerde stoffen kunnen van grote invloed zijn op de werking en rendement van de elektrolyzer en moeten dus verwijderd worden voor een optimale werking.

Tabel 5 Waterkwaliteit demiwater Evides (Uniper, 2021)

Parameter	Normal value	Max. value	Remark
Conductivity	< 0.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$	<0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Ordinary conductivity after de-aeration. Conductivity as a result of gases dissolved (Co ₂ , etc.) will not be taken into consideration. Indication: Max. CO ₂ content (saturation) will be +- 0.55 mg/l at a conductivity of +- 0.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at 25°C/1 atm. This value will only be reached after many days of full exposure to the open air, which does not happen anywhere in the system.
Silica (SiO ₂)	< 25 ppb as SiO ₂	<50 ppb as SiO ₂	
Iron	< 20 ppb	Incidentally higher than normal, but < 50 ppb	(expected < 5 ppb)
Copper	< 5 ppb	Incidentally higher than normal, but <50	(expected < 2 ppb)
TOC	< 50 ppb TOC	< 100 ppb TOC	
Na	< 5 ppb	< 10 ppb	

3. METHODE

Het doel van dit rapport is het opleveren van een haalbaarheidsstudie voor de mogelijkheden van waterstof voor de locatie Uniper Maasvlakte. Bij deze studie wordt voornamelijk kwalitatief onderzoek toegepast. De data die verzameld is, komt voornamelijk uit deskresearch en fieldresearch. Voor deskresearch zal voornamelijk literatuuronderzoek gedaan worden. De fieldresearch die uitgevoerd wordt, zal in de vorm van interviews zijn met de belanghebbende partijen rondom waterstof in het havengebied van Rotterdam. De betrouwbaarheid wordt samen met de validiteit van de gegevens behandeld in paragraaf 3.2. Hierin wordt verdere toelichtingen gegeven over hoe de informatie gevalideerd is.

3.1 METHODE PER DEELVRAAG

Om een goed overzicht te creëren van welke methoden gebruikt zijn, wordt per deelvraag gekeken welke methoden toegepast is. Hieronder is elke deelvraag onderverdeeld en toegelicht welk onderzoek uitgevoerd gaat worden, hoe het is uitgevoerd en waarom het is uitgevoerd op de betreffende manier.

Deelvraag 1: Eisen en randvoorwaarden voor productie en levering van groene waterstof

Om de eerste deelvraag compleet te beantwoorden moet eerst gekeken worden naar wat er precies staat. Zo is eerst literatuuronderzoek gedaan naar 'groene waterstof'. Het antwoord op deelvraag 1 zal beantwoord worden in het theoretisch kader. Voor het vinden van de benodigde parameters en processen wordt onderzoek uitgevoerd via Google Scholar. Hierbij wordt gekeken wat naar wat de vereisten zijn van waterstof om het in te brengen in de bestaande waterstofinfrastructuur. Voor verdere informatie worden ook experts binnen Uniper op het gebied van waterstof geraadpleegd en wordt de gegevens informatie vergeleken met het literatuuronderzoek om het zo te valideren. De gegevens die gevonden zijn, worden verwerkt in tabellen of grafieken in Excel.

Deelvraag 2: Geschikte groene waterstofproductietechnologieën

Voor het beantwoorden van de tweede deelvraag zal eerst literatuuronderzoek uitgevoerd worden naar welke productietechnologieën geschikt zijn voor de productie van groene waterstof. De gevonden informatie zal vervolgens in een tabel weergegeven worden en vervolgens aan elkaar gewogen worden via een Multi-criteria tabel. Dit is een manier waarbij gekeken wordt naar verschillende criteria die leiden naar een besluit. Het voordeel van deze methode is dat de meest potentie-hebbende methode voor het produceren van groene waterstof naar voren komt voor de locatie Uniper Maasvlakte. Ook zullen experts binnen Uniper geraadpleegd worden om de gevonden informatie te valideren.

Deelvraag 3: *Waterstofopslag*

Het antwoord op de derde deelvraag zal gevonden worden door eerst literatuuronderzoek uit te voeren naar de verschillende methoden voor het opslaan van waterstof. Om een compleet beeld te creëren zullen ook interviews worden afgenomen met de Port of Rotterdam (PoR) om toekomstplannen duidelijk te krijgen voor de opslag in de omgeving. De gegevens die voortkomen uit het literatuuronderzoek en interviews zullen gecombineerd worden om tot een antwoord te komen voor wat de meest geschikte manier is voor het opslaan van waterstof. Dit zal vervolgens verwerkt worden in een Multi-criteria tabel en besproken worden met een expert binnen Uniper om de gevonden data te valideren. Een Multi-criteria tabel is een evaluatiemethode om tussen diverse opties een rationele keuze te maken (Dean, 2020).

Deelvraag 4: *Geschikte apparaten voor levering in de waterstofinfrastructuur*

Voor het beantwoorden van deelvraag 4 zal eerst gekeken worden naar welke apparaten nodig zijn om groene waterstof te leveren in de waterstofinfrastructuur. De benodigde informatie zal verkregen worden via interviews bij bedrijven die op het moment waterstof leveren in de infrastructuur. Om een antwoord te vinden dat meer diepgang biedt, zal de input van experts omtrent deze deelvraag ook verwerkt worden. Ook zal er een massa en energiebalans worden opgesteld om een overzicht te krijgen in welke stromen er allemaal plaats vinden. Deze zal vervolgens aan de hand van (Sinnot & Towler, 2009) op pagina 86 geverifieerd worden. Op basis van de berekende specificaties zal er een keuze gemaakt worden van de leverancier van de benodigde apparaten.

Deelvraag 5: *Opties voor duurzame grondstoffen en utilities voor de productie van groene waterstof*

Om hierbij tot een antwoord te komen, zal er gekeken worden naar welke mogelijkheden er zijn tot groene stroomvoorziening bij Uniper Maasvlakte. Deze locatie beschikt over een TenneT-station op het terrein zelf en informatie hierover zal moeten uitwijzen of deze voldoet. Verder zullen alle opties tot groene stroomvoorzieningen in kaart gebracht moeten worden. Vervolgens zal onderzoek uitwijzen of de benodigde capaciteit die nodig is voor de productie van groene waterstof, verkregen kan worden via de inkomende elektrische aansluiting.

Deelvraag 6: *Benodigde capaciteit demin water*

Onderzoek naar de elektrolyzer zal moeten uitwijzen hoeveel waterstof er geproduceerd kan worden en hoeveel demiwater het nodig heeft voor de productie. Hiervoor zullen verschillende fabrikanten van industriële elektrolyzers geraadpleegd worden om tot een concrete capaciteitsvereiste te komen. Ook zal onderzoek naar de huidige demiwater-infrastructuur van Evides moeten aantonen wat de maximale toevoer van demiwater is.

Binnen Uniper kan de quality and performance Process Engineer gecontacteerd worden voor vragen omtrent Evides.

Deelvraag 7: Welke invloeden zijn van belang voor een continu levering van waterstof?

Om hierbij tot een antwoord te komen, zal eerst duidelijk moeten zijn welke infrastructuren er liggen. Deze informatie is beschikbaar binnen het waterstofteam van Uniper. Vervolgens zal per systeem gekeken worden wat de invloed daarvan is. Als toevoeging hierop zullen interviews verdere informatie verschaffen over de invloed van de verschillende infrastructuren. De gevonden informatie zal dan door middel van een overzicht aan elkaar gekoppeld worden om bepaalde verbanden zichtbaar te maken. Daarna zal de gevonden besproken worden met een expert binnen Uniper om de gegevens te valideren.

Deelvraag 8: De kosten voor een groene waterstof productie-installatie

Voor het beantwoorden van deze vraag worden verschillende literatuurbronnen geraadpleegd. Deze zullen afkomstig zijn van Google Scholar of bedrijven die namens de overheid een studie hebben uitgevoerd. Met name bedrijven zoals DNV GL, TKI en het Ministerie van Economische zaken zullen hierin een antwoord bieden. Vervolgens wordt de informatie die gevonden is uit verschillende bronnen vergeleken worden met elkaar. De gegevens die hieruit voortkomen worden verwerkt in een tabel bij de betreffende paragraaf.

3.2 VALIDITEIT EN BETROUWBAARHEID

Om de betrouwbaarheid van het onderzoek te waarborgen worden verschillende wetenschappelijke bronnen geraadpleegd. De wetenschappelijke bronnen zijn vervolgens weer vergeleken met elkaar om te kijken of er overeenkomsten zijn. Om in kaart te brengen wat de belangen zijn van de verschillende bedrijven in het haven gebied Rotterdam, worden interviews afgenomen om hun belangen omtrent waterstof te peilen.

Formules die gebruikt gaan worden met betrekking tot de berekening van specificaties zullen afkomstig zijn uit het boek Sinnott & Towler Chemical Engineering & Design (Sinnott & Towler, 2009). Alle berekeningen en gegevens zullen verwerkt worden in Excel. Stofeigenschappen die gebruikt worden in dit onderzoek en in de berekeningen, zijn afkomstig vanuit de "Engineering Toolbox (The Engineering Toolbox, 2021)", deze waardes worden vervolgens via een andere bron weer vergeleken om ze te valideren. Vervolgens kunnen de gegevens als ze overeenkomen worden gebruikt in Excel.

Om het economisch gedeelte van de haalbaarheidsstudie te realiseren, zal gebruikt worden gemaakt van Sinnott & Towler hoofdstuk 6 (Sinnott & Towler, 2009). Doordat verschillende bronnen worden gebruikt voor het bepalen van een kosten en baten analyse kan de nauwkeurigheid van de analyse afwijken.

3.3 KWALITEITSBEWAKING

Om de kwaliteit van de op te leveren documenten te garanderen, zal er voldaan worden aan de volgende punten:

- Documentnaam_Auteur_EPE_2021_dd-mm-yyyy_versienummer.
- De op te leveren documenten zal worden getypt in Word en de volgende regels zijn daarop van toepassing:
 - Calibri als hoofdtekst met een lettergrootte van 11
 - Regelaafstand van 1.15
 - Nummering van hoofdstukken en pagina's
- Berekeningen en grafieken worden gemaakt in Excel.
- Het tekenen van technische tekeningen zal gedaan worden door middel van AutoCAD.
- Alle opgeleverde producten zullen voldoen aan de volgende NEN normen:
 - NEN-EN-ISO 128: Technische tekeningen – Algemene principes voor de weergave
 - NEN-EN-ISO 7200: Technische productdocumentatie – Gegevens in titelblokken
 - NEN-EN-ISO 10209: Technische productdocumentatie – Woordenlijst – Termen betreffende technische tekeningen
 - NEN-EN-ISO 10628-1: Diagrammen voor de chemische en petrochemische industrie – Deel 1: Specificatie van diagrammen.
 - NEN-EN-ISO 14617: Grafische symbolen voor schema's
 - NEN-EN-ISO 80000-1: Grootheden en eenheden – Deel 1 Algemeen
 - NEN-ISO 15519: Specificatie voor schema's voor procesindustrie.
 - NEN-EN-IEC 62424:2009: Representatie van procesregeltechniek – Verzoeken in P&I diagrammen en gegevensuitwisseling tussen P&ID en PCE-CAE gereedschappen
- Alle informatie komt van wetenschappelijke bronnen zoals Google Scholar en wetenschappelijke artikelen.
- Alle bronnen zullen via APA6 genoteerd worden en zijn terug te vinden in de bibliografie op het eind.
- Alle afbeeldingen en tabellen beschikken over een bijschrift met nummering.

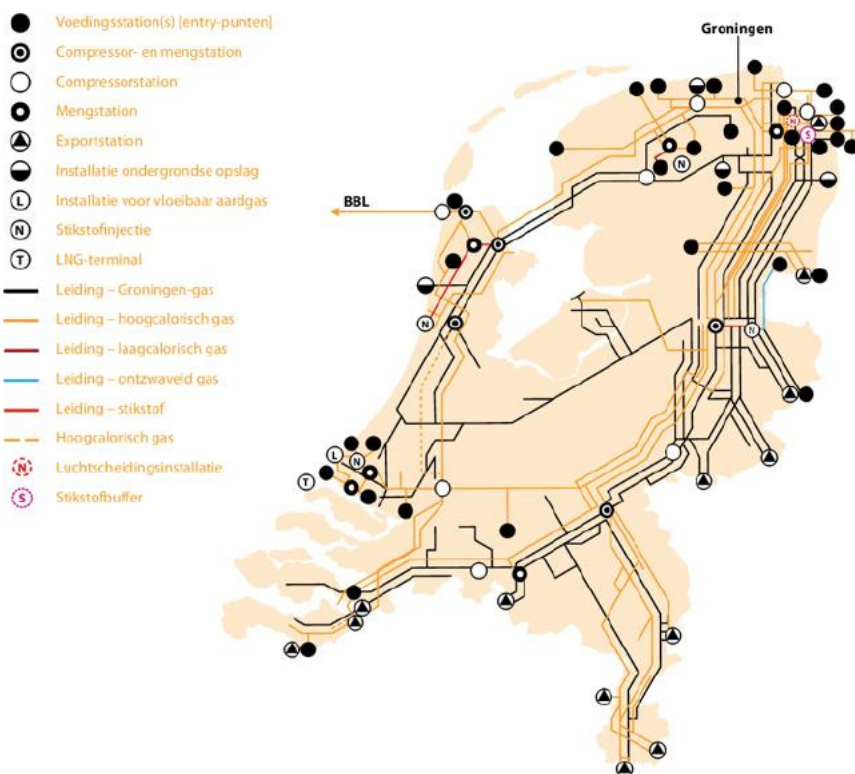
4. RESULTATEN

In hoofdstuk vier worden de resultaten van het onderzoek behandeld, dit is vervolgens per deelvraag opgeschreven. De resultaten zullen afkomstig zijn van literatuuronderzoek en interviews met experts. De resultaten die naar voren komen uit het onderzoek zullen een antwoord formuleren op de meest geschikte groene waterstofproductie installatie.

4.1 EISEN EN RANDVOORWAARDEN VOOR PRODUCTIE EN LEVERING VAN GROENE WATERSTOF

In Nederland zijn er twee mogelijkheden voor het realiseren van een waterstofinfrastructuur. Het bestaande aardgasnetwerk kan worden omgebouwd voor het transport van waterstof of een nieuw waterstofnetwerk kan worden aangelegd. Het transport van waterstof wordt door belanghebbende partijen gezien als een van de belangrijkste uitdagingen (Cappellen van, Croezen, & Rooijers, 2018). Nog een grote uitdaging is de hoeveelheid energie die waterstof draagt in verhouding met aardgas, dit kan leiden tot eventuele problemen in capaciteit en geschiktheid van de bestaande infrastructuur. Figuur 8 laat een overzicht zien met alle verschillende leidingen in Nederland.

Het gasnet van Nederland



Figuur 8 Gasnet Nederland
(Net Beheer, 2021)

Uit een scan die is uitgevoerd door GasUnie Transport Services (GTS), blijkt dat de pijpleidingen geschikt moet zijn om 15 GW te vervoeren in de toekomst. Het winnen van aardgas in Groningen zal ook geleidelijk afnemen en in combinatie met een afname in de gasvraag van 1% per jaar, zal dit leiden tot meer ruimte voor duurzame stoffen zoals waterstof (DNV GL, 2017).

4.1.1 TECHNISCHE BESCHIKBAARHEID PIJPLEIDINGEN

Waterstof heeft andere eigenschappen dan aardgas en beïnvloedt daardoor de gaspijpleidingen en andere componenten in de infrastructuur. Belangrijke overwegingen zijn de integriteit van de pijpleidingen, andere componenten, regelgeving, veiligheid en capaciteit van het netwerk. In een rapport van DNV GL is aangetoond dat er maar enkele beperkingen zijn met betrekking tot het transporteren van waterstof door het huidige gasnetwerk. Onderzoek in het NaturalHy-project heeft aangetoond dat waterstof zal leiden tot meer vermoeidheid van de leidingen. De vermoeidheid van het materiaal is sterk gerelateerd aan de drukveranderingen in de buizen, ook kan het transport van waterstof leiden tot waterstofverbrossing. Om interne corrosie tegen te gaan is het zaak om schoon en droog gas (waterdauwpunt beneden 60%) te transporteren (DNV GL, 2017).

De vermoeiing van pijpleidingen hangt af van:

- Druk(wisselingen)
- Constructie
- Materiaaltype

De andere componenten in het gasnet zijn compressie- en reductiestation, metingstations en plastic componenten. Op dit moment worden twee types compressoren gebruikt in het Nederlandse gasnet, dit zijn zuiger- en centrifugaal compressoren. Om te voldoen aan de zelfde energievraag, is een hogere volume stroom nodig. Centrifugaal compressoren zijn niet ontworpen om een hogere waterstof stroom aan te kunnen. Voor zuig compressoren is het onduidelijk of deze geschikt zullen zijn voor de compressie van waterstof. Specifiek onderzoek is nodig om te kijken of alle benodigde componenten voldoen voor het transporteren van waterstof en anders is vervanging nodig. Al het meetapparatuur zal naar verwachting vervangen moeten worden vanwege de aard van het gas. De kunststoffen in het gasnet zoals o-ringen en pakkingen in bijvoorbeeld kleppen zullen leiden tot hogere gasverliezen als waterstof wordt toegepast.

Een andere kritische parameter is de capaciteit van het bestaande net wanneer waterstof wordt getransporteerd. Waterstof heeft een energie-inhoud van 12 MJ / Nm³, H-gas 40 MJ / Nm³ en 35 MJ / Nm³ voor L-gas. Hierdoor ontstaat de behoefte aan een drie keer grotere volumestroom. De dichtheid van waterstof is een factor 9 kleiner dan dat van aardgas (Cappellen van, Croezen, & Rooijers, 2018).

De drukval is de kritisch ontwerpparameter voor het gasnetwerk, dit komt doordat de drukval bepalend is voor de benodigde buisdiameter en compressorenvermogen. DNV GL concludeert dat 80% van het H-gas en 98% van de L-gas energiecapaciteit kan worden vervoerd met waterstof met hetzelfde volume. Dit vereist wel een drie keer hogere snelheid in het gasnet, wat kan resulteren in meer trilling gerelateerde problemen en erosie van de pijpleidingen. Dit kan vervolgens resulteren in meer drukval en dus een te lage druk in het uiteinde van de leiding. Voor het bepalen van deze effecten is vooraf onderzoek en monitoring nodig. De gassnelheid in het netwerk is momenteel gelimiteerd door regelgeving tot 20 m/s, voor het transport van waterstof is een snelheid van 30 m/s nodig om te voldoen aan dezelfde energiecapaciteit. Een wijziging in de regelgeving is daarom nodig (DNV GL, 2017).

De laatste afweging is de relatieve veiligheid van waterstof in vergelijking met aardgas. Doordat waterstof zeer ontvlambaar is, vereist het speciaal onderhoud en meer voorzorg. Mogelijke lekkages van een gas en het brandgevaar ervan leiden tot een risicogebied rond een pijpleiding. In tegenstelling tot aardgas is waterstof geclassificeerd als chemische stof en daarom gelden er andere regels dan voor leidingen met aardgas. Er is weinig informatie bekend over de gevaren van waterstof binnen en buiten risicogebieden, breukeffecten en stralingseffecten. Het verschil in classificatie kan tot problemen leiden als aardgas vervangen gaat worden door waterstof. Echter kan verder onderzoek uitwijzen dat de veiligheidsproblemen van waterstof vergelijkbaar zijn met dat van aardgas. Daarom er dient aanvullend onderzoek uitgevoerd te worden en is nieuwe regelgeving nodig met betrekking tot de veiligheid van waterstof in pijpleidingen. Anders kan waterstof niet getransporteerd worden in pijpleidingen rondom woon- en leefgebieden (DNV GL, 2017).

4.1.2 NIEUWE WATERSTOFINFRASTRUCTUUR

Het andere alternatief is het aanleggen van een waterstofnetwerk. Op dit moment zijn er twee waterstofnetwerken in gebruik, die van Air Liquide en Air Products. Dit netwerk verbindt producenten en afnemers van waterstof. Air Liquide exploiteert met een totaal van 1000 km het grootste Europese netwerk in Frankrijk, België en de regio Rotterdam. Air Products exploiteert een 140 km lang pijpleidingsysteem in de regio Rotterdam. Een begin stap voor grootschalige implementatie zou kunnen zijn dat het pijpleidingennetwerk van Air Liquide functioneert als de start van de waterstofinfrastructuur. Echter is het de vraag of Air Liquide hierin geïnteresseerd zou zijn. Een nieuw waterstofnetwerk is technisch haalbaar en kan economisch haalbaar zijn. Alleen zal het een enorme investering nodig hebben wanneer blijkt dat het huidige gasnetwerk niet geschikt is voor waterstof. Verder onderzoek zal moeten uitwijzen wat de economische haalbaarheid is van deze optie (Cappellen van, Croezen, & Rooijers, 2018).

4.1.3 REGELGEVING BIJMENGEN WATERSTOF

Regelgeving beperkt de ontwikkelingen voor het transporteren van waterstof in het huidige gasnetwerk. Zo is er in de wet vastgelegd dat de kwaliteit van het geleverde gas minder of gelijk aan 0,02 mol% waterstof mag bevatten (Overheid, 2014). Ook dienen er keuringseisen en regelgeving opgesteld te worden voor nieuwe componenten in het gasnetwerk die op de markt komen. Zo bestaan er nog geen keuringseisen voor gasmeters voor een combinatie van aardgas en waterstof of alleen 100% waterstof. Het is wel mogelijk om bepaalde gastoestellen aanvullend te laten testen, waarna het toestel geschikt is voor 20% bijmenging van waterstof (Kiwa, 2020).

4.2 GESCHIKTE GROENE WATERSTOFPRODUCTIETECHNOLOGIEËN

De verschillende productietechnologieën voor groene waterstof die eerder beschreven zijn in het theoretisch kader worden hieronder door middel van een multi criteria analyse beoordeeld in samenwerking met de opdrachtgever. De multi criteria analyse is weergegeven in tabel 6 en de vier hoogst scorende technologieën worden verder uitgewerkt.

4.2.1 MULTI CRITERIA ANALYSE GROENE PRODUCTIETECHNOLOGIEËN WATERSTOF

Tabel 6 MCA productietechnologie waterstof

Opties groene productietechnologieën waterstof	Commercieel beschikbaar (1-5)	volwassenheid technologie TLR (1-9)	Onderhoud (1-5)	Veiligheid (1-5)	investering (1-5)	Milieueffecten emissie (1-5)	Totaal
Weging (1 t/m 5)	5	2	2	5	4	2	
<i>Steam methane reforming</i>	5	9	3	5	5	1	96
<i>Alkaline elektrolyse</i>	5	9	3	5	2	5	92
<i>Proton exchange membraan</i>	5	7	2	5	2	5	86
<i>Ammoniak als waterstofdrager</i>	3	6	4	3	3	4	70
<i>Pyrolyse en vergassing van biomassa</i>	3	4	5	3	3	4	68
<i>Vergassing biomassa in superkritisch water</i>	3	4	5	4	3	4	73
<i>Solid oxide elektrolyse cel</i>	1	2	5	4	2	5	57
<i>Anion exchange membraan</i>	1	2	5	4	2	5	57
<i>Fotokatalyse (PEC)</i>	1	2	5	5	2	5	62
<i>Metal fuels</i>	1	2	5	3	2	5	52

4.2.2 ONDERBOUWING MULTI CRITERIA ANALYSE GROENE PRODUCTIETECHNOLOGIE

Tabel 7 laat een tabel zien met de verschillende criteria die gebruikt worden in de multi criteria analyse. Hier zijn vervolgens weegfactoren aan toegewezen. De multi criteria analyse is terug te vinden onder het kopje 'MCA Productietechnologie waterstof' in de bijgevoegde map.

Tabel 7 criteria MCA

Criteria	Weging factor	Toelichting
Commercieel beschikbaar	5	De technologie die gebruikt gaat worden, moet commercieel beschikbaar zijn. De reden voor een hoge weging is omdat de technologie wel beschikbaar moet zijn voor industriële toepassingen.
Volwassenheid technologie	2	Veel van de technologieën die naar voren gekomen in het onderzoek, zijn onder ontwikkeld en vergen verder onderzoek. In de analyse wordt gebruik gemaakt van een schaal van 1 tot en met 9, dit is de 'technology readiness level'. Dit wilt zeggen hoe ver een technologie ontwikkeld is, hierbij is 1 basis en 9 volledig ontwikkeld.
Onderhoud	2	Onderhoud wilt zeggen hoe onderhoudsgevoelig de technologie is. In principe weegt deze factor minder mee, omdat een plant ontworpen wordt om minimaal 15 jaar lang mee te gaan. Echter zullen plants met hoge drukken en temperaturen meer onderhoudsgevoelig zijn.
Veiligheid	5	Veiligheid is een belangrijke factor, daarom heeft het ook een 5 weging gekregen. Over het algemeen zijn bijna alle productietechnologieën wel redelijk veilig, dit komt omdat bij de meeste geen hoge temperaturen of drukken voor komen. Zeker bij elektrolyse wordt als grondstof demi water gebruikt.
Investering	4	De investering heeft te maken hoeveel geld er nodig is om een kilogram waterstof te produceren. Zo komt SMR het beste naar voren omdat de productiekosten hiervan veel lager liggen dan alternatieve productiemethoden. Een belangrijke factor in een omslagpunt naar andere methode zijn de elektriciteitskosten.
Milieueffecten	5	Milieueffecten is een zwaar wegende factor. De reden hiervoor is het klimaatakkoord en nieuwe reguleringen omtrent CO2 uitstoot. Hierdoor scoren technologieën die geen CO2 uitstoot hebben of nauwelijks beter.

4.2.3 METHODE 1

Steam methane reforming

Zoals eerder beschreven in dit hoofdstuk wordt de meeste geproduceerde waterstof verkregen via SMR. Dit heeft te maken met de lage productiekosten voor waterstof op dit moment. De verwachting is dat binnen enkele jaren andere productiemethoden goedkoper worden. De lage kosten voor waterstofproductie via SMR, het commercieel beschikbaar zijn van SMR en de volwassenheid van de technologie zorgen er voor dat SMR het hoogste scoort in de multi criteria analyse tabel 6. In Appendix IV staan de berekeningen die gedaan zijn voor de massastromen van de SMR plant voor 60000 Nm³/h waterstof. De berekeningen zijn gedaan in Excel en zijn terug te vinden onder het kopje 'massabalans SMR' in de bijgevoegde map. Voor deze berekeningen wordt een 100% conversie aangehouden.

Massastromen

Uit berekeningen van Appendix IV blijkt dat een volume stroom van 60000 Nm³/h gelijk staat aan 5400 kg/h waterstof. Aan de hand hiervan is bepaald dat een toevoer van 10743 kg/h aan bio gas nodig is. Dit reageert vervolgens samen met 12066 kg/h water tot 4050 kg/h waterstof. De resterende 1350 kg/h waterstof wordt geproduceerd in de water-shift reactie uit 18760 kg/h koolmonoxide en nog eens 12066 kg/h water.

Kosten

Er is een studie uitgevoerd door het International Energy Agency die heeft onderzocht wat de totale kosten zijn voor een steam methane reforming plant die 100000 m³/h waterstof produceert. Hierbij maken ze onderscheid uit verschillende cases. In Appendix V is te zien dat de kosten voor een normale SMR plant zonder CCS 170,9 miljoen euro bedraagt en als dan gekeken wordt naar tabel 17 in Appendix V, dan is te zien dat de kosten voor CCS beduidend hoger is. Het verschil is ongeveer 70 miljoen euro (IEAGHG, 2017). De kostenoverzicht is ook terug te vinden onder het kopje 'Kosten overzicht SMR' in de bijgevoegde map.

4.2.4 METHODE 2

Elektrolyse

Zoals eerder beschreven in het theoretisch kader werken beide elektrolyse methoden op basis van elektrolyse, de ene werkt op basis van alkaline en de ander op basis van PEM. Om groene waterstof te produceren door middel van deze methoden moet groene stroom gebruikt worden. Dit brengt dan ook meteen de grootste uitdaging met zich mee en wordt verder toegelicht in het hoofdstuk resultaten deel 4.4 *Opties voor stroomvoorziening*.

Beide methoden vergen de nodige middelen om waterstof te kunnen produceren. Zo zijn gas-vloeistofscheiders nodig om de waterstof en zuurstof te scheiden van de vloeistof en zijn warmtewisselaars nodig om deze gassen vervolgens weer te koelen. Verder zijn compressoren nodig om druk van de waterstof gelijk te krijgen aan de waterstofinfrastructuur. Echter is wel de verwachting dat nieuwe elektrolyzers in staat zijn om waterstof te leveren met de zelfde druk als in het netwerk. Hierdoor kunnen compressoren overbodig worden. Als laatst is een gasbehandelingsplant nodig om zuurstof uit het waterstof te halen.

De kosten voor beide technologieën zijn verschillend. Alkaline elektrolyse is een technologie die al voor tientallen jaren bestaat en net als SMR een technologie die al ver gevorderd is. PEM elektrolyse is minder ver ontwikkeld dan alkaline elektrolyse met als gevolg dat dit een duurdere technologie is. In Appendix VI zijn de technische parameters weergegeven voor de productie van waterstof door middel van elektrolyse, deze gegevens worden gebruikt voor de berekeningen van de elektrolyzer. De berekeningen zijn uitgevoerd in Excel en zijn terug te vinden onder de naam 'massabalans elektrolyse' in de bijgevoegde map.

Kosten Alkaline elektrolyse

Alkaline elektrolyse is een productietechnologie is die al lang bestaat. Volgens een studie van ISPT worden de kosten voor een alkaline plant geschat op 1400 €/kW (ISPT, 2020). Echter blijkt uit een andere studie die is gedaan door Planbureau voor de Leefomgeving dat de kosten geschat worden op 1800 €/kW. De verwachting is dat deze kosten kunnen dalen tot 350 €/kW per 2030 en verder afnemen tot 220 €/kW per 2050. Voor de OPEX kosten wordt een aanname gedaan van 3% van de CAPEX kosten en voor een levensduur van 30 jaar. Hierbij wordt alleen rekening gehouden waterstof als inkomstenbron (ISPT, 2019).

Kosten PEM elektrolyse

PEM is een andere en jongere elektrolyse technologie en heeft daarom hogere productiekosten dan alkaline elektrolyse. De verwachting is wel dat de productiekosten meer kunnen dalen bij de technologie. Volgens de ISPT zijn de kosten voor een PEM plant 1800 €/kW (ISPT, 2020) en kunnen

afnemen tot 600 €/kW per 2030. Hierbij is de verwachting ook dat de productiekosten verder dalen per 2050. Ook bij PEM worden voor de OPEX kosten een aanname gedaan van 3% van de CAPEX kosten voor een levensduur van 30 jaar. Ook hierbij wordt waterstof als enige inkomstenbron beschouwd (ISPT, 2019).

Voor de volgende berekeningen van de elektrolyzer wordt gebruikt gemaakt van gegevens uit Appendix VI en Appendix VII.

Subsidie

Appendix VI laat een overzicht zien van de berekende resultaten door (PBL, 2020) voor subsidies. Voor elektrolyse geldt een subsidie van 10,354 €/kg H₂ voor een looptijd van 15 jaar.

Elektriciteitskosten

Volgens het CBS zijn de elektriciteitskosten voor grote industrieën in het jaar 2020 0,127 €/kWh (CBS, 2021).

Winst

Door de elektriciteitskosten te combineren met het gemiddelde elektriciteitsgebruik per kilogram waterstof, kunnen de kosten per kilogram waterstof berekend worden.

$$0,127 * 58 = 7,366 \text{ €/kg}$$

Door vervolgens de kosten voor elektriciteit af te trekken van de subsidie, kan de winst berekend worden. Hier moeten nog wel alle andere bedrijfskosten van afgetrokken worden.

$$10,354 - 7,366 = 2,988 \text{ €/kg}$$

De winst per uur kan met het gegeven van 5400,54 kg/h uit Appendix VII als volgt berekend worden. Alle andere kosten behalve de elektriciteitskosten moeten worden afgetrokken van de 2,988 €/kg. Deze prijs is puur ter indicatie.

$$5400,54 * 2,988 = 16136,81 \text{ €/h}$$

Uit Appendix VII kan worden afgeleid dat een totaal van 16 stacks nodig is om via elektrolyse 60000 Nm³/h waterstof te produceren. Per stack is een vermogen van 20 MW nodig wat zou betekenen dat voor 16 stacks een vermogen van 320 MW vereist is.

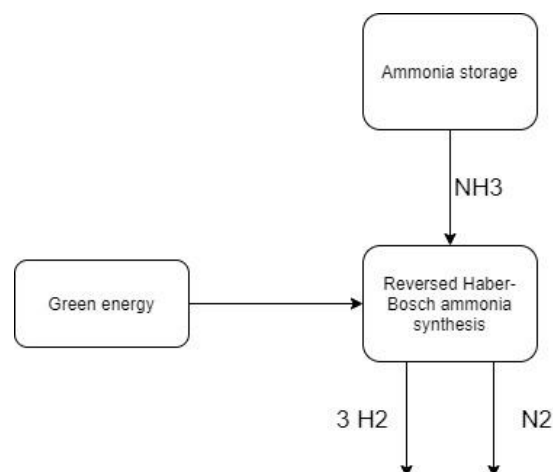
4.2.5 METHODE 3

Ammoniak kraken

Ammoniak wordt geproduceerd door middel van het Haber-Boschproces zoals beschreven in hoofdstuk 2.3.6. Appendix VIII laat een schematische tekening zien van het productieproces van het kraken van ammoniak. De belangrijkste onderdelen in dit proces zijn de hernieuwbare grondstoffen en groene stroom. De stikstof die wordt gebruikt in het Haber-Boschproces wordt verkregen via cryogene destillatie van lucht. Dit is een methode die gebruikt wordt om gasen te scheiden die normaal gasvormig zijn bij normale druk en temperatuur. De gescheiden stikstof bevat nog water en door middel van de compressor stap gaat het water condenseer. Dit is vervolgens makkelijk af te vangen.

Zoals eerder in de rapport genoemd reageert demiwater in de elektrolyzer tot waterstof en zuurstof. Vervolgens reageert de waterstof samen met de stikstof in het Haber-Boschproces tot ammoniak en dit proces kan ook worden omgedraaid. Dit proces wordt ook wel 'Reversed Haber-Bosch ammonia synthesis' genoemd, zie figuur 9.

De energiedichtheid van ammoniak is velen malen gunstiger dan dat van waterstof. Zo is de energie dichtheid van ammoniak 11,5 MJ/l waar dat van vloeibaar waterstof 8,5 MJ/l is (Tao & Lan, 2014).



Figuur 9 Reversed Haber-Boschproces

Kosten

Uit onderzoek is naar voren gekomen dat de kosten waarschijnlijk rond de \$350 per ton NH_3 zullen liggen. Dit is CO_2 -vrije ammoniak die geproduceerd wordt via aardgas met CCS. De kosten hiervoor zullen tot ongeveer 2030 aanzienlijk goedkoper zijn dan die van hernieuwbare waterstof. De kosten voor een ton NH_3 via hernieuwbare waterstof worden geschat op \$700. Echter verwacht het IEA dat na 2030 de productiekosten van ammoniak uit hernieuwbare waterstof uiteindelijk verder zullen dalen tot minder dan de helft van het niveau in 2030 (Shiozawa, 2020).

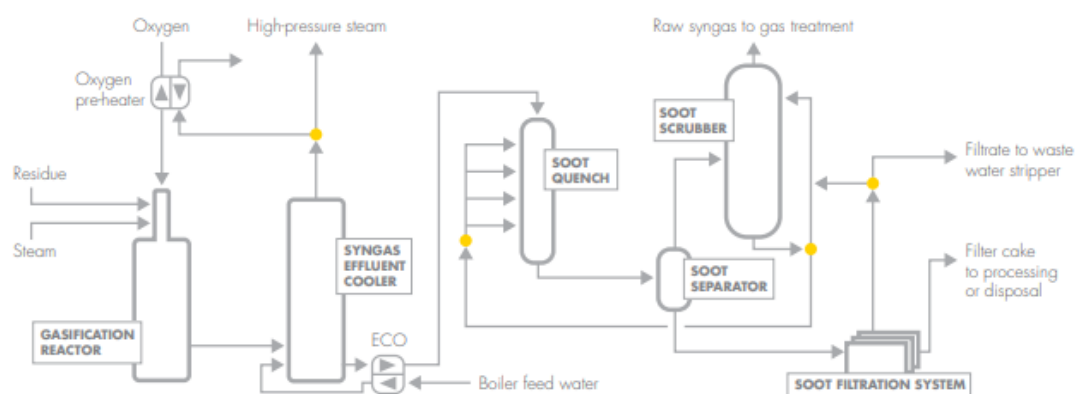
Massa balans

De massa balans voor het kraken van ammoniak is terug te vinden in Appendix IX en worden terug gevonden onder het kopje 'massabalans ammoniak kraken' in de bijgevoegde map.

4.2.6 METHODE 4

Vergassing biomassa

Een bio centrale voor groene gasproductie bestaat uit drie delen; een vergassings-, gasreinings- en gasopwaarderingsinstallatie. De biomassa die gebruikt wordt als grondstof bestaat uit verschillende materialen met als gevolg dat de samenstelling varieert. Hierdoor kan de opbrengst van waterstof variëren. De meest voorkomende materialen die gebruikt worden voor biomassa zijn maïsschillen, houtpellets, hout- en houtafval, tuinafval, bouw- en sloopafval (GSTC, 2021).



Figuur 10 Vergassing biomassa installatie (Shell, 2021)

In het eerste gedeelte van de installatie in figuur 10 wordt biomassa omgezet in een gasvormige brandstof, dit wordt gedaan door biomassa met een beperkte hoeveelheid zuurstof te laten verbranden waarbij onvolledig verbrande gassen ontstaan en wordt ook wel syngas genoemd. Syngas bestaat bijna alleen maar uit waterstof en koolstofmonoxide. In het tweede gedeelte wordt de syngas gereinigd en worden alle onzuiverheden verwijderd. In de laatste stap wordt het gas verder opgewaardeerd om de kwaliteit verder te vergroten (pbl, 2020).

Biomassa vergassing (hout-gerelateerd)

De referentiegrrootte die gebruikt wordt in een studie van Planbureau voor de Leefomgeving bedraagt 32 MW met een energetisch rendement van 65%. Dit geeft een output van 21 MW aan hernieuwbaar gas. Tabel 8 laat verschillende technische en economische parameters zien van een biomassa vergassing installatie (pbl, 2020).

Tabel 8 Technisch-economische parameters vergassing van biomassa (pbl, 2020)

<i>Parameter</i>	<i>Conceptadvies SDE++ 2021</i>	<i>Eenheid</i>
<i>Referentie grootte</i>	32	MW input
<i>Vollasturen</i>	7500	Uur/jaar
<i>Investeringskosten</i>	2250	€/kW output
<i>Vaste O&M kosten</i>	135	€/kW output
<i>Energie-inhoud substraat</i>	9	GJ/t
<i>Grondstofkosten</i>	45	€/t

Voor de berekening van een biomassa installatie wordt een aanname gedaan dat deze een output heeft van 21 MW en dit ieder uur kan leveren. Met het gegeven voor basisbedrag uit tabel 9 kan de totale subsidie per uur als volgt berekend worden:

$$21 * 1000 * 0,086 = 1806 \text{ €/MWh}$$

Tabel 9 Subsidie biomassa

<i>Parameter</i>	<i>Conceptadvies SDE++ 2021</i>	<i>Eenheid</i>
<i>Basisbedrag</i>	0,086	€/kWh
<i>Looptijd subsidie</i>	12	jaar

4.3 WATERSTOFOPSLAG

Opslag kan worden gebruikt om flexibiliteit in vraag en aanbod mogelijk te maken en zekerheid te bieden voor de levering en afname van waterstof. De meest belangrijke vraag voor dit hoofdstuk is de hoeveelheid waterstof die opgeslagen moet worden. De meest haalbare mogelijkheid voor waterstofopslag voor de locatie Uniper Maasvlakte zal door middel van een Multi criteria analyse in tabel 10 naar voren komen. De meeste criteria die eerder gebruikt zijn bij de vorige analyse, zijn ook van belang voor waterstofopslag. Echter is wel een toevoeging gedaan van industriële toepasbaarheid. Dit wilt zeggen dat de methode wel geschikt moet zijn voor grootschalige opslag. De reden voor deze criteria is vanwege het feit dat Uniper op industrieel niveau waterstof wilt produceren. De multi criteria analyse is terug te vinden onder het kopje 'MCA opslagmethode' in de bijgevoegde map.

4.3.1 MULTI CRITERIA ANALYSE WATERSTOF OPSLAG METHODE

Tabel 10 MCA opslag methode waterstof

Opties groene productietechnologieën waterstof	Commercieel beschikbaar (1-5)	volwassenheid technologie TLR (1-9)	Onderhouden (1-5)	Veiligheid (1-5)	Industrieel toepasbaar (1-5)	Investerings (1-5)	Milieueffecten (1-5)	Totaal
Weging (1 t/m 5)	5	2	3	5	5	3	1	
<i>Zoutcavernes</i>	5	9	5	5	5	2	4	118
<i>Hoge druk cilinders</i>	4	9	5	4	2	4	5	100
<i>Cryogene opslag</i>	4	9	3	3	3	2	5	88
<i>Metaalhydride</i>	3	7	4	3	2	3	4	79
<i>Complexe samenstelling van metalen</i>	1	6	2	3	1	3	4	56
<i>Line packing</i>	4	9	3	4	5	2	4	102

4.3.2 ZOUT CAVERNES

Zoutcavernes komen het beste uit de multi criteria analyse uit tabel 10. Zoutcavernes zijn grote grotten op een diepte van 300 tot 1500 meter die ontstaan zijn door het winnen van zout voor menselijke consumptie. Zout is voor de meeste gassen een gasdicht materiaal en kan daarom gebruikt worden voor de opslag van gassen. Het zout is inert, wat betekent dat het niet reageert met het opgeslagen waterstof.

TNO heeft een onderzoek uitgevoerd naar mogelijke zout cavernes in Nederland voor de opslag van waterstof (TNO, 2018). De resultaten hiervan zijn terug te vinden in Appendix X, dit is een overzicht van potentiële zoutcavernes voor de opslag van waterstof. In de uitgevoerde studie is niet gekeken naar de kwaliteit van het zout, de impact van grond verzakking en omliggend grond gebruik. Daarom kan aangenomen worden dat 25 – 50% van de potentiële cavernes geschikt zijn. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen grote cavernes (>300 meter) en kleine cavernes van 50 tot 300 meter. De resultaten van de geschikte zout cavernes staan in tabel 11. Hierin is te zien dat het aantal realistische zout cavernes ligt rond de 135 tot 272 voor grote cavernes en 40 tot 80 voor kleine cavernes (Cappellen van, Croezen, & Rooijers, 2018).

Tabel 11 mogelijke zout cavernes voor waterstof opslag (Cappellen van, Croezen, & Rooijers, 2018)

Locatie	Potentiële caverne (>300 m)	Potentiële caverne (100-300 m)
Anloo	29	18
Gasselte-drouwen	-	-
Hoogeveen	3	19
Hooghalen	74	32
Onstwedde	133	4
Pieterburen	78	13
Schoonloo	16	3
Ternaard	63	37
Winschoten	44	17
Zuidwending	105	17
Totaal	545	160
Realistische aanname	135-272	40-80

Bestaande aardgas-zoutcavernes kunnen worden omgebouwd naar cavernes voor de opslag van waterstof. Hierbij wordt de bestaande caverne eerst gevuld met pekkel en daarna worden de benodigde apparaten geïnstalleerd. Vervolgens wordt waterstof in de caverne gepompt en duwt het de pekkel er uit. De druk in de bovengrondse installatie zal aangepast moeten worden om te voldoen aan de druk in het netwerk. De grootste kosten zitten in de bovengrondse installaties bij de ombouw van zoutcavernes.

4.3.3 VLOEIBAAR OPSLAAN

Het opslaan van vloeibare waterstof brengt ook uitdagingen met zich mee. Zoals eerder beschreven in dit onderzoek is een temperatuur nodig van onder -252.9°C om waterstof vloeibaar te maken. Het grote voordeel van vloeibare waterstof is de energiedichtheid, deze is vele malen groter dan bij gasvormige waterstof bij 200 bar zoals te zien is in tabel 12.

Tabel 12 Energiedichtheid waterstof (Gawalo, 2018)

Waterstof	Vloeibaar (Kg)	Gas (Liter)
1 bar	125000 KJ	11 KJ
200 bar	-	2200 KJ

Een van de grootste nadelen van vloeibaar waterstof zijn de conversieverliezen, deze bedragen ongeveer 15%. De nieuwste technologie om waterstof vloeibaar te maken zit ongeveer op 6 kWh/kg H_2 , een voorbeeld hiervan is het IdealHY proces die op 6.4 kWh/kg H_2 zit. Om vloeibare waterstof aantrekkelijk te maken is een theoretisch minimum van 3.3 tot 3.9 kWh/kg H_2 nodig (ISPT, 2019).

Transport

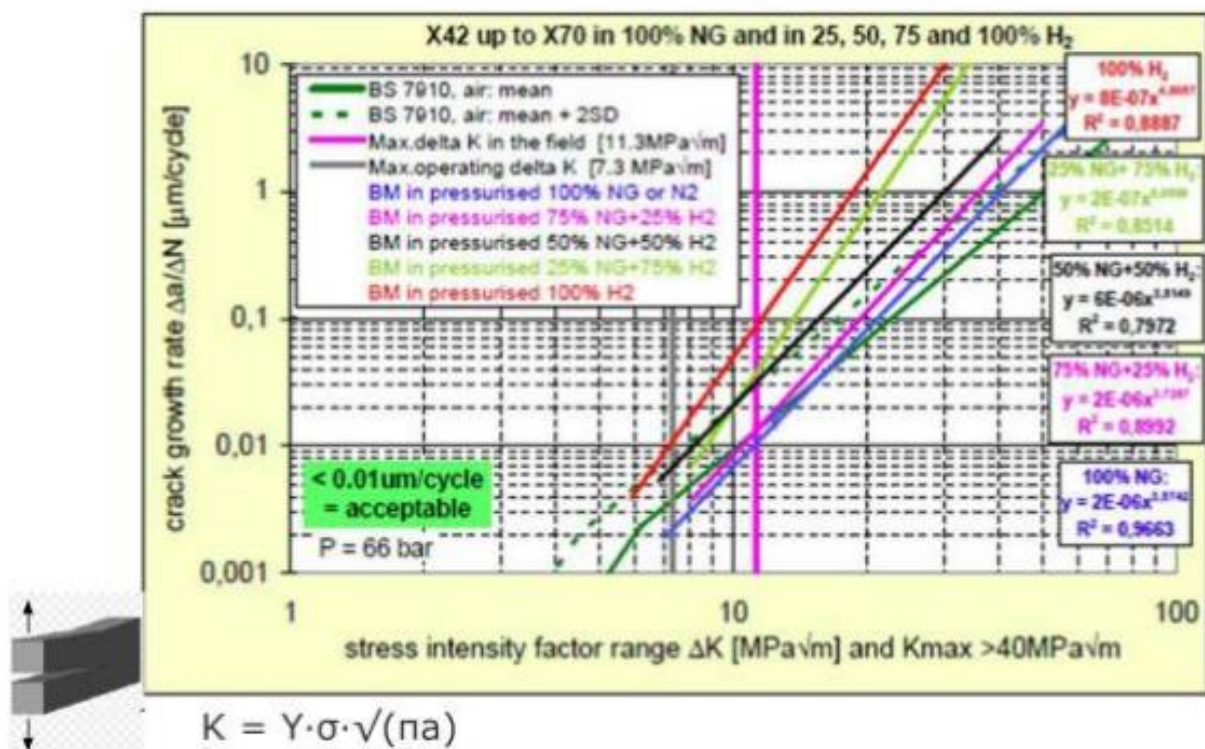
Vloeibare waterstof kan net als vloeibaar ammoniak via verschillende manieren getransporteerd worden. Zo kan het via tankwagens naar kleinschalige faciliteiten zoals een tankstation. Deze tankwagens hebben een capaciteit tussen 45 t/m 65m^3 . Op het moment zijn er nog geen schepen die vloeibare waterstof vervoeren, echter is de verwachting dat kleine aanpassingen van de huidige LNG tankers voldoen voor het transport van vloeibaar waterstof of ammoniak. Verder is Kawasaki vandaag de dag bezig met het bouwen van een schip die in staat is om 160000m^3 aan vloeibaar waterstof te vervoeren. De ontwikkeling van tankers voor vloeibare waterstof maakt internationale handel in waterstof en ook grootschalige opslag mogelijk (Platt, 2017).

4.3.4 OPSLAG IN DE WATERSTOFINFRASTRUCTUUR

Een andere manier voor het opslaan van waterstof in gasvorm, is het opslaan van waterstof in de gasinfrastructuur. In het Engels heet dit Line packing en wordt op dit moment ook al gedaan met aardgas. De capaciteit van deze opslag methode hangt af van het volume van het netwerk, de

maximale drukvariatie en de snelheid in de pijpleidingen. Line packing wordt alleen gebruikt voor dagelijkse opslag om te compenseren voor de kleine verschillen in het netwerk. Waterstof kan dus ook op de zelfde manier als aardgas opgeslagen worden via line packing, alleen door de lagere energiedichtheid vergt dit een grotere snelheid.

Een andere limiterende factor voor line packing is het maximale drukverschil. Drukverschil resulteert in grotere oppervlaktespanningen in de pijpleidingen met als gevolg dat leidingen kapot gaan en onderhoud vereist is. Figuur 11 laat een overzicht zien van de relatie tussen drukverschillen en de groei van scheuren. De rode lijn is 100% waterstof en de blauwe lijn is 100% aardgas. Hierin is te zien dat drukverschil leidt tot een factor 10 meer scheurgroei bij 100% waterstof in bestaande gasleidingen. Het gevolg hiervan is dat de maximale variatie in het drukverschil verder afneemt. Dit maakt het een minder aantrekkelijke keuze voor opslag (Cappellen van, Croezen, & Rooijers, 2018).



Figuur 11 Resultaten scheurgroeisnelheid in pijpleidingen van verschillende mengsels (DNV GL, 2017)

Een overweging zal moeten bepalen of line packing een veilige optie is voor opslag en ook niet leidt tot verslechtering van de pijpleidingen. Een nieuwe waterstofinfrastructuur zou ontworpen kunnen worden om alle beperkingen tegen te gaan.

4.4 OPTIES VOOR DUURZAME GRONDSTOFFEN EN UTILITIES VOOR DE PRODUCTIE VAN GROENE WATERSTOF

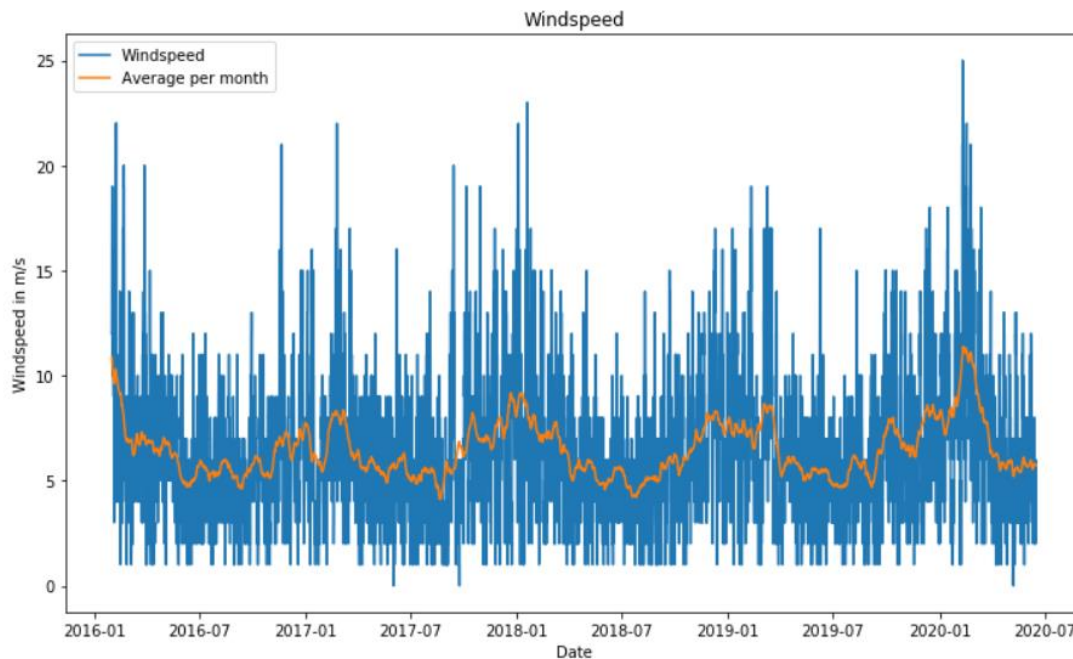
In Nederland wordt er gewerkt aan betaalbare, betrouwbare en duurzame energie die voor iedereen beschikbaar is. Duurzame energievoorziening is van groot belang voor de energietransitie en draagt daarbij ook mee aan het klimaatakkoord van Parijs. Windmolens spelen hierbij een grote rol in duurzame energie, daarom wilt Nederland in de komende jaren windparken uitbreiden tot een totaal capaciteit van 11,5 GW in 2030. De verwachting is dat windparken 2 en 6 uit Appendix XI verbonden worden met het TenneT-station op het terrein van Uniper. Dit zou betekenen dat er eerst ongeveer 1,5 GW beschikbaar komt per 2023 en later in 2030 3,5 tot 5,5 GW aan groene energie (Uniper, 2021).

Tabel 13 Aansluiting Maasvlakte windparken (Uniper, 2021)

<i>Verwacht</i>	<i>Plaats</i>	<i>Vermogen</i>	<i>Eigenaar</i>
2022	Zuid-Hollandse kust	760 MW	Vattenfall
2023	Zuid-Hollandse kust	760 MW	Vattenfall
2028-2030	IJmuiden Ver	2000 MW	-
<2030	IJmuiden Ver	2000 MW	-

Uit onderzoek blijkt dat windmolens draaien bij windkracht 2, een optimum bereiken bij windkracht 6 en stoppen met draaien bij windkracht 9 tot 10 (windenergie-nieuws.nl, 2021). Beaufort 6 staat gelijk aan een windsnelheid van 10,8 tot 13,8 m/s, zie Appendix XII. Om een meer nauwkeurige schatting te maken van energieopbrengst van windmolens op zee, wordt er gekeken naar de data van het KNMI over windsnelheden van de afgelopen 5 jaar op zee (KNMI, 2021). Dit is vervolgens verwerkt in een grafiek. De oranje lijn in figuur 17 laat de gemiddelde windsnelheid zien, deze is in de winter beduidend hoger dan in de zomer.

Volgens het CBS (CBS, 2021) ligt de productiefactor voor nieuwere windmolens op zee op ongeveer 43%, dit staat gelijk aan ongeveer 3750 vollast uur. Deze gegevens zijn te valideren door te kijken in figuur 12. Hierbij is te zien dat de benodigde wind om windmolens op volle kracht te laten draaien, vaak niet behaald wordt en windmolens op minder vermogen draaien. Door de gegevens uit tabel 13 te combineren met de 3750 vollast uur van de windmolens, kan een jaarlijkse productie van 5,625 TWh behaald worden.



Figuur 12 Windsnelheden afgelopen 5 jaar op zee

Groene ammonia

Het importeren van groene ammonia gaat een grote rol spelen in het behalen van de klimaatdoelen die voort komen uit het Nederlandse klimaatbeleid. In de wereld wordt op dit moment gewerkt aan hernieuwbare zonne- en windenergie. Het Midden Oosten en Australië zijn hiervoor ideaal vanwege de vele zonuren en wind. De stroom die hiermee wordt opgewekt gaat gebruikt worden voor het produceren van groene waterstof en kan worden omgezet in groene ammoniak. Het Midden Oosten is een strategische locatie tussen Europa en Azië. Zo kan het Midden Oosten een betrouwbare levering van groene brandstoffen wereldwijd garanderen tegen een zeer concurrerende prijs (ICE, 2021).

Groene waterstof zal naar verwachting in 2050 uitgroeien tot een markt van \$2,5 biljoen. De voornaamste vraag zal vanuit de transportsector komen. Naast de transportsector zullen zware industrieën in Noordwest-Europa en Oost-Azië ook de transitie maken naar duurzame brand- en grondstoffen voor hun processen. Groene ammoniak gaat in alle sectoren die verduurzamen veel bijdragen aan het reduceren van de CO₂ uitstoot (ICE, 2021).

4.5 INVLOEDHEBBENDE FACTOREN OP EEN CONTINUE LEVERING VAN WATERSTOF

Voor verschillende applicaties is een alternatief voor waterstof beschikbaar. Processen die waterstof als grondstof willen gebruiken en waterstof in de mobiliteitssector vergen grote veranderingen in de omzetting. Hieronder staan verschillende punten die naar voren gekomen zijn uit het literatuuronderzoek als omslagpunten voor waterstof (ISPT, 2019). Uit verschillende studies (HyChain 1 t/m 3) die zijn uitgevoerd door ISPT blijkt dat de volgende factoren van invloed zijn op de haalbaarheid van waterstof (ISPT, 2020).

Economisch

Beschikbaarheid en kosten van offshore wind

Nederland is een zeer gunstige locatie voor de productie van 'groene' energie, zeker met de verschillende windparken in de Noordzee. Competitieve elektriciteitsprijzen kunnen bereikt worden als de kosten voor windparken afnemen, met als gevolg dat de kosten voor het produceren van waterstof ook omlaag gaan (ISPT, 2019).

Beschikbaarheid en kosten van biomassa

Biomassa is een goede alternatief als industriële grondstof of in verwarmingsprocessen, zeker in energie en grondstofsector. Echter laat een inschatting over de beschikbaarheid en dus de prijs van biomassa, een grote onduidelijkheid zien. Als blijkt dat biomassa beperkt beschikbaar is, dan is waterstof een van de weinige opties die over blijft als duurzame grondstof (ISPT, 2019).

Sociaal

Is CCS geaccepteerd en beschikbaar?

Als carbon capture & storage geaccepteerd wordt in de samenleving en klaar is om geïmplementeerd te worden, kan dit leiden tot grootschalige productie van blauwe waterstof. De productie van blauwe waterstof zorgt er voor dat er meer waterstof beschikbaar is tegen lagere prijzen. Dit heeft weer als gevolg dat het een boost is voor de waterstofmarkt en de toekomst hiervan (ISPT, 2019).

Sociale acceptatie

Veel mensen zullen in het begin zeer terughoudend zijn als het gaat om waterstof. Dit komt doordat mensen niet weten waar het toegepast kan worden. Meer informatie over waterstof en bewustwording van waterstof in de energietransitie zullen leiden tot meer sociale acceptatie. Zo zal eerst sociale acceptatie nodig zijn voordat verdere ontwikkelingen kunnen plaats vinden.

Veiligheid waterstof

Veiligheid speelt een grote rol voor de ontwikkeling van waterstof. Iedere brandstof is per definitie gevaarlijk, zo moeten ze allemaal met zorg behandeld en opgeslagen worden. Zoals eerder beschreven is waterstof kleurloos, geurloos en smaakloos. Dit maakt het zeer lastig om te detecteren wanneer een incident plaats vindt. De verwachting is dat waterstof qua risico's zich op het zelfde niveau bevindt als aardgas en LNG. Doordat waterstof een zeer licht molecuul is, stijgt het zeer snel op. Dit is ook weer bevorderlijk voor de veiligheid in geval van een incident met waterstof. Daarom speelt veiligheid een dominante rol in het ontwerp van een waterstofinfrastructuur, zeker in de transportsector en bebouwde omgevingen. Dit kan als gevolg hebben dat er meer regulaties en hogere kosten komen.

Politiek

Stimulatie vanuit de regering van groene energie en waterstof

Offshore windparken maken het mogelijk om groene waterstof te produceren. Groene waterstof maakt het vervolgens weer mogelijk voor offshore windparken om meer elektriciteit te produceren omdat het elektrische opstoppen voorkomt. Als beide onderdelen gestimuleerd worden door de overheid, dan zal de vraag naar waterstof toenemen en daarmee bijdragen aan een grootschalige waterstofeconomie.

5. CONCLUSIE

Waterstof is de meest schone en veilige energiebron die wordt geproduceerd uit verschillende energiebronnen. Om waterstof aantrekkelijk te maken voor iedereen, moeten eerst de kosten voor het produceren van groene waterstof ten opzichte van grijze waterstof dalen. Dit brengt de vraag met zich mee welke installatie geschikt is om 60000 Nm³/h groene waterstof te leveren naar afnemers via de Maasvlakte infrastructuur.

Uit dit onderzoek is gebleken dat de eisen en randvoorwaarden rondom waterstof nog veel moet veranderen. Zo zijn de mogelijkheden voor het mengen van waterstof bij aardgas beperkt. Deze beperkingen komen zowel door wettelijke eisen aan de aardgaskwaliteit en het gebruiken van bestaande apparaten in het huidige gasnetwerk. Op dit moment is het wettelijk gezien nog niet toegestaan om meer dan 0,02 mol% waterstof bij te mengen in het gasnetwerk van Nederland. Deze eis geldt als voornaamste beperking voor het mengen van waterstof in het aardgassysteem en laat zien dat nieuwe regels nodig zijn voor de ontwikkeling van waterstof. Een andere mogelijkheid voor het realiseren van een waterstofnetwerk, is het aanleggen van een nieuwe netwerk naast het huidige gasnetwerk.

Ook is gebleken uit literatuuronderzoek dat 7 productietechnologieën geschikt zijn voor de productie van groene waterstof. Deze zijn verwerkt in een multi criteria analyse om te bepalen wat de betere oplossing is voor Uniper Maasvlakte. Hieruit blijkt dat SMR, elektrolyse, ammoniak kraken en vergassing van biomassa het beste naar voren komen.

Het zelfde is gedaan voor opslagmethode van waterstof. Hieruit is gebleken dat zoutcavernes veel potentie hebben voor de opslag van waterstof op grote schaal, zo brengt het ook voordelen met zich mee zoals veiligheid en industriële toepasbaarheid. Tegenwoordig worden deze cavernes ook al gebruikt voor het bufferen van aardgas. Een aanpassing in apparatuur is nodig om een overgang naar waterstof te realiseren. Het opslaan van waterstof in vloeibare vorm vergt op dit moment nog veel energie. Echter heeft het wel een veel grotere energiedichtheid ten opzichte van waterstof in gasvorm bij 200 bar. Op dit moment zijn er veel ontwikkelingen gaande op het gebied van vloeibare waterstof tankers die in staat zijn om 160000m³ te vervoeren. Hiermee wordt internationale handel vergemakkelijkt. Verder kan line packing gezien worden als een mogelijke opslag methode.

Verder speelt de toevoer van groene grondstoffen en duurzame energie een grote rol in de productie van groene waterstof. Zo is gebleken dat de toevoer van groene stroom niet constant is en een continue levering niet zeker is. Dit kan een beperkende factor zijn voor de haalbaarheid van de elektrolyzer. Ook zullen landen zoals het Midden-Oosten en Australië een grote rol spelen in de levering van groene ammoniak voor het kraken van ammoniak. Verder zal de voortgang van de energietransitie in Nederland met waterstof als hoofdrol voornamelijk afhangen van een paar

factoren. Zo moeten de kosten voor groene stroom om laag gaan om de kosten voor groene waterstofproductie meer aantrekkelijk te maken.

Groene stroom is niet de enige oplossing voor de productie van groene waterstof, daarom moeten bestaande technologieën voor de productie van blauwe waterstof ook overwogen worden. CCS speelt een grote rol bij de productie van blauwe waterstof, echter heeft dit wel meer sociale acceptatie nodig. De risico's van waterstof zijn naar verwachting vergelijkbaar met dat van aardgas en LNG. Verdere afspraken en regels zullen bestaande risico's wellicht meer inperken. Verder zal de overheid ontwikkelingen in groene energie en waterstof meer moeten stimuleren om bij te dragen aan een waterstofeconomie en dus de energietransitie te bespoedigen.

6. DISCUSSIE

Het doel van dit onderzoek is inzicht te geven in de haalbaarheid van een groene waterstof productie installatie die 60000 Nm³/h moet kunnen garanderen aan afnemers. De lezer moet er rekening mee houden dat de keuze voor de productietechnologieën gebaseerd is op het TRL-niveau en dat de technologie commercieel beschikbaar is op de bijbehorende schaalgrootte. Het kan daarom zijn dat een andere technologie meer geschikt is in de toekomst.

Het huidig onderzoek is een toevoeging tot bestaande literatuur over de toepasbaarheid van verschillende waterstof productietechnologieën op industrieel niveau. Zo wordt er in dit onderzoek verschillende oplossingen gegeven voor de productie van waterstof op industrieel niveau. Het grootste risico dat deze technologieën lopen is het ontbreken van een groene grondstof of toevoer van groene energie. Een oplossing voor een gegarandeerde levering van 60000 Nm³/h waterstof kan behaald worden door verschillende technologieën te combineren. Zo kan waterstof geproduceerd worden door SMR op het moment dat er niet voldoende groene stroom is en omgekeerd via elektrolyse als er wel genoeg groene stroom is. SMR kan ook vervangen worden door het kraken van ammoniak of het vergassen van biomassa. Ook zijn de verschillende kosten voor de productietechnologieën behandeld en is nog duidelijk te zien dat de kosten voor SMR veel lager zijn dan voor een elektrolyzer. De kosten voor een elektrolyzer en groene stroom moeten eerst verder dalen voordat waterstof via deze manier aantrekkelijk wordt. De verwachting is wel dat bij elektrolyse de kosten per kW dalen per jaar.

Om dit onderzoek volledig te maken zijn er pogingen gedaan om verschillende partijen te benaderen voor interviews en uit te zoeken welke factor waterstof speelt in hun energietransitie. De intentie hiervan is het weergeven van de ontwikkelingen binnen bedrijven met betrekking tot waterstof en het in kaart brengen van mogelijke afnemers van waterstof. Echter is tijdens dit onderzoek naar voren gekomen dat het afnemen van interviews met externe partijen zeer lastig is en is het niet gelukt om verschillende bedrijven te benaderen. De reden hiervoor is waarschijnlijk de huidige coronasituatie en gebrek aan tijd. Daarom worden de gegevens die voort zouden komen uit de interviews niet meegenomen in dit onderzoek.

Over het algemeen zijn de bronnen die gebruikt zijn in de onderzoek betrouwbaar. Zo is er enkel gebruik gemaakt van wetenschappelijke artikelen bij het beantwoorden van de deelvragen. Wel moet rekening gehouden worden met het feit dat sommige bronnen niet afkomstig zijn van een platform dat wetenschappelijk ondersteund is, daardoor kunnen bepaalde bronnen als niet betrouwbaar gezien worden.

7. AANBEVELING

Uit onderzoek is gebleken dat wet- en regelgeving in Nederland omtrent waterstof zeer streng is terwijl Nederland een leidende positie kan aannemen in Europa op het gebied van waterstof. Daarom wordt aanbevolen dat Uniper zich samen met andere waterstof belanghebbende bedrijven zich sterk maakt voor veranderingen van deze regelgeving. Hierdoor kan waterstof en dus de energietransitie zich verder blijven ontwikkelen.

Ook gebleken dat er verschillende productietechnologieën zijn voor het produceren van groene waterstof. De meeste opties hebben een uitdaging om over voldoende groene grondstoffen te kunnen beschikken. Daarom kan blauwe waterstof een grote rol spelen in het ontwikkelen naar een duurzame economie en uiteindelijk dus naar enkel groene waterstof. Hiervoor wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar de mogelijkheden van blauwe waterstof met betrekking tot verduurzaming.

Verder is in het onderzoek naar voren gekomen dat de infrastructuur een beperkende factor is, afgezien van de industrie gebieden op de Maasvlakte. Zonder de infrastructuur is verdere adoptie van waterstof zeer beperkt. Verder onderzoek naar hoe de bestaande infrastructuur kan worden aangepast moet hier meer inzicht in bieden.

Als laatst wees onderzoek uit dat de behoefte naar groene waterstof aan het toenemen is. Hiervoor is hernieuwbare energie nodig om de groene waterstofproductie te laten toenemen. Wat hiervoor nodig is, is een gegarandeerde beschikbaarheid van hernieuwbare energie, niet alleen uit Nederland maar ook import. De huidige regelgeving voorziet nog niet in import van hernieuwbare energie, maar is nodig voor de verdere groei van groene waterstofproductie.

8. NAWOORD

Het onderzoek dat ik heb uitgevoerd heb ik als een zeer belangrijk leertraject ervaren. Ik ben zelf zeer trots op het resultaat en ben tevreden dat ik deze periode zo heb kunnen afronden ondanks de huidige corona situatie. Ik denk dat dit resultaat behaald is door mij zelf te blijven motiveren. De wekelijkse gesprekken met mijn stage begeleider Fred Hage hebben hierin zeker geholpen.

Ook heb ik ervaren dat het verzamelen van informatie niet altijd gemakkelijk is. Zo heb ik ervaren dat het afnemen van interviews met externe partijen niet vanzelfsprekend is. Ook omdat alles nu via Teams gaat, merk ik wel dat het zeer lastig is. Wat dat betreft heeft corona het wel een stukje lastiger gemaakt. Daardoor is het contact met collega's zo goed als weg en daarom heb ik de opdracht wel als zelfstandig ervaren. Dit vond ik echter niet vervelend en heb gemerkt dat het mij wel goed af ging.

Doordat ik ook nog onbekwaam ben in het zelfstandig produceren van een onderzoeksrapport, heb ik zoveel mogelijk kennis opgedaan van allerlei bronnen. Zo heb ik mij laten sturen door Fred Hage, maar ook door mede studenten en mijn begeleidend docent mevrouw Dootingh.

BIBLIOGRAFIE

- Uniper. (2021). *Assignment*. Rotterdam Maasvlakte: Uniper.
- Abad, A. V., & Dodds, P. E. (2020, 1 21). *Energy Policy*. Opgehaald van reader.elsevier.com: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0301421520300586?token=91E7D8FB23A353DFABEA72926EBAF56B684500591C5FDA36DAFE3057BD32ABEAF1192B7E51EACA75F8209A3A8A87FB6B>
- Cappellen van, L., Croezen, H., & Rooijers, F. (2018). *Feasibility study into blue hydrogen*. Delft: CE Delft.
- CBS. (2021, 4 19). *opendata*. Opgehaald van CBS.nl: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/70802NED/table?dl=29E7A>
- Chein, R.-Y. (2009). Numerical modeling of hydrogen production from ammonia decomposition for fuel cell applications. *Hydrogen energy*, 589-597.
- Chen, I.-T. (2010, 10 24). *Steam Reforming of Methane*. Opgehaald van large.stanford.edu: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/chen1/>
- Chen, S., Perathoner, S., Ampelli, C., & Centi, G. (2019, 3 22). *Chapter 2 - Electrochemical Dinitrogen Activation: To Find a Sustainable Way to Produce Ammonia*. Opgehaald van Sciencedirect.com: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/haber-bosch-process>
- Dean, M. (2020, 12 20). Chapter Six- Multi criteria analysis. In M. Dean, *Advances in Transport Policy and Planning* (pp. 165-224). London: Elsevier. Opgehaald van nl.linkfang.org: <https://nl.linkfang.org/wiki/Multicriteria-analyse>
- DeltaOHM. (2021, September 16). *Wat is geleidbaarheid*. Opgehaald van DeltaOHM: [https://www.deltaohm.nl/nieuws/20120328-wat-is-geleidbaarheid-en-welke-geleidbaarheidsmeter-heeft-u-nodig#:~:text=Zie%20voor%20het%20meten%20van,%2Fcm%20\(micro%20Siemens\)](https://www.deltaohm.nl/nieuws/20120328-wat-is-geleidbaarheid-en-welke-geleidbaarheidsmeter-heeft-u-nodig#:~:text=Zie%20voor%20het%20meten%20van,%2Fcm%20(micro%20Siemens))
- DNV GL. (2017). *Verkenning waterstofinfrastructuur*. Groningen: DNV GL.
- Duurzaam ondernemen. (2021, 5 7). *Rotterdam stimuleert waterstofeconomie door aanleg infrastructuur voor groene waterstoffabriek Shell*. Opgehaald van duurzaam-ondernemen.nl: <https://www.duurzaam-ondernemen.nl/rotterdam-stimuleert-waterstofeconomie-door-aanleg-infrastructuur-voor-groene-waterstoffabriek-shell/>
- Gas, T. N. (2021, 10 29). *Engineersonline.nl*. Opgehaald van Engineersonline.nl: <https://www.engineersonline.nl/download/Programmatische%20Aanpak%20Waterstof%20-%20finaal%20concept%20-%2029%20okt%202019.pdf>
- Gasunie. (2019, 4 9). *Wat is waterstof en hoe maak je het?* Opgehaald van <https://www.dewereldvanwaterstof.nl/>: <https://www.dewereldvanwaterstof.nl/gasunie/wat-is-waterstof/>

- GasUnie. (2019, 11 1). *waterstof vraag en aanbod nu*. Opgehaald van waterstof:
[https://www.gasunie.nl/expertise/waterstof/scenarios-voor-vraag-en-aanbod-waterstof/\\$4229/\\$4230#:~:text=De%20huidige%20vraag%20naar%20waterstof,in%20plaats%20van%2011%20PJ.&text=gekomen%2C%20richting%202050%20wordt%20een,omgeving%20en%20lucht%2D%20en%20s](https://www.gasunie.nl/expertise/waterstof/scenarios-voor-vraag-en-aanbod-waterstof/$4229/$4230#:~:text=De%20huidige%20vraag%20naar%20waterstof,in%20plaats%20van%2011%20PJ.&text=gekomen%2C%20richting%202050%20wordt%20een,omgeving%20en%20lucht%2D%20en%20s)
- Gasunie. (2021, 3 8). *waterstof*. Opgehaald van energietransitie:
<https://www.gasunie.nl/energietransitie/waterstof>
- Gasunie. (2021, 2 17). *Waterstofopslag Hystock*. Opgehaald van gansunienewenergie.nl:
<https://www.gasunienewenergy.nl/projecten/waterstofopslag-hystock>
- Gawalo. (2018, 12 12). *Waterstof als brandstof: over de energiedichtheid en de kostprijs*. Opgehaald van Gawalo: <https://www.gawalo.nl/energie/artikel/2018/12/waterstof-als-brandstof-over-de-energiesdichtheid-en-kostprijs-1016909>
- Gerard, B. (2019, 5 6). *Superkritisch vergassen van natte biomassa*. Opgehaald van bjmgerard.nl:
<https://www.bjmgerard.nl/?tag=superkritisch-vergassen#:~:text=Bij%20superkritisch%20vergassen%20wordt%20natte,het%20kritische%20punt%20van%20water.&text=Het%20water%20verliest%20zijn%20polair,bij%2010%C2%B0C%20meer.>
- Gigler, J., & Weeda, M. (2018). *Contouren van een routekaart Waterstof*. TKI Nieuw Gas.
- Green planet. (2021, 3 21). *waterstof tanken*. Opgehaald van Waterstof-tanken.nu: <https://waterstof-tanken.nu/waterstof-tanken/#:~:text=Gemiddeld%205%20tot%208%20kilo,500%20tot%20800%20kilometer%20rijden.>
- GSTC. (2021, 5 5). *Biomass Gasification*. Opgehaald van globalsyngas.org: <https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/biomass-gasification/>
- Gurmai, Z., Wijkman, A., Prodi, V., Guidoni, U., & Turmes, C. (2007). *on establishing a green hydrogen economy and a third industrial revolution in*. European Parliament.
- Hakki, A., AlSalka, Y., Mendive, C. B., Ubogui, J., & dos Santos Claro, P. C. (2018). Hydrogen Production by Heterogeneous Photocatalysis. *Encyclopedia of interfacial Chemistry*, 1-3.
- hub. (2021, 2 16). Opgehaald van woorden.org: <https://www.woorden.org/woord/hub>
- ICE. (2021, 05 11). *Green fuels mega project set to make Oman world leader in green hydrogen and green ammonia*. Opgehaald van intercontinentalenergy.com:
<https://intercontinentalenergy.com/documents/ICE-Announcement-20210511.pdf>
- IEAGHG. (2017). *Economic Evaluation of SMR based standalone Hydrogen Plant with CCS*. Cheltenham UK: International Energy Agency.

- iec. (2021, 3 22). *Fuel Cell technologies*. Opgehaald van iec.ch: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:22:0:::FSP_ORG_ID:1309
- Institute for Sustainable Process Technology. (2021). *Integration of Hydrohub GigaWatt Electrolysis Facilities in Five Industrial Clusters in The Netherlands*. Amersfoort: ISPT.
- Iso. (2019, 11). *Hydrogen Fuel Quality*. Opgehaald van iso.org: <https://www.iso.org/standard/69539.html>
- iso.org. (2021, 3 22). *catalogue*. Opgehaald van iso.org: <https://www.iso.org/committee/54560/x/catalogue/>
- ISPT. (2019, May). *HyChain 1*. Amersfoort: ISPT. Opgehaald van ISPT.eu: <https://ispt.eu/media/SI-20-06-Final-report-HyChain-1.pdf>
- ISPT. (2019, 4 19). *Hydrohub Hychain 2*. Amersfoort: ISPT. Opgehaald van ispt.eu: <https://ispt.eu/media/SI-20-06-Final-report-HyChain-2.pdf>
- ISPT. (2020, 5 5). *ENERGY CARRIERS AND HYDROGEN SUPPLY CHAIN*. Opgehaald van ispt.eu: <https://ispt.eu/projects/hychain/>
- ISPT. (2020, 4). *ispt.eu*. Opgehaald van Integration of gigawatt scale electrolyser in five industrial clusters: <https://ispt.eu/media/ISPT-samenvattend-rapport-GigaWatt-online-def.pdf>
- J. Udagawa, P. A. (2006, 12 27). *Hydrogen production through steam electrolysis: Model-based steady state performance of a cathode-supported intermediate temperature solid oxide electrolysis cell*. Opgehaald van www.sciencedirect.com: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775307001103>
- Kiwa. (2020, 9 8). *De impact van het bijmengen van waterstof op het gasdistributienet en de gebruiksaanwijzing*. Opgehaald van netbeheernederland.nl: https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Waterstof_56_1586657439.pdf
- KNMI. (2021, 4 19). *catalog*. Opgehaald van dataplaform.knmi.nl: <https://dataplaform.knmi.nl/catalog/index.html>
- Lenntech. (2021). *Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption. Adopted by the Council, on 3 November 1998*. European Union.
- Miller, H. A., Bouzek, K., Hnat, J., Loos, S., Bernacker, C. I., Weisgarber, T., . . . Meier-Haack, J. (2020, 4 14). Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions. *Sustainable Energy Fuels*, p. 4. Opgehaald van pubs.rsc.org: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2020/se/c9se01240k>
- NaturalHy. (2010, 5 15). *Using the Existing Natural Gas system for Hydrogen*. Opgehaald van Issuu.com: https://issuu.com/exergia/docs/naturalhy_brochure
- Net Beheer. (2021, 3 31). *bijlage*. Opgehaald van energiecijfers.info: <https://energiecijfers.info/bijlagen/>

- Nipattummakul, N., Ahmed, I. I., Kerdsuwan, S., & Gupta, A. K. (2010, 5 21). *Hydrogen and syngas production from sewage sludge viasteam gasification*. Opgehaald van www.sciencedirect.com:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S036031991001671X?token=52FA6F72E84444FC195A021EFFBBD0B718FAB9354C7D23C8BD51F4D0A5FCD7EFD9850C12F580CE7B7CF33F4824584819>
- Noordzeeloket. (2021, 4 15). *Windenergie*. Opgehaald van Noordzeeloket.nl:
<https://www.noordzeeloket.nl/functies-gebruik/windenergie/>
- Noort, A. v. (2017). *Verkenning waterstofinfrastructuur*. Groningen: DNV GL.
- NPROXX. (2019, 5 12). *Hydrogen storage*. Opgehaald van nproxx.com:
<https://www.nproxx.com/capabilities/type-4-pressure-vessels/>
- Overheid. (2014, 7 11). *Regeling gaskwaliteit*. Opgehaald van wetten.overheid.nl:
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0035367/2019-01-01>
- Ozarslan, A. (2012, 7 24). *Large scale hydrogen energy storage in salt caverns*. Opgehaald van sciencedirect.com:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319912017417?token=77B88C8794B22BBAF5F867A643D309B955438F30EE8DD86E12382579DA1E2DCD16A20AE493843BF63EE767D413CF4FBD>
- Parthasarathy, P. (2013). Renewable energy. *Elsevier*, 1-10.
- PBL. (2020, 5 6). *Conceptadvies SDE waterstofproductie via elektrolyse*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving. Opgehaald van PBL: https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-conceptadvies-sde-plus-plus-waterstofproductie-via-elektrolyse_4115.pdf
- pbl. (2020, 5 5). *CONCEPTADVIES SDE++ 2021 verbranding en vergassing van biomassa*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving. Opgehaald van pbl.nl: https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-conceptadvies-sde-plus-plus-2021-verbranding-en-vergassing-van-biomassa_4107.pdf
- Phillips, R. (2021, 2 22). *Zero gap alkaline electrolysis cell design for renewable energy storage as hydrogen gas*. Opgehaald van pubs.rsc.org:
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra22242k#!divAbstract>
- Platt, K. (2017, 1 31). *mpnews*. Opgehaald van mpnews.com: <http://www.mpnews.com.au/2017/01/31/ship-on-way-for-hydrogen-export/>
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2021). *De Staat van het Drinkwater in Nederland, 2012*. Bilthoven: RIVM.
- Rijksoverheid. (2021, 3 3). *Klimaatakkoord*. Opgehaald van Rijksoverheid:
<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatakkoord/wat-is-het-klimaatakkoord>

- Rijksoverheid. (2021, 2 4). *klimaatverandering*. Opgehaald van klimaatbeleid:
<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatbeleid#:~:text=49%25%20min der%20CO2%2Duitstoot,2050%20ten%20opzichte%20van%201990.>
- Roest, E. v. (2021). Introducing Power-to-H₂: Combining renewable electricity with heat, water and hydrogen production and storage in a neighbourhood. *Applied energy*, 5.
- RvO. (2020, 10 22). *ROAD project*. Opgehaald van rvo.nl: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/afgesloten-projecten/overige-projecten/road-project>
- RVO. (2021, 03 4). *NL Dutch solutions for a hydrogen economy*. Opgehaald van rvo.nl:
<https://www.rvo.nl/sites/default/files/2021/03/Dutch%20solutions%20for%20a%20hydrogen%20economy.pdf>
- Samco. (2021, 3 9). *Reverse osmosis*. Opgehaald van samcotech: <https://www.samcotech.com/reverse-osmosis-nanofiltration-process-how-they-work/>
- Shell. (2021, 5 5). *Residue gasification*. Opgehaald van chemwinfoc.com:
http://www.chemwinfoc.com/private_folder/Uploadfiles2018_January/Air_Shell_residue-gasification-fact.pdf
- Shiozawa, B. (2020, 11 12). *The Cost of CO₂ free Ammonia*. Opgehaald van ammoniaenergy.org:
<https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-cost-of-co2-free-ammonia/>
- Sinnot, & Towler. (2009). *Chemical engineering design*. Oxford: Elsevier.
- Sinnott, R., & Towler, G. (2009). *Chemical engineering design*. Oxford: Elsevier.
- Susmozas, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2013, 6 3). *Life-cycle performance of indirect biomass gasification as a green alternative to steam methane reforming for hydrogen production*. Opgehaald van Reader.elsevier.com:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S036031991301450X?token=0652ACFA5769A93BC1E5D0EFDFA62578FEAE477F5CDF6225183ADEA6E5C846CD953616C126951CAB8CA27314832AF05&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210409101408>
- Tao, S., & Lan, R. (2014, 8 28). *Ammonia as a suitable fuel for fuel cells*. Opgehaald van frontiers.org:
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2014.00035/full#:~:text=The%20raw%20energy%20density%20of,et%20al.%2C%202012.>
- Technical Committee ISO/TC 47, Chemistry. (2021). *ISO 3696:1987*. Geneva: International Standards Organisation.
- The Engineering Toolbox. (2021, 3 22). *Engineering Toolbox*. Opgehaald van engineeringtoolbox.com:
<https://www.engineeringtoolbox.com/>

- TKI. (2021, 2 19). *Routekaart*. Opgehaald van topsectorenergie.nl:
<https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Gas/publicaties/20180307%20Routekaart%20Waterstof%20TKI%20Nieuw%20Gas%20maart%202018.pdf>
- TNO. (2018, 11 1). *Ondergrondse opslag in Nederland*. Utrecht: TNO. Opgehaald van nlog.nl:
<https://www.nlog.nl/sites/default/files/2018-11/Ondergrondse+Opslag+in+Nederland+-+Technische+Verkenning.pdf>
- Uniper. (2021, 2 4). Opgehaald van Uniper.energy: <https://www.uniper.energy/benelux/>
- Uniper. (2021, 3 8). Opgehaald van Uniper.energy: <https://www.uniper.energy/benelux/>
- varendoejesamen.nl. (2021, 4 19). *Kenniscentrum*. Opgehaald van varendoejesamen.nl:
<https://www.varendoejesamen.nl/kenniscentrum/artikel/windkracht-en-de-schaal-van-beaufort-hoe-zit-het-precies>
- Vitens. (2021, September 16). *Waterkwaliteit*. Opgehaald van Waterbedrijf Vitens:
<https://www.vitens.nl/service/veelgestelde-vragen/waterkwaliteit#:~:text=In%20neutraal%20water%20is%20de,8%20en%20de%208%2C3.>
- Waterstofnet. (2010, 5 3). *waterstoftabel*. Opgehaald van waterstofnet.eu:
https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/Pdf-Ppt/waterstoftabel.pdf
- Weidner, E., Honselaar, M., & Cebolla, R. O. (2016). *Hydrogen*. Publication office of the European Union.
- Wet verbod op kolen bij elektriciteitsproductie*. (2019, 12 20). Opgehaald van overheid.nl:
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0042905/2019-12-20>
- Wet verbod op kolen bij elektriciteitsproductie*. (2019, 3 5). Opgehaald van Overheid.nl:
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0042905/2019-12-20>
- windenergie-nieuws.nl. (2021, 4 19). *Begrippen Windenergie*. Opgehaald van Windenergie-nieuws.nl:
<https://windenergie-nieuws.nl/begrippen/>
- Yara. (2020, 12 7). *ESG Investor Seminar*. Opgehaald van Yara.com:
<https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/capital-markets-day/2020-esg/esg-investor-seminar-2020-slides.pdf>
- Yavor, Y., Goroshin, S., Bergthorson, J. M., & Frost, D. L. (2021). Comparative reactivity of industrial metal powders with water for hydrogen production. *Hydrogen energy*, 1026-1036.
- Zuttel, A. (2003, 9). *Materials for hydrogen storage*. Opgehaald van reader.elsevier.com:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1369702103009222?token=8B5C17ADCF4ACA7C7D212AA673C52DE9AEADAC6F51182E6EF6A95F85DC415F297C351169751D93D1E4923B1EC7AB58F0>

APPENDIX I OVERZICHT CENTRALES



Figuur 13 Verschillende centrales Uniper Nederland

APPENDIX II VERGELIJKING ELEKTROLYSE METHODE

Tabel 14 Vergelijking van de verschillende elektrolyse methode (Miller, et al., 2020)

	ALKALINE	PEM	AEM
ELECTROLYTE	Aqueous KOH (20–40 wt%)	Proton exchange ionomer (e.g. Na ⁺ ion)	Anion exchange ionomer (e.g. AS-4) + optional dilute caustic solution
CATHODE	Ni, Ni–Mo alloys	Pt, Pt–Pd	Ni and Ni alloys
ANODE	Ni, Ni–Co alloys	RuO ₂ , IrO ₂	Ni, Fe, Co oxides
HALF-CELL SEPARATION	Diaphragm (Zirfon Perl 500 mm)	Naon 117 (e.g. 180 mm)	AEM (20–100 mm)
CURRENT DENSITY (A CM²)	0.2–0.4	0.6–2.0	0.2–1.0
CELL VOLTAGE (V)	1.8–2.4	1.8–2.2	1.8–2.2
CELL AREA (M²)	<4	<3	Lab testing cells
OPERATING TEMPERATURE (C)	60–80	50–80	50–60
OPERATING PRESSURE (BAR)	1–30	30–76	1–30
PRODUCTION RATE (NM³ H¹)	<760	<40	<1
GAS PURITY (VOL%)	>99.5	>99.9999	>99.99
SYSTEM RESPONSE	Seconds	Milliseconds	Na
STACK LIFETIME (H)	60k to 100k	20–60k	Na
TECHNOLOGY STATUS	Mature	Commercial	R&D

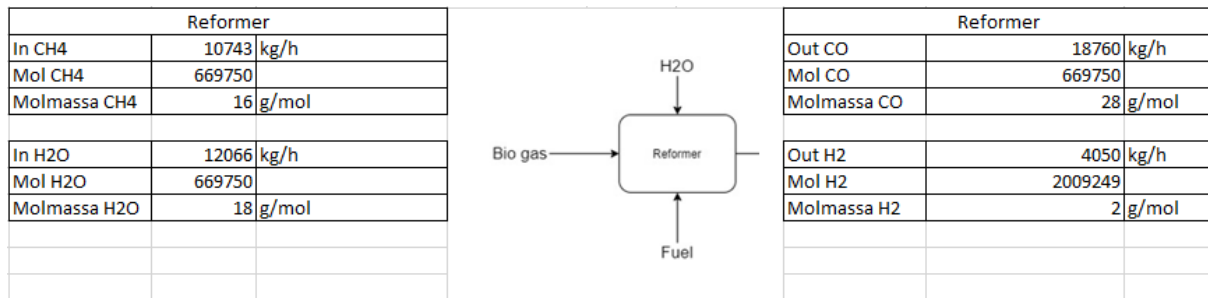
APPENDIX III METAALPOEDERS

Tabel 15 Metaalpoeders die gebruikt zijn in de studie bij (Yavor, Goroshin, Bergthorson, & Frost, 2021)

Metal	Symbol	Powder name	Specific surface area [m ² /g]	d ₃₂ [μm]	Metal density [g/cm ³]
Boron	B	B-3135	3.793	1.1	2.37
Magnesium	Mg	MG-101	1.290	15.6	1.74
Aluminum	Al	H-10	0.468	13.3	2.70
Silicon	Si	SI-100	1.128	6.6	2.33
Titanium	Ti	TI-104	0.246	20.2	4.51
Chromium	Cr	CR-102	2.918	1.9	7.15
Manganese	Mn	MN-101	0.671	6.6	7.30
Iron	Fe	FE-102	0.254	19.6	7.87
Nickel	Ni	NI-124	0.008	56.7	8.91
Copper	Cu	CU-115	0.077	30.3	8.96
Zinc	Zn	ZN-101	0.934	6.2	7.14
Selenium	Se	R-130-2	0.607	8.4	4.81
Zirconium	Zr	ZR-105	0.105	241.0	6.52
Molybdenum	Mo	MO-102	0.206	18.7	10.20
Tin	Sn	SN-103	0.060	128.0	7.26
Tungsten	W	WP-103	0.075	15.1	19.30

APPENDIX IV MASSABALANS BEREKENING SMR

Massa balans



Figuur 14 Massa balans reformer stap

Reformer

Om de waardes voor de ingaande stromen van de reformer te berekenen, moet eerst de molverhouding, molmassa en massastromen berekend worden. Dit kan gedaan worden met de volgende reactievergelijkingen:



Uit de opdracht blijkt dat de gewenste volumestroom van waterstof 60000 m³/h is. De energie inhoud van waterstof 3 kWh/m³ en 33,33 kWh/kg (Waterstofnet, 2010). Hiermee kan de volgende berekening gedaan worden.

$$60000 * 3 = 180000 \text{ kWh}$$

Massastroom H₂

$$\frac{180000}{33,33} = 5400 \text{ kg/h}$$

Molberekening

Vervolgens kan de molverhouding berekend worden. Met een molmassa van is 2,01588 g/mol H₂ kan de volgende formule opgesteld worden:

$$5400,54 * \frac{1000}{2,01588} = 2678999 \text{ mol/h}$$

Massastroom methaan

De molmassa van methaan is 16,04 g/mol en de molverhouding van het gehele reactie is 1:4;

$$\frac{2678998,75}{4} = 669750 \text{ mol/h}$$

$$669749,7 * \frac{16,04}{1000} = 10743 \text{ kg/h}$$

Massastroom water

De molverhouding tussen water en methaan is 1, dus het aantal mol is het zelfde. De molmassa van water is 18,01528 g/mol.

$$669749,7 * \frac{18,01528}{1000} = 12066 \text{ kg/h}$$

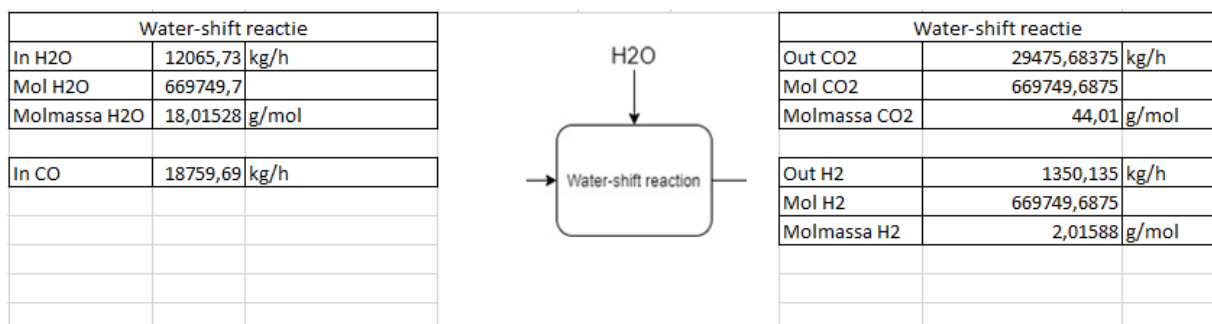
Producten

In de eerste stap van de reformer zal 10742,8 kg/h bio methaan samen reageren met 12065,7 kg/h water tot koolmonoxide en waterstof. De verhouding tussen methaan en CO is 1:1, hierdoor is de benodigde hoeveelheid mol 669749,7 en CO heeft een molmassa van 28,01 g/mol. Waterstof in de eerste reactievergelijking heeft een verhouding van 1:3, dit geeft de volgende vergelijking:

Waterstof: $669749,7 * 3 = 2009249 \text{ mol}$

Waterstof: $2009249,062 * \frac{2,01588}{1000} = 4050 \text{ kg/h}$

Koolmonoxide: $669749,7 * \frac{28,01}{1000} = 18760 \text{ kg/h}$



Figuur 15 Massa balans water shift reactie

Water-shift reactie

Vervolgens reageert een zelfde hoeveelheid water als in de reformer samen met de 18759,7 kg/h gevormde koolmonoxide tot nog meer waterstof en koolstofdioxide in de water-shift reactie zoals beschreven is in figuur 10.

Waterstof: $669749,6875 * \frac{2,01588}{1000} = 1350 \text{ kg/h}$

Koolstofdioxide: $669749,6875 * \frac{44,01}{1000} = 29476 \text{ kg/h}$

APPENDIX V KOSTENOVERZICHT SMR

Tabel 16 Kosten SMR plant voor waterstofproductie zonder CCS (IEAGHG, 2017)

<i>Description</i>	<i>Hydrogen plant</i>	<i>Power island</i>	<i>Utilities & balance of plant</i>	<i>Total cost euro</i>
<i>Direct material</i>	€ 40.677.000	€ 8.559.000	€ 18.848.000	€ 68.084.000
<i>Construction</i>	€ 25.698.000	€ 5.643.000	€ 17.807.000	€ 49.148.000
<i>Direct field cost</i>	€ 66.375.000	€ 14.202.000	€ 36.655.000	€ 117.232.000
<i>Other Costs</i>	€ 1.885.000	€ 483.000	€ 1.290.000	€ 3.658.000
<i>EPC services</i>	€ 12.750.000	€ 2.085.000	€ 6.735.000	€ 21.570.000
<i>Total installed cost</i>	€ 81.010.000	€ 1.677.000	€ 44.680.000	€ 142.460.000
<i>Project contingency</i>	€ 16.202.000	€ 3.354.000	€ 8.936.000	€ 28.492.000
<i>Total plant cost</i>	€ 97.212.000	€ 20.124.000	€ 53.616.000	€ 170.952.000
kosten SMR zonder CCS				

Tabel 17 Kosten SMR plant voor waterstofproductie met CCS (IEAGHG, 2017)

<i>Description</i>	<i>Hydrogen plant</i>	<i>CO2 capture & CO2 compression</i>	<i>Power Island</i>	<i>Utilities & balance of plant</i>	<i>Total cost euro</i>
<i>Direct material</i>	€ 40.677.000	€ 31.792.000	€ 8.534.000	€ 19.394.000	€ 100.397.000
<i>Construction</i>	€ 25.698.000	€ 17.181.000	€ 5.590.000	€ 18.183.000	€ 66.652.000
<i>Direct field cost</i>	€ 66.375.000	€ 48.973.000	€ 14.124.000	€ 37.577.000	€ 167.049.000
<i>Other Costs</i>	€ 1.885.000	€ 1.220.000	€ 396.000	€ 1.274.000	€ 4.775.000
<i>EPC services</i>	€ 12.750.000	€ 7.807.000	€ 2.040.000	€ 6.779.000	€ 29.376.000
<i>Total installed cost</i>	€ 81.010.000	€ 58.000.000	€ 16.560.000	€ 45.630.000	€ 201.200.000
<i>Project contingency</i>	€ 16.202.000	€ 11.600.000	€ 3.312.000	€ 9.126.000	€ 40.240.000
<i>Total plant cost</i>	€ 97.212.000	€ 69.600.000	€ 19.872.000	€ 54.756.000	€ 241.440.000
kosten SMR met CCS					

APPENDIX VI TECHNISCHE PARAMETERS ELEKTROLYZE EN SUBSIDIE

Tabel 18 Technische economische parameters waterstofproductie via elektrolyse (PBL, 2020)

<i>Parameter</i>	<i>Conceptadvies SDE++ 2021</i>	<i>Eenheid</i>
<i>Inputvermogen</i>	20	MW
<i>Gemiddelde elektriciteitsgebruik per kg H₂</i>	58.0	kWh/kg H ₂
<i>Outputvermogen</i>	345	Kg H ₂ /uur
<i>Vollasturen</i>	2000	Uren/jaar
<i>Investeringskosten</i>	1800	€/kW
<i>Vaste O&M-kosten (inclusief netwerkkosten)</i>	87	€/kW/jaar
<i>Variabele O&M-kosten (=kosten elektriciteit)</i>	0.0358	€/kWh

Tabel 19 Overzicht subsidieparameters waterstofproductie via elektrolyse (PBL, 2020)

<i>Parameter</i>	<i>Conceptadvies SDE ++ 2021</i>	<i>Eenheid</i>
<i>Basisbedrag SDE++</i>	10,354	€/kg H ₂
<i>Looptijd subsidie</i>	15	Jaar
<i>Basisprijs SDE++ waterstof</i>	0,29 + 0,176 * (2/3) * aardgasprijs (€/GJ HHV) of 0,29 + 0,049 * (2/3) * aardgasprijs (€/MWh HHV)	€/kg H ₂
<i>Correctiebedrag</i>	0,29 + 0,176 * aardgasprijs (€/GJ HHV) of 0,29 + 0,049 * aardgasprijs (€/MWh HHV)	€/kg H ₂

APPENDIX VII MASSA BALANS ELEKTROLYZER

Uit eerdere berekeningen kan worden gehaald dat een massastroom van 5400,54 kg/h waterstof gelijk staat aan 60000 m³/h waterstof. Doordat een 100 MW elektrolyzer is opgebouwd uit verschillende stacks worden de volgende berekeningen uitgevoerd per stack. De massastroom van waterstof is 345 kg/h en kan uit tabel 10 gehaald worden. Vervolgens laat figuur 11 een schematische tekening zien van de verschillende massastromen van de elektrolyzer.

Molaire massa H₂O: 18,01528 g/mol

Molaire massa H₂: 2,01588 g/mol

Molaire massa O₂: 32 g/mol

Mol verhouding

De verhouding is 2:1:2 zoals te zien is in de onderstaande reactievergelijking.



Berekening mol waterstof: $345 * \frac{1000}{2,01588} = 171131 \text{ mol}$

Mol zuurstof: $\frac{171131}{2} = 85565 \text{ mol}$

Massastroom zuurstof: $85565,48 * \frac{32}{1000} = 2738 \text{ kg/h}$

Massastroom water: $171131 * \frac{18,01528}{1000} = 3083 \text{ kg/h}$

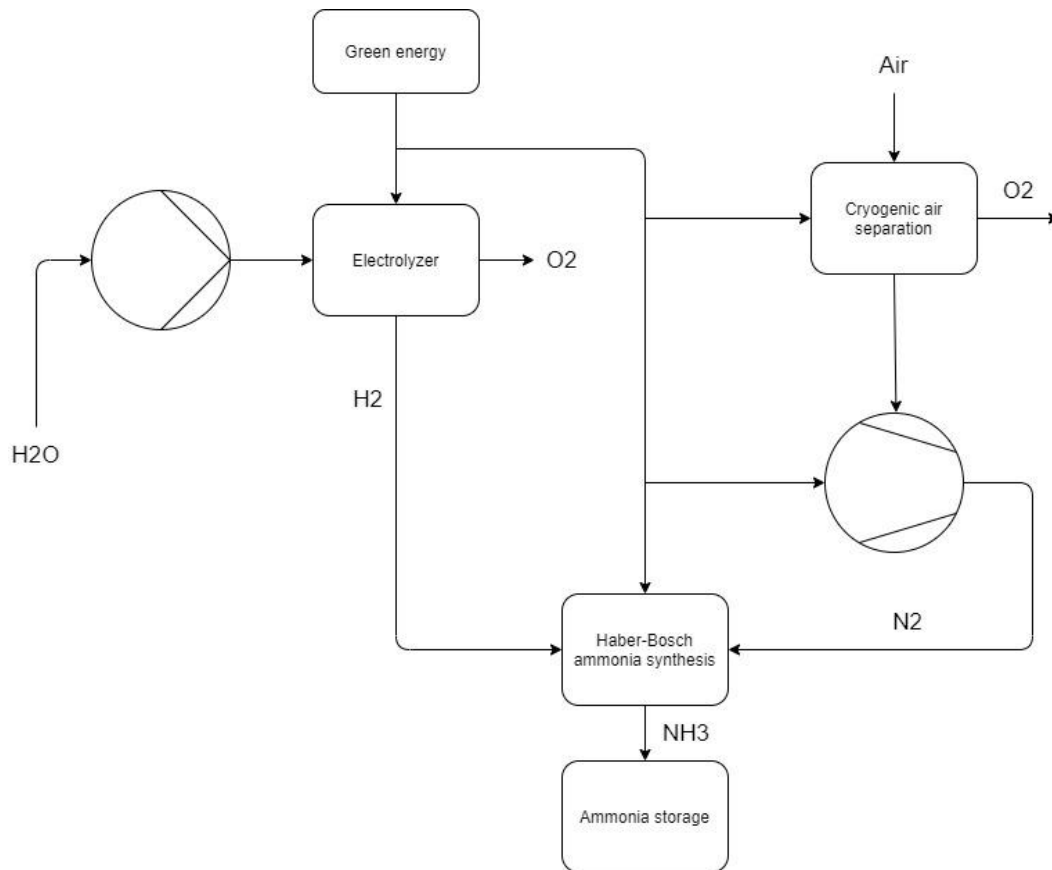
H ₂ O in	3082,972	kg/h		Outputvermogen	345 kg/h H ₂
				Output O ₂	2738,095 kg/h

Figuur 16 massa balans elektrolyzer

Tabel 20 Berekende gegevens elektrolyzer

<i>Parameter</i>	<i>Waarde</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Formule</i>	<i>Bron</i>
Inputvermogen	20	MW	-	(PBL, 2020) & tabel 7
Outputvermogen	345	kg H ₂ /uur	-	(PBL, 2020) & tabel 7
Energie-inhoud H₂	33,33	kWh/kg	-	(Waterstofnet, 2010)
Energie-inhoud H₂	3	kWh/m ³	-	(Waterstofnet, 2010)
Vraag	60000	Nm ³ /h	-	(Uniper, 2021)
Hoeveelheid kWh nodig	180000	kWh H ₂	Energie-inhoud*Vraag	
Hoeveelheid kg nodig	5400,54	kg/h H ₂	kWh/kWh	
Aantal stacks elektrolyzers	15,65374	-	kg/kg	
Aantal stacks elektrolyzers afgerond	16	-	-	
Vermogen nodig	320	MW/h	Aantal stacks * inputvermogen	
Aardgasprijs	27,815	€/GJ	-	(CBS, 2021)
Prijs H₂	3,553627	€/kg	0,29 + 0,176 * (2/3) * aardgasprijs (€/GJ HHV)	Tabel 8

APPENDIX VIII SCHEMATISCHE TEKENING HABER-BOSCH PROCES



Figuur 17 Schematische tekening Haber-Bosch proces

APPENDIX IX MASSABALANS AMMONIAK KRAKEN

Massa balans

Zoals eerder beschreven is de nodige massastroom van waterstof 5400,54 kg/h. Deze waarde wordt meegenomen in de volgende berekeningen en de onderstaande waardes zijn van belang. In figuur 14 staat een schematische tekening van de massa balans.



Molmassa	17,031 g/mol	NH ₃
Molmassa	28,0134 g/mol	N ₂
Molmassa	2,01588 g/mol	H ₂

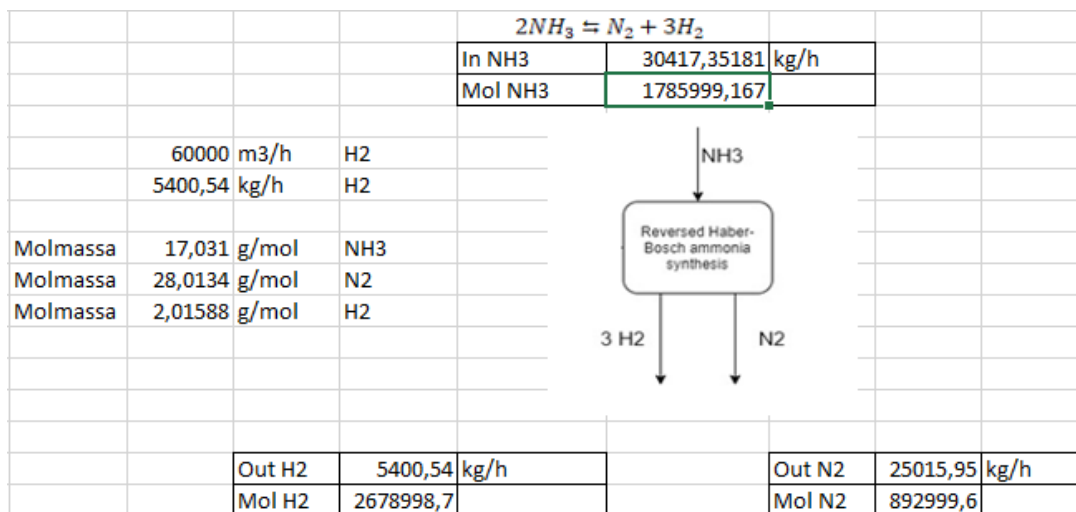
Mol berekening waterstof: $5400,54 \cdot \frac{1000}{2,01588} = 2678999 \text{ mol}$

Mol stikstof: $\frac{2678998,7}{3} = 892999 \text{ mol}$

Massastroom stikstof: $892999,6 \cdot \frac{28,0134}{1000} = 25016 \text{ kg/h}$

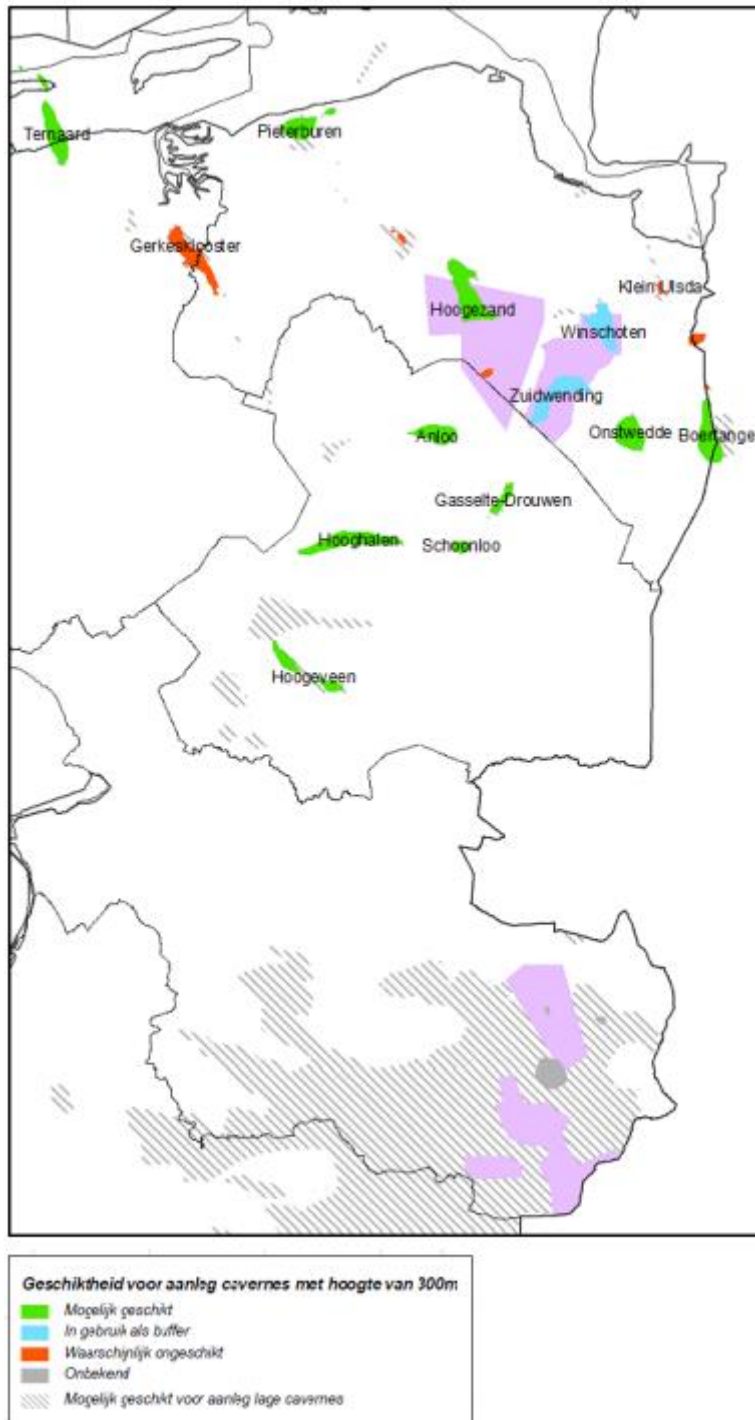
Mol ammoniak: $892999,6 \cdot 2 = 1785999$

Massastroom ammoniak: $17,031 \cdot \frac{1785999,167}{1000} = 30417 \text{ kg/h}$



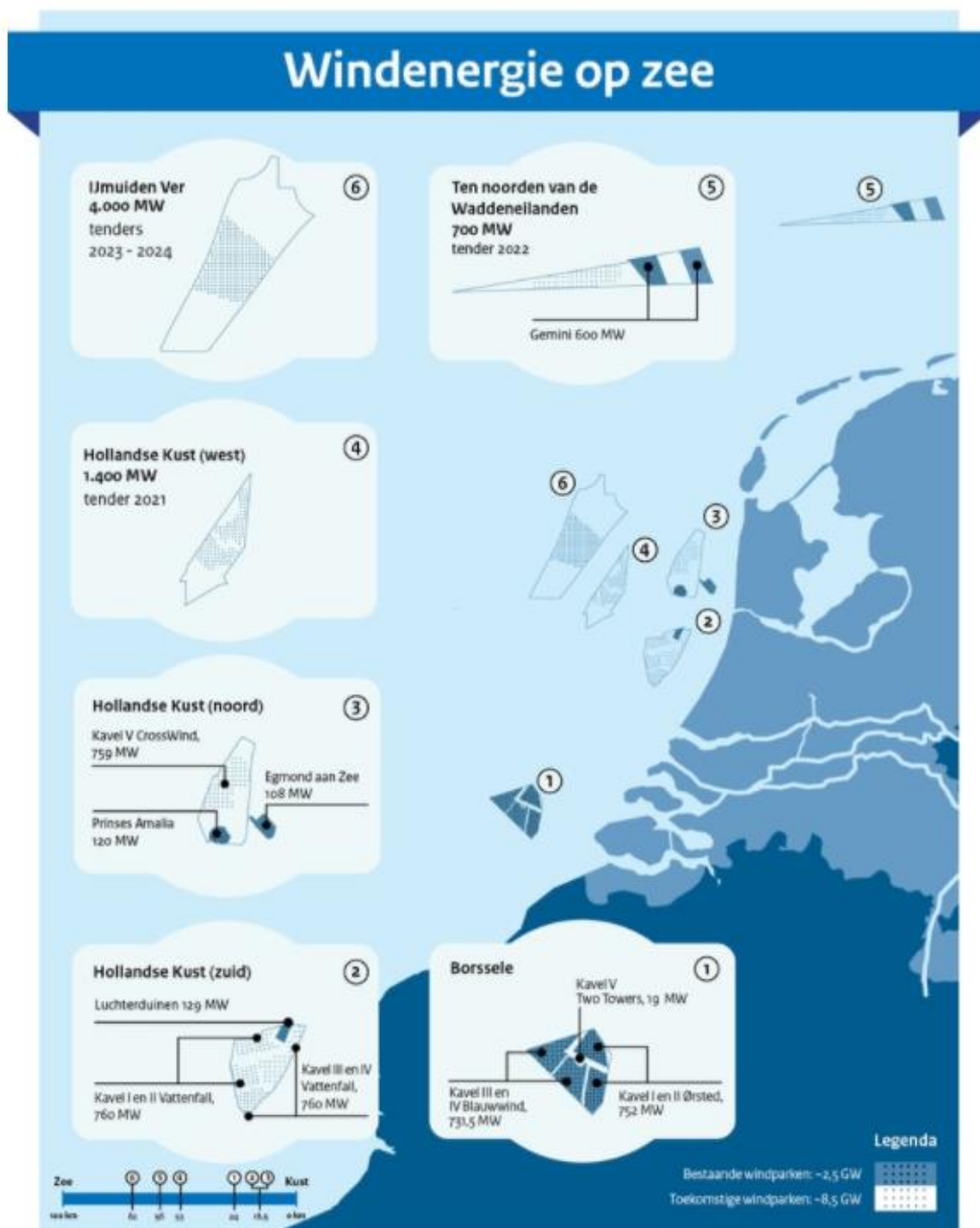
Figuur 18 Massa balans ammoniak kraken

APPENDIX X ZOUTSTRUCTUREN



Figuur 19 Overzicht zoutstructuren op land voor aanleg gasopslag (TNO, 2018)

APPENDIX XI WINDPARKEN OFFSHORE



Figuur 20 Windparken Noordzee (Noordzeeloket, 2021)

APPENDIX XII WINDSNELHEDEN

Tabel 21 Windkracht (varendoejesamen.nl, 2021)

<i>Beaufort</i>	<i>Windsnelheid km/h</i>	<i>Windsnelheid m/s</i>
0	0 - 1	0 - 0,2
1	1 - 5	0,3 - 1,5
2	6 - 11	1,6 - 3,3
3	12 - 19	3,4 - 5,4
4	20 - 28	5,5 - 7,9
5	29 - 38	8,0 - 10,7
6	39 - 49	10,8 - 13,8
7	50 - 61	13,9 - 17,1
8	62 - 74	17,2 - 20,7
9	75 - 88	20,8 - 24,4
10	89 - 102	24,5 - 28,4
11	103 - 117	28,5 - 32,6
12	>117	>32,6