



Het ontwerp van een waterstoflab voor lectoraat Delta Power

Tom de Baar

HZ University of Applied Sciences
Engineering

Versie: 3.0
30 – 7 – 2021, Kapelle

1e Examiner: W.J. Huibregtse
2e Examiner: M. Van Dootinck

Bachelorscriptie

HET ONTWERP VAN EEN WATERSTOFLAB VOOR LECTORAAT DELTA POWER

Onderzoek naar het meest geschikte ontwerp van een waterstoflab voor het
lectoraat Delta Power

Afstudeerscriptie Tom de Baar

Onderwijsinstelling:	HZ University of Applied Sciences
Opleiding:	Engineering
Studiejaar:	2020-2021
Semester:	8
1e Examinator:	W.J. Huibregtse
2e Examinator:	M. Van Dootinck
Opdrachtgever:	Lectoraat Delta Power
Document:	Bachelorscriptie
Datum van Publicatie:	30 – 7 – 2021
Versie:	2.0
Auteur:	Tom de Baar
Studentnummer:	72735

VOORWOORD

Voor u ligt de afstudeerscriptie: “Het ontwerp van een waterstoflab voor lectoraat Delta Power”. Deze scriptie is ter afsluiting van de opleiding Engineering op de HZ University of Applied Sciences te Vlissingen.

Tijdens deze afstudeerscriptie heb ik mij gericht op het ontwerpen van een waterstoflab voor het lectoraat Delta Power. Met dit onderzoek hoop ik een steentje bij te kunnen dragen aan de energietransitie en verder onderzoek naar de mogelijkheden van waterstof.

Bij deze wil ik graag Jan Maas en Bob Romboud bedanken voor de begeleiding gedurende mijn afstudeerstage. Dankzij jullie behulpzaamheid, kennis en gedrevenheid om mee te denken aan oplossingen heeft ervoor gezorgd dat ik mijn afstudeerperiode als erg positief heb ervaren. Bovendien is jullie enthousiasme voor waterstof aanstekelijk.

Daarnaast wil ik Wim Huibregtse bedanken voor de begeleiding en de feedback.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Tom de Baar

Kapelle, 30-7-2021

SAMENVATTING

Lectoraat Delta Power wil bijdragen aan de energietransitie door een waterstoflab te bouwen waar onderzoekers, bedrijven en studenten onderzoek kunnen verrichten naar waterstof. Met behulp van een waterstoflab kunnen er onderzoeken plaatsvinden naar het produceren van waterstof en het omzetten van waterstof naar energie.

Om te onderzoeken wat het meest geschikte ontwerp is voor een waterstoflab is de volgende onderzoeksvraag gesteld: *“Wat is het ontwerp van een waterstoflab voor HZ University of Applied Sciences, waarin componenten in verschillende configuraties met elkaar gekoppeld kunnen worden, dat voldoet aan de gestelde veiligheidseisen, regel -en wetgeving voor de bebouwde omgeving en de wensen van het bedrijfsleven?”*.

Tijdens het onderzoek is er onderzocht wat de meest geschikte componenten zijn voor het waterstoflab. Hierin is naar voren gekomen dat het waterstof moet beschikken over een alkaline elektrolyser, PEM elektrolyser, PEM brandstofcel en een waterstofketel.

De gekozen alkaline elektrolyser betreft de Alkaline Water Electrolyzer Stack – 60 Cell van LightBridge. Deze elektrolyser heeft een vermogensbereik van 1,8 tot en met 9,6 kW. Voor de PEM elektrolyser is gekozen voor de H-TEC Series-s: S30/50. Deze elektrolyser levert een vermogen van 1,28 tot en met 9,38 kW.

De geselecteerde brandstofcellen voor het waterstoflab zijn de H-5000 en de H-3000 PEM Fuel cell van Horizon Educational. De H-5000 brandstofcel levert een vermogen tot 5 kW en de H-3000 een vermogen tot 3 kW.

Momenteel zijn er nog geen waterstofketels op de markt beschikbaar. Verschillende producenten zijn nog steeds bezig met onderzoek naar waterstofketels. Hierdoor kon er voor dit onderzoek geen concreet ontwerp gemaakt worden van een installatie met een waterstofketel.

De veiligheidseisen van het waterstoflab zijn opgesteld aan de hand van de NPR-7910. Hierin staat beschreven hoe de gevarenezone van het waterstoflab moet worden ingedeeld en hoeveel ventilatie er in het waterstoflab moet plaatsvinden ten tijden van een lekkage. Tevens is er onderzoek verricht naar het detecteren van lekkages in het waterstoflab. Het waterstoflab moet beschikken over waterstofsensoren en waterstofdetectietape op plaatsen waar er een verhoogde kans is op een lekkage.

De uitkomst van het onderzoek is een waterstoflab dat bestaat uit vier modulaire opstellingen. De opstellingen bestaan uit de alkaline elektrolyser, PEM elektrolyser, brandstofcel en de waterstofketel. Door het waterstoflab op te delen in verschillende opstellingen kunnen de componenten in verschillende configuraties worden opgesteld. Ook is het mogelijk om de installaties buiten te plaatsen, hier kan waterstof vervliegen waardoor explosieve atmosferen vermeden kunnen worden.

AFKORTINGEN

AFC	Alkaline Fuel Cell
ATEX	Atmosphere Explosible
AWE	Alkaline Water Electrolyser
CO ₂	Koolstofdioxide
Cv-ketel	Centrale verwarmingsketel
H ₂	Waterstof
HAZOP	Hazard and operability study
KOH	Kalium hydroxide
LEL	Lower Explosive Limit
O ₂	Zuurstof
OH ⁻	Hydroxide
MEC	Microbial Electrolysis Cells
NBR	Nitrilbutadiëenrubber
NPR	Nederlandse praktijkrichtlijn
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PE	Polyethyleen
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PFD	Proces Flow Diagram
POM	Polyoxymethyleen
PVC	Polyvinylchloride
RVS	Roestvast staal
SBR	Styrene-butadiene rubber
SOE	Solid Oxide Electrolyser
UEL	Upper Explosive Limit

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding.....	6
1.1 Aanleiding.....	6
1.2 Probleemanalyse	6
1.3 Doelstelling.....	8
1.4 Vraagstelling	9
2. Theoretisch kader	10
2.1 Wat is waterstof	10
2.2 Veiligheid	10
2.3 Regelgeving voor waterstof in gebouwde omgeving	14
2.4 Elektrolyser	15
2.5 Brandstofcel	17
2.6 Waterstofketel.....	20
3. Methode.....	22
3.1 Onderzoeksmethode	22
3.2 Methode per deelvraag.....	22
3.3 Betrouwbaarheid & validiteit	24
4. Resultaten.....	26
4.1 Componentkeuze.....	26
4.2 gedetailleerd ontwerp	28
4.3 Kostenindicatie	34
5. Conclusie	36
6. Discussie	37
7. Aanbevelingen.....	38
Referenties	39
Bijlage A: Ontwerp van het waterstoflab	44
Bijlage B: Veilig werken met waterstofinstallaties.....	62
Bijlage C: Tabel met zone afmetingen.....	75
Bijlage D: Datasheets.....	76
Bijlage E: Interview met Emile Jackson en Oscar Grooten	79
Bijlage F: Position paper HZ UAS Waterstof-onderwijs en -onderzoek	81

1. INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de aanleiding en de probleemanalyse. Vanuit de probleemanalyse worden de doelstelling, hoofdvraag en deelvragen geformuleerd.

1.1 AANLEIDING

De industrie in Nederland stootte in 2019 54,5 megaton CO₂ uit (CBS, 2021). 3,8 megaton hiervan was afkomstig van YARA International en 4 megaton van DOW Benelux (Beek, 2020; YARA, 2019). Beide bedrijven zijn gevestigd in Zeeland en zorgen gezamenlijk voor 14% van de totale CO₂ uitstoot van de Nederlandse industrie. De hoge uitstoot van YARA en DOW is deels te danken aan de productie van de waterstof die zij nodig hebben om verschillende processen te kunnen realiseren. Naast YARA en DOW is ook Zeeland Refinery een groot verbruiker van waterstof. Samen zorgen deze drie bedrijven voor 450.000 ton van de 800.000 ton aan waterstof die jaarlijks door bedrijven in Nederland wordt geproduceerd (Balkenende, 2021).

Het produceren van waterstof voor en door de industrie zonder dat er CO₂ vrijkomt is een belangrijk speerpunt van de Regionale Energiestrategie Zeeland. De provincie Zeeland heeft daarnaast als hoge prioriteit dat waterstof de grondstof moet worden voor de procesindustrie. Op deze manier draagt Zeeland bij met het behalen van het Klimaatakkoord van Parijs (Zeeuws Energieakkoord, sd).

Het lectoraat Delta Power is één van de lectoraten binnen de HZ University of Applied Sciences. Delta Power richt zich op het onderzoeken van het duurzaam opwekken en opslaan van energie. Hierdoor wil men een steentje bijdragen aan de energietransitie. De focus ligt hierbij op het opwekken van energie in deltagebieden zoals de provincie Zeeland.

In 2020 is het Lectoraat Delta Power gestart met onderzoek naar waterstof. De afgelopen jaren is de vraag naar waterstof erg toegenomen, de verwachting is dat deze trend zich aankomende jaren door zal trekken (IEA, 2019). Delta Power wil een bijdrage kunnen leveren aan de ontwikkelingen op het gebied van waterstof door studenten hiermee kennis te laten maken. Maar ook door zelf onderzoek te doen naar de mogelijkheden van waterstof. Door middel van een waterstoflab op de HZ University of Applied Sciences wil Delta Power kennis en expertise opbouwen in deze sector. Naast kennis en expertise speelt veiligheid een belangrijke rol in het onderzoek naar waterstof. Leren om te werken met een explosieve stof als waterstof is essentieel voor de veiligheid van studenten en onderzoekers. Hierdoor worden gevaarlijke situaties niet alleen vermeden, maar wordt men ook opgeleid om in de toekomst veilig met waterstof te werken.

1.2 PROBLEEMANALYSE

Om de doelen te realiseren van het klimaatakkoord van Parijs moet ook Nederland overstappen van fossiele brandstoffen naar duurzame energie. Duurzame energie is energie die afkomstig is van natuurlijke bronnen en processen die niet uitgeput kunnen worden, zoals zonlicht of wind (NRDC, 2018). Deze overgang naar duurzame energie wordt ook wel de energietransitie genoemd (RIVM, sd). Waterstof is een energiedrager waarnaar de vraag afgelopen jaren is toegenomen. Doordat elektriciteit gebruikt wordt om water om te zetten in waterstof, wordt waterstof gezien als een energiedrager en niet als een energiebron (HIER, 2017). De verwachting is dat de vraag naar waterstof als duurzame energiedrager in de toekomst toe blijft nemen. In 2030 wordt wereldwijd

een stijging in de vraag naar waterstof verwacht van 7% in de olieraffinaderij, 31% in de chemische industrie en een verdubbeling van de vraag in de metaalindustrie (IEA, 2019). Waterstof kan gebruikt worden als grondstof, brandstof voor de industrie, vervoer en verwarming van huizen. Tevens is het mogelijk om waterstof in grote hoeveelheden op te slaan (Gasunie, sd).

Na productie kan waterstof opgedeeld worden in drie verschillende soorten op basis van de productiemethode: Grijs waterstof, blauw waterstof en groen waterstof (Gasunie, sd). Grijs waterstof is waterstof dat wordt gemaakt door middel van aardgas of kolen. Bij de productie van dit waterstof komt er CO_2 vrij, dat schadelijk is voor het milieu. Blauw waterstof is waterstof dat ook wordt geproduceerd door middel van aardgas of kolen. Daarentegen wordt bij blauw waterstof de CO_2 opgevangen en opgeslagen, waardoor deze niet in de atmosfeer komt. Groen waterstof is waterstof dat geproduceerd wordt door energie afkomstig uit duurzame bronnen. Met behulp van elektrolyse wordt deze groene elektriciteit door water geleid. Hierbij splitsen de moleculen waardoor er waterstof en zuurstof ontstaat. Doordat er geen CO_2 wordt geproduceerd bij groen waterstof is dit de meest duurzame vorm (Shell, sd).

Op het moment produceert de Nederlandse industrie hoofdzakelijk grijs waterstof door het gebruik van aardgas. Door deze productie komt jaarlijks 13 megaton CO_2 per jaar vrij. Dit is 8% van de totale CO_2 uitstoot in Nederland. Deze CO_2 uitstoot draagt bij aan het opwarmen van het klimaat. Het is daarom van belang om in de komende jaren de overgang van grijs naar groen waterstof verder te stimuleren (Rijksoverheid, sd).

Lectoraat Delta Power wil een bijdrage leveren aan de energietransitie door studenten de mogelijkheid te bieden om onderzoek te verrichten naar waterstof. Daarnaast wil Delta Power door middel van onderzoek bedrijven helpen die momenteel en in de toekomst gebruik maken van waterstof. Om deze impliciete kennis en expertise op te doen op het gebied van waterstof moet er in de nabije toekomst een waterstoflab worden gebouwd. Dit waterstoflab moet als plek gaan dienen waar studenten, bedrijven en het lectoraat onderzoek kunnen doen naar het produceren van waterstof en experimenteren met het omzetten van waterstof naar energie. Het waterstoflab moet gebouwd worden in een nader te bepalen locatie van de HZ University of Applied Sciences.

Delta Power wil een waterstoflab dat beschikt over elektrolyzers, brandstofcellen en een waterstofketel. Een eis van Delta Power is dat het waterstoflab beschikt over twee verschillende type elektrolyzers met een vermogen tussen de 5 tot en 10 kW. Naast de elektrolyzers moet er beschikking zijn over een brandstofcel met een output van minstens 2,5 kW en een brandstofcel met een output van minstens 4 kW. De specificaties van de waterstofketel zijn afhankelijk van die leverancier. Op het moment zijn er namelijk nog geen waterstofketels commercieel beschikbaar en wordt er door producenten nog getest met dit type ketel.

Momenteel bestaan er meerdere soorten elektrolyzers en brandstofcellen. Delta Power wil weten welke type elektrolyzers en brandstofcellen geschikt zijn voor het waterstoflab. De meest geschikte apparatuur zal naast de commerciële beschikbaarheid ervan, ook afhankelijk zijn van de voorkeur van Delta Power en het bedrijfsleven.

Delta power heeft als eis gesteld dat de elektrolyser, brandstofcel en waterstofketel modulair moeten zijn. Door de componenten modulair te maken kunnen zij makkelijker verplaatst worden en in verschillende volgorde worden opgesteld. Daarnaast wil Delta Power graag dat het ook mogelijk

is om alle componenten naar de buitenlucht te verplaatsen, hier kan waterstof vervliegen en kan er minder snel een explosieve atmosfeer ontstaan (Amyotte & Rigas, 2013). Om dit te realiseren dienen de componenten modulair en mobiel zijn.

In de Position Paper (Maas, 2020) (bijlage G) voor het waterstoflab houdt Delta Power rekening met een budget van €220.000. Hiervan is in totaal €140.000 beschikbaar gesteld voor elektrolyzers, brandstofcellen en een waterstofketel. De overige €80.000 wordt besteed aan een buffervat, gasflessen, kabels en leidingen, meet -en regelapparatuur, waterstofdetectie, ventilatie en onvoorziene kosten. In dit budget zijn de kosten voor installatie niet meegenomen.

Waterstof is het meest ontvlambare element in het periodiek systeem (Lenntech, sd). Het is daarom van belang dat het waterstoflab ten alle tijden veilig is voor de gebruikers en de mensen in de omgeving. Veiligheid speelt in de industrie een belangrijke rol, door het waterstoflab kunnen studenten hier al vroegtijdig kennis mee maken.

Daarnaast moet het waterstoflab voldoen aan de huidige wet -en regelgeving die gesteld is voor waterstof. Echter is er geen concrete wet -en regelgeving voor het gebruik van waterstof in de bebouwde omgeving (Hengeveld, Meij, & Aué, 2020). Hierdoor zal er onderzoek gedaan moeten worden naar hoe het waterstoflab gerealiseerd kan worden binnen de ruimte die de wet -en regelgeving momenteel biedt.

Om de kennis van studenten, onderzoekers en bedrijven te vergroten op het gebied van waterstof is er een waterstoflab nodig. Onderzoek naar het produceren en gebruiken van waterstof helpt Zeeland en de rest van Nederland om zich voor te bereiden op de energietransitie. Door middel van het bouwen van een waterstoflab in Zeeland wil Delta Power hieraan een steentje bijdragen.

1.3 DOELSTELLING

De doelstelling van het lectoraat Delta Power is het opzetten van een waterstoflab waarin het lectoraat, studenten en bedrijven kennis op kunnen doen en leren werken met waterstof. Het waterstoflab moet beschikking hebben over twee verschillende type elektrolyzers, brandstofcellen en een waterstofketel. Het moet mogelijk zijn om al deze componenten op elkaar aan te sluiten zodat er geëxperimenteerd kan worden met verschillende opstellingen en onderzoeken. Naast een ontwerp voor het waterstoflab wil Delta Power een prijsindicatie van de kosten voor de aanschaf van de verschillende onderdelen van het waterstoflab.

In dit onderzoek zal geen onderzoek gedaan worden naar de activiteiten die plaats kunnen vinden in het waterstoflab. Daarentegen wordt er wel onderzoek gedaan naar hoe gebruikers veilig in het waterstoflab kunnen werken. De onderzoeken die plaatsvinden in het waterstoflab en het gebruik van het waterstoflab is afhankelijk van Delta Power.

Het opzetten van een waterstoflab voor studenten, onderzoekers en bedrijven is maatschappelijk relevant door de huidige energietransitie. Door de mogelijkheid te bieden om onderzoek te doen naar waterstof kan men zich voorbereiden op verdere ontwikkelingen binnen de waterstofsector en worden studenten opgeleid om veilig met waterstof te werken. Tijdens de waterstof veldwerkraadpleging kwam naar voren dat bedrijven binnen 5-10 jaar meer behoefte hebben aan nieuwe collega's die gespecialiseerd zijn in waterstof, dan het omscholen van het huidige personeel.

1.4 VRAAGSTELLING

Vanuit de probleemstelling is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd.

Wat is het ontwerp van een waterstoflab voor de HZ University of Applied Sciences, waarin componenten in verschillende configuraties met elkaar gekoppeld kunnen worden, dat voldoet aan de gestelde veiligheidseisen, regel -en wetgeving voor de bebouwde omgeving en de wensen van het bedrijfsleven?

Door de deelvragen te beantwoorden kan er antwoord gegeven worden op de hoofdvraag.

1. Wat zijn de eisen waaraan het waterstoflab moet voldoen?
2. Welk conceptueel ontwerp komt voort uit de gestelde eisen van het waterstoflab?
3. Wat is het gedetailleerde ontwerp van het waterstoflab?
4. Wat zijn de kosten voor het waterstoflab?

2. THEORETISCH KADER

Aan de hand van dit hoofdstuk wordt er toelichting gegeven op de benoemde begrippen en de hoofdvraag. Dit zal gedaan worden aan de hand van verschillende literatuur over het desbetreffende onderwerp.

2.1 WAT IS WATERSTOF

Waterstof is het meest voorkomende element op aarde. Onder normale omstandigheden komt waterstof alleen voor als een gas. Daarnaast is het ook het lichtste element dat voorkomt in het periodiek systeem (TNO, sd). Waterstof komt nauwelijks voor als een los atoom aangezien het zich snel bindt met andere atomen. Als twee waterstofatomen zich binden ontstaat er diwaterstof (H_2), dit wordt ook wel waterstofgas genoemd (Jak, 2019).

Waterstof is een geurloos, kleurloos, smaakloos en niet giftig gas dat erg licht ontvlambaar is, de benodigde energie om waterstof te ontsteken is 0,02 mJ (Waterstofnet, sd). Bij een druk van 1 bar heeft waterstof een hoge energie dichtheid van 120 mJ per kilogram. Aardgas uit Groningen heeft ter vergelijking een energie dichtheid van 38 mJ per kilogram en heeft 0,29 mJ aan energie nodig voor een ontsteking (Gasunie, sd; Waterstofnet, sd).

2.2 VEILIGHEID

2.2.1 INHERENTE VEILIGHEID

Inherente veiligheid betekent het vermijden, elimineren of reduceren van mogelijke gevaren in plaats van het beschermen tegen gevaren. Hierbij kan gedacht worden aan het vervangen van gevaarlijke stoffen, het vereenvoudigen van een proces of het verhogen van tolerantie voor fouten (Pijnenburg, 2017).

MINIMALISERING

Door het minimaliseren van de gevaren die waterstof met zich meebrengt kan er een veiligere werkomgeving worden gerealiseerd. De opslag van waterstof voor het waterstoflab brengt een ontploffingsgevaar met zich mee. Door zo min mogelijk waterstof op te slaan, of alleen waterstof op te slaan dat gebruikt wordt, kan het ontploffingsgevaar en de sterkte van de ontploffing verminderd worden. Tevens kan men gevaar minimaliseren door buiten te werken met waterstof in plaats van binnen in een gebouw, doordat waterstof hier sneller vervliegt neemt de kans op explosie af (Amyotte & Rigas, 2013).

VEREENVOUDIGEN

Door het vereenvoudigen van de waterstofopslag en de installatie van het waterstoflab kunnen gevaarlijke situaties worden voorkomen. Om de kans op lekkages te verminderen is het van belang om zo min mogelijk lassen en flenzen te gebruiken. De kans op lekkages zijn op deze gedeeltes namelijk het grootst. Tevens is het van belang dat de flessen of vaten voor de waterstofopslag bestemd zijn tegen vermoeiing. Door het vele leeg laten lopen en vullen van flessen of vaten kan er vermoeidheid ontstaan van het materiaal. Daarnaast moeten er materialen gebruikt worden die bestendig zijn tegen waterstof om degradatie tegen te gaan (Amyotte & Rigas, 2013).

ELIMINEREN

Naast het opslaan van waterstof als gas kan waterstof ook op worden geslagen als vloeistof of als metaalhydride. Bij metaalhydride koppelen de waterstofmoleculen zich aan een metaal waardoor waterstof opgeslagen kan worden. Het opslaan van waterstof als vloeistof en als metaalhydride is gunstig voor het verminderen van de gevaren die waterstof met zich meebrengt. Desalniettemin brengen deze typen opslag andere problemen met zich mee. Voor het opslaan van waterstof als vloeistof zijn grote cryogene tanks nodig. Ook moet het waterstof op een temperatuur gehouden worden van -252°C om het in vloeibare toestand te houden (Amyotte & Rigas, 2013). Alhoewel het opslaan van waterstof door middel van metaalhydride momenteel als inherent veiliger wordt gezien, brengt het produceren van een metaalhydride en het scheiden van de waterstof van het metaal bij een gematigde temperatuur veel uitdagingen met zich mee (Pasman & Rogers, 2010).

2.2.2 WATERSTOF EN EXPLOSIEGEVAAR

Een explosief waterstofmengsel kan op verschillende manieren worden ontstoken, waterstof is explosief bij een volume tussen de 4 en 75 procent (Holstein, van Gerwen, Douma, van Delft, & Saric, 2018). Naast open vuur zijn er een aantal veel voorkomende mogelijke ontstekingsbronnen, zoals vonkontsteking en ontsteking door een heet oppervlak (IFV, 2020).

Een vonk kan ontstaan als er genoeg potentiaalverschil is tussen twee geleidende objecten en er een doorslag plaatsvindt door een niet geleidend voorwerp tussen deze objecten (IFV, 2020). In een aantal experimenten hebben Swain, Filoso & Swain (2004) echter laten zien dat waterstof niet altijd ontstoken wordt bij het gebruik van schakelaars of elektrische apparatuur. In tabel 1 staan resultaten van dit onderzoek met de ontstekingsbron en de ontstekingskans.

Ontstekingsbron	ontstekingskans
Lichtschakelaar	Geen ontsteking bij concentraties tussen de 4-10 vol.%
Nat-droogzuiger	Ontsteking vanaf concentraties groter dan 6 vol.%
Trekkoord plafondlamp	Ontsteking vanaf concentraties groter dan 8 vol.%
Motor van garagedeur	Geen ontsteking bij concentraties tussen de 4-10 vol.%

Tabel 1: Mogelijke ontstekingsbronnen met de kans tot ontsteking (Swain, Filoso, & Swain, 2004).

Waterstof kan tevens ontsteken als het in aanraking komt met een warm oppervlak. Het warme oppervlak zorgt ervoor dat de waterstof gaat oxideren. Als de temperatuur hoog genoeg is kan de oxidatiereactie meer warmte opwekken dan er aan de omgeving wordt afgestaan. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat waterstof uiteindelijk tot ontsteking komt (Gummer & Hawksworth, 2008).

Om de kans op ontsteking van waterstof verder te elimineren dienen leidingen en apparaten voor gebruik gespoeld te worden met stikstof. Hierdoor wordt zuurstof verdreven en kan er geen

explosief mengsel vormen van waterstof en zuurstof (O. Grooten, persoonlijke communicatie, 10-6-2021)

2.2.3 GEZONDHEID

Waterstof kan in een gesloten ruimte de zuurstof in de lucht verdringen. Dit kan tot gevolg hebben dat de mensen die aanwezig zijn in deze ruimte uiteindelijk apathisch en bewusteloos raken. Men kan al klachten krijgen bij een zuurstofconcentratie onder de 18 vol.%. Deze klachten kunnen zich uiten in een verhoogde hartslag en gebrek aan concentratie. Voor een zuurstofconcentratie van 18 vol.% is 14,3 vol.% waterstof nodig (IFV, 2020).

2.2.4 AANTASTING DOOR WATERSTOF

Kunststoffen kunnen chemisch reageren met waterstof waardoor de fysische eigenschappen worden aangetast. Zo kan kunststof het waterstof absorberen en kan het gaan zwellen. De aantasting van een materiaal door waterstof is afhankelijk van verschillende factoren, zoals temperatuur, tijd van blootstelling en druk (Hermkens, et al., 2018).

De meest voorkomende kunststoffen die worden gebruikt in het gasnet zijn PE, hard- en slagvast PVC en de rubbers SBR en NBR. Bij PE is tijdens een beproeving van 10 jaar als waterstofleiding geen vermindering in kwaliteit vastgesteld. Er wordt verwacht dat dit in de toekomst ook niet op zal gaan treden. PVC toonde na vier jaar nog geen sporen van degradatie (Melaina, Antonia, & Penev, 2013). De verwachtingen zijn hier dat er ook op de lange termijn geen degradatie plaats zal vinden. De rubbers NBR en SBR hebben op korte termijn geen degradatie opgelopen van waterstof. Ook op lange termijn wordt verwacht dat deze rubbers tegen waterstof bestendig zijn (Melaina, Antonia, & Penev, 2013). Het kunststof POM heeft gedurende twee jaar bij 8 bar en 62% waterstof geen sporen van degradatie laten zien. De effecten op lange termijn zijn bij dit type kunststof echter nog onbekend (Hermkens, et al., 2018).

Metalen kunnen door waterstof ook aangetast worden en degraderen in kwaliteit. Deze achteruitgang in kwaliteit uit zich in vermoeiing, waterstofverbrossing of een verandering in treksterkte (Hermkens, et al., 2018). In het gasnetwerk worden momenteel diverse koolstofstaalsoorten gebruikt. Bij het transporteren van waterstof door deze leidingen zal er geen waterstofverbrossing optreden, mits de temperatuur normaal is. Als er water in de leidingen staat kan er echter wel waterstofverbrossing optreden (Hermkens, et al., 2018, p. 33). Waterstof tast de trek eigenschappen aan van de staalsoorten die gebruikt worden in het gasnet. Echter is deze aantasting minimaal waardoor het geen invloed heeft op de prestaties van het staal. De vermoeiing van staal door waterstof is gelijk aan de vermoeiing van staal door aardgas. Dit geldt alleen als er een kleine hoeveelheid zuurstof in de waterstof aanwezig is. Ook de toegepaste RVS leidingen in het gasnet zouden onder de huidige omstandigheden tegen waterstof bestand zijn (Hermkens, et al., 2018).

2.2.5 VOORKOMEN VAN GEVAARLIJKE SITUATIES

DETECTEREN

Het werken met waterstof brengt gevaar met zich mee. Om ervoor te zorgen dat er geen gevaarlijke situaties ontstaan tijdens het werken met waterstof, moet ervoor gezorgd worden dat dit wordt voorkomen.

Waterstof kan, net als aardgas, gedetecteerd worden met behulp van een geurstof. De meest voor de hand liggende keuze hierbij zou zijn om tetrahydrothiofeen te gebruiken. Deze geur wordt ook toegevoegd aan aardgas en is hierdoor voor mensen direct herkenbaar. Het nadeel van tetrahydrothiofeen is dat het gemaakt wordt op basis van zwavel. Een eigenschap van zwavel is dat het de levensduur van de katalysator in brandstofcellen vermindert (IFV, 2020).

Waterstof kan ook gedetecteerd worden door middel van sensoren. De locatie van de waterstofsensoren is van belang voor de detectie van waterstof. Er moet onder andere rekening gehouden worden met het stijgen van waterstof naar het dak, uitstroomrichting, verdunning en andere luchtstromen binnen een ruimte. Het aanbevolen alarmniveau voor een detectie van waterstof is bij 1 vol.% waterstof in een ruimte. Bij dit niveau moeten de gebruikers gealarmeerd worden voor het ontstaan van een mogelijk explosief waterstofmengsel. Bij 2,4 vol.% wordt aangeraden om alle systemen die waterstof bevatten af te sluiten en direct te starten met ventileren (Hysafe, 2009). Een nadeel van deze sensoren is dat deze verzadigd kunnen raken met waterstof. Nadat een sensor waterstof heeft gedetecteerd en een alarmsignaal heeft gegeven, duur het enkele minuten voordat de sensor weer opnieuw waterstof kan detecteren (E. Jackson, persoonlijke communicatie, 8 juni 2021).

Een andere mogelijkheid om een waterstoflek te kunnen detecteren is door gebruik te maken van een coating of tape die van kleur verandert als het in aanraking komt met waterstof. Dit zorgt ervoor dat het visueel inspecteren van de apparatuur op lekkage eenvoudiger wordt gemaakt (IFV, 2020).

VENTILEREN

Door te ventileren wordt voorkomen dat waterstof zich in een ruimte ophoopt, hierdoor wordt het explosieve mengsel verdunt en neemt de tijd waarin het mengsel explosief is af (IFV, 2020).

Het creëren van natuurlijke ventilatie door ramen en deuren open te zetten kan ervoor zorgen dat waterstof uit een ruimte wordt gedreven. Ook kunnen er ventilatieopeningen worden geplaatst om de natuurlijke ventilatie te bevorderen. Het is belangrijk om hierbij te letten op de hoogte en grootte van deze openingen. Aangezien windrichting, windsnelheden en temperaturen niet constant zijn is het reguleren van natuurlijke luchtstromen in de praktijk lastig. Doordat waterstof een licht element is zal het opstijgen naar het hoogste punt in een ruimte. Door op het hoogste punt waterstof de mogelijkheid te geven een ruimte te verlaten, kan er ook geventileerd worden (IFV, 2020).

Het gebruiken van luchtblazers, afzuigventilators en een combinatie daarvan kunnen in tegenstelling tot natuurlijke ventilatie gecontroleerd lucht aan en afvoeren in een ruimte. Desalniettemin is het nadeel van mechanische ventilatie dat deze kan falen. Ook moet bij het gebruik van deze apparatuur rekening gehouden worden met mogelijke vonken die voor ontsteking van waterstof zouden kunnen zorgen (IFV, 2020).

2.2.6 OPSLAG VAN WATERSTOF

Waterstof kan worden opgeslagen door het te comprimeren, als cryogene vloeistof en door middel van een metaalhydride. Bij een metaalhydride wordt waterstof gebonden aan de atomen van een metaal (Lyzard, sd). De meest voorkomende methode voor waterstofopslag is als gecompriëerd gas. Waterstof wordt hierbij opgeslagen bij een druk die op kan lopen tot 750 bar. Een keerzijde van het opslaan van waterstof door compressie is het verlies aan energie. Bij het comprimeren van waterstof gaat 6% van de energie verloren (Waterstofnet, sd).

Het is ook mogelijk om waterstof op te slaan bij een lage druk, bij een lage druk en temperatuur wordt waterstof vloeibaar. Omdat er een constante energietoevoer nodig is om de waterstof vloeibaar te houden bij -252°C, gaat 25% van de energie van waterstof verloren (Waterstofnet, sd).

2.3 REGELGEVING VOOR WATERSTOF IN GEBOUWDE OMGEVING

Voor regelgeving wordt waterstof veelal met aardgas vergeleken, desalniettemin hebben beide stoffen andere eigenschappen. Aardgas heeft bijvoorbeeld een explosiegrens van tussen de 5,6 en 14% in lucht. Ook heeft aardgas meer energie nodig om tot ontsteking te komen met 0,29 mJ tegenover 0,02 mJ van waterstof. Daartegenover staat dat waterstof een erg licht element is en in de buitenlucht snel vervliegt. Hierdoor ontstaat in de buitenlucht geen explosieve omgeving (Holstein et al., 2018).

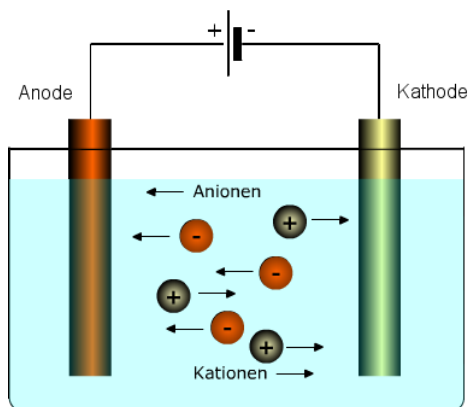
Matthijssen (2006) van het RIVM heeft onderzoek verricht naar de veiligheidsafstanden bij waterstoftankstations inclusief waterstofproductie. Hieruit kwam naar voren dat de veiligheidsafstand bij een elektrolyser 0 meter bedraagt. De reden hiervan is dat tijdens het produceren van waterstof er in de elektrolyser erg weinig waterstof aanwezig is, hierdoor spreekt men niet van een opslag (Holstein et al., 2018). Volgens de PGS-35 geldt voor de opslag van waterstof een afstand van 2,5 meter bij 450 bar en 4 meter afstand bij meer dan 1000 bar. Deze minimum afstanden zijn echter niet dezelfde afstanden die gelden voor personen die werken in het waterstoflab. De afstanden voor personen die werken in het waterstoflab zijn afhankelijk van de zonering. Deze zonering wordt bepaald aan de hand van de ATEX richtlijnen en is afhankelijk van de ventilatie. In bijlage C is een tabel opgenomen over de zoneafmetingen in verschillende situaties.

Bij het werken met explosiegevaarlijke stoffen zoals waterstof, is het belangrijk om te voorkomen dat deze stoffen in de atmosfeer tot ontploffing worden gebracht. Dit kan worden bereikt door het gebruik van gesloten installaties waar geen noemenswaardige lekkages kunnen optreden. Als het niet mogelijk is om te voorkomen dat explosiegevaarlijke stoffen ontsnappen moet er veelvuldig geventileerd worden

Volgens ATEX 153 artikel 3 “Voorkoming van en bescherming tegen explosies”, moet er altijd voorkomen worden dat er een explosieve atmosfeer kan ontstaan. Tevens moet de ontsteking van waterstof in de mogelijke atmosfeer vermeden worden. Om te voorkomen dat er een explosieve atmosfeer kan ontstaan is het van belang om de omgeving adequaat te ventileren (Europese commissie van gemeenschappen, 2003).

2.4 ELEKTROLYSER

Een elektrolyser is een systeem dat doormiddel van elektriciteit water splitst in waterstof en zuurstof. Het vrijgekomen waterstofgas kan vervolgens worden opgevangen en opgeslagen. Dit proces staat beter bekend als elektrolyse. Een elektrolyser bestaat in de meest basale vorm uit een kathode, anode en een membraan of elektrolyt. De kathode en anode worden in het water gestopt waarna er tussen de elektroden een elektrische spanning door een externe bron wordt aangebracht. Dit zorgt ervoor dat de positieve kationen naar de kathode bewegen en de negatieve anionen naar de anode toe bewegen (Cummins, 2020). In figuur 1 is een visuele weergave te zien van het proces waarbij de anionen richting de anode bewegen en de kationen richting de kathode.

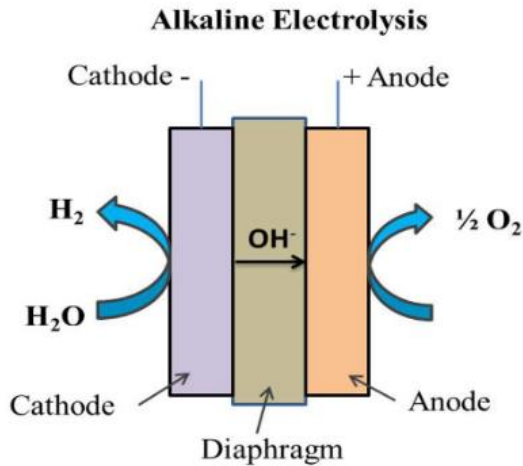


Figuur 1: De anionen bewegen richting de anode waarbij de kationen richting de kathode bewegen (Chemgaroo)

Er kan binnen elektrolyzers onderscheid gemaakt worden tussen verschillende typen. De meest ontwikkelde en voorkomende typen elektrolyzers zijn de alkaline elektrolyzers (AWE), Proton Exchange Membrane (PEM) elektrolyzers, Solid Oxide elektrolyzers (SOE) en Microbial electrolysis cells (MEC) (Kumar & Himabindu, 2019). Naast deze vier typen elektrolyzers zijn er nog meer verschillende typen. Echter zijn deze technieken nog niet commercieel beschikbaar of zitten ze nog in de ontwikkelingsfase. Dit geldt ook voor MEC, deze techniek is nog niet commercieel beschikbaar. Daarom zal dit type elektrolyser niet verder worden toegelicht.

2.4.1 AWE (ALKALINE WATER ELECTROLYSIS)

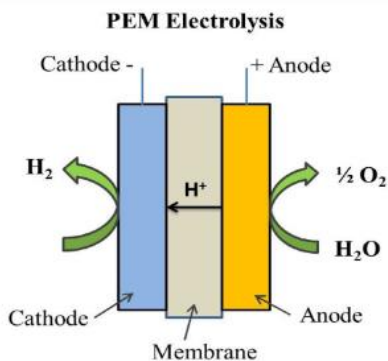
Het produceren van waterstof door middel van alkaline elektrolyse is een fenomeen dat al bestaat sinds 1789. Sindsdien is het wereldwijd een van de meest gebruikte vormen van elektrolyse. Bij alkaline elektrolyse worden hydroxide-ionen (OH^-) door het elektrolyt van de kathode naar de anode gestuurd. Dit elektrolyt is vaak een oplossing van natrium- of kaliumhydroxide (Energy efficiency & renewable energy, sd). Aan de kant van de kathode worden twee moleculen van het elektrolyt gesplitst tot een molecuul waterstof en twee hydroxide-ionen. Het geproduceerde waterstof verdwijnt via het kathodeoppervlak om uiteindelijk opgevangen te worden als waterstofgas (Kumar & Himabindu, 2019). In figuur 2 staat een schematische weergave van dit proces.



Figuur 2: Een schematische weergaven van alkaline elektrolyse (Kumar & Himabindu, 2019).

2.4.2 PEM (PROTON EXCHANGE MEMBRANE)

Bij PEM elektrolyse wordt gebruik gemaakt van een ionisch geleidend polymeer in plaats van een vloeistof zoals bij alkaline elektrolyse. Dit geleidende polymeer wordt gezien als het membraan (Cummins, sd). PEM elektrolyse vindt plaats door water richting de anode te pompen waar het wordt gesplitst in zuurstof (O_2), waterstofprotonen (H^+) en elektronen (e^-). De waterstofprotonen worden door middel van het membraan naar de kathode getransporteerd. De elektronen verlaten de anode door een extern stroomcircuit. Aan de kant van de kathode koppelen de protonen en elektronen zich weer om waterstof te maken (Kumar & Himabindu, 2019). In figuur 3 wordt een schematisch beeld van dit proces gegeven.

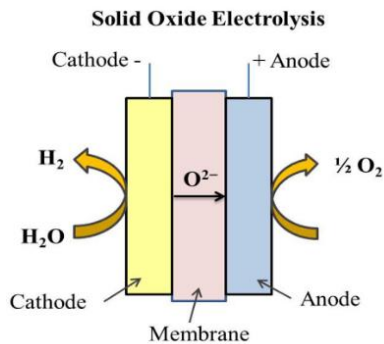


Figuur 3: Een schematische weergave van PEM elektrolyse (Kumar & Himabindu, 2019).

2.4.3 SOE (SOLID OXIDE ELEKTROLYSE)

Bij SEO elektrolyse wordt een keramisch membraan gebruikt als elektrolyt. Dit elektrolyt laat selectief negatief geladen zuurstofionen (O_2^-) door bij hogere temperaturen. Aan de kant van de kathode vormt water met elektronen uit een extern elektrisch circuit waterstof en negatief geladen zuurstofionen. Hierbij passeren de zuurstofionen door het keramische membraan om te reageren met de anode, bij deze reactie wordt zuurstof geproduceerd en elektronen voor het externe circuit. In afbeelding 4 staat een schematische weergave van SOE (Energy efficiency & renewable energy, sd)

SOE elektrolyse is een relatief nieuwe technologie die nog niet op gecommercialiseerde schaal beschikbaar is. Echter zijn er momenteel bedrijven die zich bezighouden met onderzoek naar deze technologie en het momenteel op de markt willen brengen. SOE elektrolyse wordt uitgevoerd bij hoge temperaturen. Deze temperaturen bevinden zich tussen de 800°C en 1000°C. De reden dat deze hoge temperaturen gebruikt worden heeft te maken met de efficiëntie. Bij hoge temperaturen is de reactie efficiëntie voor het splitsen van stoom bijna 100%. Ook is de elektrische input bij 800°C 25% lager dan bij 100°C, dit betekent een hogere elektrische efficiëntie (Holstein et al., 2018).



Figuur 4: Een schematische weergave van SOE elektrolyse (Kumar & Himabindu, 2019).

In tabel 2 staan de verdere verschillende eigenschappen van de AWE, PEM en SOE elektrolyzers in getallen uitgedrukt (Keçebaşa, Kayfecib, & Bayatc, 2019).

	AWE	PEM	SOE
Bedrijfstemperatuur (°C)	60-90	50-80	700-1000
Bedrijfsdruk (Bar)	10-30	20-50	1-15
Efficiëntie (%)	51-60	46-60	76-81
Koude opstarttijd	1-2 uur	10 seconde	1-2 uur
Stroomdichtheid (A cm²)	0,2-0,6	1,0-2,0	0,3-1,0

Tabel 2: Overzicht van de verschillende eigenschappen van een AWE, PEM en SOE

2.5 BRANDSTOFCEL

Een brandstofcel is een apparaat dat door middel van een elektrochemische reactie elektriciteit opwekt. De werking van een brandstofcel is voor alle verschillende typen hetzelfde, echter verschilt het elektrolyt dat gebruikt wordt (Mekhilef et al., 2011). Een brandstofcel combineert waterstof en zuurstof om elektriciteit, warmte en water te vormen. Een brandstofcel, net als een elektrolyser, bestaat uit een anode, kathode en een membraan of elektrolyt. Waterstof wordt naar de anode van de brandstofcel gestuurd en zuurstof naar de kathode. Bij de anode worden de waterstof moleculen gesplitst in elektronen en protonen. De protonen gaan door het membraan of elektrolyt terwijl de elektronen door een elektrisch circuit wordt gestuurd. Hierbij wordt elektriciteit en warmte

geproduceerd. Bij de kathode worden elektronen, protonen en zuurstof gecombineerd tot water (FCHEA, sd).

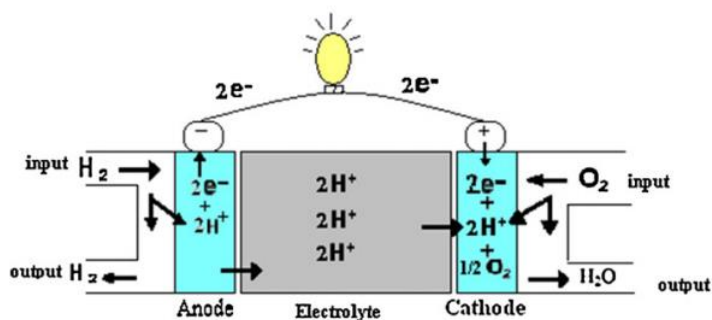
Brandstofcellen zijn met gebruik van groene waterstof volledig CO₂ vrij. Aangezien het principe van brandstofcellen berust op een gecontroleerde chemische verbrandingsreactie in plaats van een verbrandingsreactie. Als men de verliezen van het produceren van waterstof buiten beschouwing laat, is het rendement van een brandstofcel hoger dan van traditionele energieopwekking. Een brandstofcel produceert elektriciteit waarbij de restproducten enkel warmte en water zijn (FCHEA, sd).

Voor dit onderzoek wordt gekeken naar twee verschillende typen brandstofcellen, een alkaline brandstofcel en een PEM brandstofcel. Uit onderzoek van Murre (2020) voor het lectoraat Delta Power bleek dat een PEM brandstofcel het meest geschikt is voor het waterstoflab. Om deze reden zal dit type brandstofcel verder worden toegelicht. Een alkaline brandstofcel is een techniek die al jaren wordt gebruikt en waar veel onderzoek naar is gedaan (McLean, Niet, Prince-Richard, & Djilali, 2002). Om deze reden zal eveneens dit type brandstofcel verder worden toegelicht.

2.5.1 PEM BRANDSTOFCEL

Uit onderzoek van Murre (2020) over brandstofcellen en waterstofketels kwam naar voren dat een LT- PEM brandstofcel het meest geschikt is voor het waterstoflab. Naar dit type brandstofcel is al veel onderzoek gedaan en wordt ook veelal toegepast in auto's, bussen en stationaire installaties. Een LT- PEM brandstofcel kan alleen functioneren bij het gebruik van puur waterstofgas (Mekhilef et al., 2011).

Bij PEM brandstofcellen wordt waterstof geproduceerd door protonen te vormen en elektronen af te geven bij de anode. Een PEM brandstofcel maakt gebruik van een membraan om de protonen en de elektronen te scheiden. De protonen passeren het membraan en de elektron wordt richting het elektrische circuit gestuurd. Het elektron vormt uiteindelijk water aan de kant van de kathode door middel van zuurstof en protonen (Mekhilef et al., 2011). In afbeelding 5 staat een schematische weergave van een PEM brandstofcel. PEM brandstofcellen beschikken over een aantal eigenschappen die voor commercieel gebruik erg interessant zijn. Zo hebben deze brandstofcellen een hoge vermogensdichtheid, snelle opstartprocedure en een hoge efficiëntie. Dit zorgt ervoor dat de PEM technologie veelbelovend is voor de toekomst (Rasheed, Q. Liao, & Chan, 2017)



Figuur 5: Een schematisch weergave van een PEM brandstofcel (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2011).

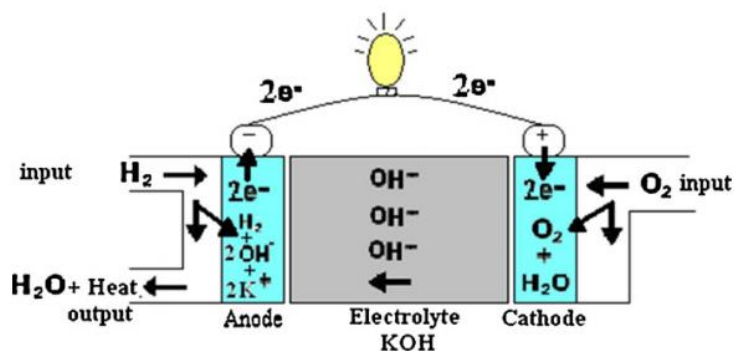
De PEM brandstofcel wordt onderscheiden in twee verschillende typen, de LT-PEM (Low Temperature) en de HT-PEM (High Temperature). F. Murre (2020) concludeerde uit zijn onderzoek dat de LT-PEM het meest toepasbaar is voor het waterstoflab. Dit type PEM brandstofcel heeft de meest gunstige werkt temperatuur en heeft ook minder temperatuur gerelateerd onderhoud nodig. LT-PEM brandstofcellen zijn brandstofcellen met een bedrijfstemperatuur tussen de 60 en 100°C. De efficiëntie van LT-PEM is lager dan bij HT-PEM. Dit komt door de hogere reactiesnelheid bij hogere temperaturen. Echter kan er bij temperaturen boven de 100°C het membraan sneller uitdrogen. Hierdoor wordt het vermogen van het membraan om protonen door te laten negatief aangetast en zal het rendement dalen (Mekhilef et al., 2011).

HT-PEM is een relatief nieuwe techniek binnen PEM brandstofcellen met een hogere efficiëntie, hogere energiedichtheid en snellere opstarttijd. Omdat deze techniek nog in de kinderschoenen staat, zijn er nog veel uitdagingen om deze brandstofcel optimaal te laten functioneren (Rasheed, Q. Liau, & Chan, 2017).

2.5.2 ALKALINE BRANDSTOFCEL (AFC)

Een alkaline brandstofcel genereert elektriciteit door een alkalische elektrolyt te gebruiken. Dit elektrolyt is kaliumhydroxide (KOH) en is een oplossing op basis van water. Door de hydroxylionen die door het elektrolyt bewegen kan er elektriciteit door een circuit lopen (Mekhilef et al., 2011).

Bij de anode worden twee waterstofmoleculen gecombineerd met vier hydroxylionen met een negatieve lading. Hieruit komen vier watermoleculen en 4 elektronen vrij. De elektronen die door middel van deze reactie vrijkomen, komen bij de kathode terecht via het externe circuit. Hierbij reageren de elektronen met water om (OH⁻)ionen te creëren. Zuurstof en twee water moleculen worden bij de kathode gecombineerd en absorberen vier elektronen om negatief geladen hydroxylionen te vormen (Mekhilef et al., 2011). In figuur 6 staat dit proces schematisch weergegeven.



Figuur 6: Een schematische weergave van een alkaline brandstofcel (AFC) (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2011).

Een AFC levert de beste prestaties bij een temperatuur tussen de 60 en de 90°C. Een AFC wordt gezien als een brandstofcel die functioneert bij een lage bedrijfstemperatuur en lage kosten voor de katalysator. De meest gebruikte katalysator om de elektrochemische reactie te versnellen voor een AFC is nikkel. Het rendement van dit type brandstofcel is gemiddeld rond de 60% (Mekhilef et al., 2011).

AFC's worden gezien als de brandstofcel met de hoogste kostenefficiëntie aangezien het gebruikte elektrolyt een standaard kaliumhydroxide oplossing is. Ook is de katalysator voor de elektroden

gemaakt van nikkel. Deze grondstof is in vergelijking met andere soorten katalysatoren niet duur. Een AFC heeft tevens een eenvoudig opgebouwde structuur omdat bij dit type brandstofcel de bipolaire platen niet aanwezig zijn (Mekhilef et al., 2011).

Een AFC verbruikt waterstof en zuivere zuurstof om water, elektriciteit en warmte te produceren. De brandstofcel heeft geen uitstoot van broeikasgassen en heeft een rendement van 70%.

Desalniettemin heeft een AFC ook negatieve punten. Zo raakt een AFC snel vergiftigd met koolmonoxide als er geen zuivere zuurstof wordt gebruikt. De alkalische oplossing die in een AFC zit als elektrolyt neemt CO₂ op door het omzetten van KOH naar kaliumcarbonaat. Deze reactie zorgt vervolgens voor het vergiftigen van de brandstofcel. Het is daarom van belang dat alleen zuiver zuurstof wordt gebruikt, echter zorgt dit wel voor hogere bedrijfskosten (Mekhilef et al., 2011).

Ondanks dat brandstofcellen globaal hetzelfde werken, beschikken brandstofcellen over verschillende eigenschappen. In tabel 2 staan deze eigenschappen weergegeven voor een AFC en een PEMFC (Mekhilef et al., 2011).

Brandstofcel	AFC	PEMFC
Bedrijfstemperatuur (°C)	90 – 100	50 – 100
Efficiëntie	60	53 – 58
Output (kW)	10 – 100	<1 – 250
Brandstof	Pure waterstof	Pure waterstof

Tabel 3: Verschillende eigenschappen van een AFC en een PEMFC

2.6 WATERSTOFKETEL

Een cv-ketel met waterstof als brandstof werkt identiek aan een conventionele cv-ketel (Ophoff & Kippers, 2012). Een brander in de cv-ketel ontsteekt de brandstof waardoor warmte ontstaat. Door middel van deze warmte wordt het water in de cv-ketel verwarmd (abelenco, sd). Bestaande cv-ketels kunnen functioneren met een mengsel bestaande uit aardgas en een waterstofpercentage van 0,5%. Op het moment is de eis voor het waterstofpercentage vastgesteld op 0,02% voor het landelijk net (RVO, 2018). Om over te stappen van aardgas naar waterstof zouden alle branders van de bestaande cv-ketels moeten worden vervangen. Dit komt omdat waterstof sneller vervliegt in vergelijking met aardgas (Staffell, 2018).

Een omschakeling van aardgas naar waterstof eist van huishoudens een aanpassing aan de cv-ketel en componenten ervan. Deze omschakeling is in het verleden ook al eens voorgekomen (Staffell, 2018). In 1963 begon Nederland van stadsgas over te stappen naar aardgas. Stadsgas bestaat uit een samenstelling van waterstof en koolmonoxide. Door de hogere druk en samenstelling van aardgas moesten de branders in de geisers worden aangepast. Na tien jaar was driekwart van de Nederlanders aangesloten op het aardgasnetwerk (Buiting, 2016). In dezelfde periode heeft ook een overstap van stadsgas naar aardgas plaatsgevonden in het Verenigd Koninkrijk. Hierbij zijn toentertijd

40 miljoen apparaten vervangen. De omgerekende kosten hiervan waren in 2015 8 miljard pond. De volledige ombouw duurde 11 jaar.

Momenteel wordt in de Rotterdamse deelgemeente Rozenburg een pilot gehouden met betrekking tot het gebruik van een waterstofketel van Remeha (2019). De pilot in Rozenburg maakt onderdeel uit van het Power2Gas project. Hierbij wordt de bestaande aardgasleiding gebruikt om waterstof te kunnen transporteren (Stedin, 2019).

3. METHODE

In dit hoofdstuk wordt de gebruikte onderzoeksmethode toegelicht. Ook zal er worden toegelicht welke methode er gebruikt is om op de deelvragen antwoord te kunnen geven en hoe de betrouwbaarheid en validiteit gewaarborgd is.

3.1 ONDERZOEKSMETHODE

Tijdens het onderzoek is hoofdzakelijk gebruik gemaakt van kwalitatief onderzoek. Het kwalitatief onderzoek is gedaan door middel van deskresearch. Hierbij is gebruikt gemaakt van de volgende zoekmachines:

- [Www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [Www.scholar.google.com](http://www.scholar.google.com)
- [Www.google.com](http://www.google.com)

Bij het gebruik van Google zijn alleen bronnen gebruikt die afkomstig waren van bedrijven die gespecialiseerd zijn in waterstof, brandstofcellen, elektrolyzers en waterstof/cv-ketels. Ook zijn bronnen geraadpleegd van bedrijven die zich bezig houden met projecten omtrent waterstof, zoals Gasunie of het project “Waterstofwijk Hoogenveen”. Tevens zijn webpagina’s van de Rijksoverheid geraadpleegd voor de wetgeving.

3.2 METHODE PER DEELVRAAG

3.2.1 DEELVRAAG 1: WAT ZIJN DE EISEN WAARAAN HET WATERSTOFLAB MOET VOLDOEN?

Aan de hand van het literatuuronderzoek, eisen van het lectoraat en wensen van het bedrijfsleven zijn de eisen voor het waterstoflab vastgesteld. Via literatuuronderzoek is de werking van de verschillende elektrolyzers en brandstofcellen onderzocht die commercieel beschikbaar zijn. Door contact met de opdrachtgever en de werksessies met het bedrijfsleven zijn de wensen voor de componenten vertaald naar eisen. Vanuit deze eisen kon een keuze gemaakt worden voor het type elektrolyser en brandstofcel. De waterstofketel is gekozen op basis van welk bedrijf een waterstofketel beschikbaar stelt, aangezien deze nog niet commercieel beschikbaar zijn.

Het literatuuronderzoek heeft bestaan uit het zoeken naar studies die verschillende typen elektrolyzers en brandstofcellen met elkaar vergelijken. Om deze studies te achterhalen is gebruikt gemaakt van Google Scholar en ScienceDirect in combinatie met onderstaand zoekplan.

Combinaties	
Component	Vergelijking
- Electrolyzer - Elektrolyser OF - Fuelcell - Brandstofcel OF - PEM - AWE - SOE OF - Alkaline electrolyzer - Proton exchange membrane - Solid oxide electrolyzer OF - Alkaline fuelcell - PEM fuelcell	Comparative Difference Comparison Vergeleken met

Ook is door literatuuronderzoek onderzoek verricht naar de wet -en regelgeving voor waterstof in de bebouwde omgeving. Via de PGS 35, NPR 7910 is onderzocht aan welke wet -en regelgeving het waterstoflab moest voldoen. Aan de hand van de NPR 7910, ATEX 114 en praktijkervaring van de Hanzehogeschool en de Hogeschool Rotterdam zijn de veiligheidseisen opgesteld voor het waterstoflab. Tijdens een meeting over de veiligheid met betrekking tot waterstoflaboratoria sprak Emile Jackson over de veiligheidsmaatregelen van het waterstoflab van de Hogeschool van Rotterdam. Ter validatie zijn de veiligheidseisen uit bijlage B vergeleken met de veiligheidseisen van het waterstoflab van de Hogeschool Rotterdam.

3.2.2 DEELVRAAG 2: WELK CONCEPTUEEL ONTWERP KOMT VOORT UIT DE GESTELDE EISEN VAN HET WATERSTOFLAB?

Aan de hand van het literatuuronderzoek en de wensen van het lectoraat en bedrijfsleven is er een keuze gemaakt voor de meest geschikte componenten. Na goedkeuring van het lectoraat zijn deze componenten opgenomen in het conceptuele design.

De componenten zijn gekozen op basis van de eisen van het lectoraat, de wensen van het bedrijfsleven, beschikbaarheid en de toepasbaarheid in het waterstoflab. Met toepasbaarheid wordt bedoeld dat het mogelijk is om het component modulair te installeren en dat het component standaard niet met ingebouwde meetsystemen komt.

Onderstaand de criteria voor de elektrolyzers:

- De elektrolyser is commercieel beschikbaar.
- De elektrolyser heeft een vermogen tussen de 5 en 10 kW.
- Het component is in de vorm van een elektrolyser stack te verkrijgen.

Onderstaand de criteria voor de brandstofcellen:

- De brandstofcellen zijn beschikbaar met een vermogen minstens 2,5 en 4 kW.
- De brandstofcel is luchtgekoeld.
- De brandstofcel is commercieel beschikbaar.

Van de geselecteerde componenten is een blokschema en PFD (Process Flow Diagram) gemaakt. Het opstellen van een PFD is gedaan worden volgens de methode van Sinnott & Towler (Chemical Engineering Design, 2009, pp. 154-162).

3.2.3 DEELVRAAG 3: WAT IS HET GEDETAILLEERDE ONTWERP VAN HET WATERSTOFLAB?

Om deze deelvraag te beantwoorden is een gedetailleerde ontwerp van het waterstoflab gemaakt. Dit is gedaan in de vorm van een systeembeschrijving, P&ID en HAZOP studie.

De P&ID is uitgevoerd aan de hand van Sinnott & Towler (Chemical Engineering Design, 2009, pp. 229-234) en is getekend in AutoCAD Plant 3D. De P&ID is voortgekomen uit de keuzes die gemaakt zijn in het PFD. Door een HAZOP studie is de P&ID gecontroleerd op de veiligheid. De P&ID is hierna voorgelegd aan Delta Power ter controle en of het voldeed aan de gestelde eisen.

De HAZOP is gecontroleerd met Jan Maas en Bob Romboud en is uitgevoerd met behulp van Sinnott & Towler (Chemical Engineering Design, 2009, pp. 511-520). De HAZOP heeft alleen betrekking op het waterstoflab en de waterstofopslag.

3.2.4 DEELVRAAG 4: WAT BEDRAGEN DE KOSTEN VOOR HET WATERSTOFLAB?

De kosten voor het lab zijn gebaseerd op de aanschaf van alle benodigde componenten en leidingen. De prijzen van de brandstofcellen en elektrolyzers zijn afkomstig van offertes. De prijzen voor de overige componenten zijn afkomstig van Eriks.nl. Voor de waterstofketel is uitgegaan van een gemiddelde prijs voor aardgasketels aangezien leveranciers nog geen prijsindicatie voor een waterstofketel konden geven.

3.3 BETROUWBAARHEID & VALIDITEIT

Om de kwaliteit van een bron te kunnen waarborgen zijn bronnen gecontroleerd door middel van de CRAAP methode. Aan de hand van deze methode kan een bron worden beoordeeld op kwaliteit. De

CRAAP methode test op basis van actualiteit, relevantie, auteur, accuraatheid en het doel van de geschreven tekst (Central Michigan University, 2021).

Actualiteit: Doordat er constant nieuwe ontwikkelingen plaatsvinden op basis van waterstof is het van belang dat de bron actuele informatie bevat.

Relevantie: Een bron moet relevant zijn en (deels) de onderzoeksvraag kunnen beantwoorden.

Auteur: De auteur van een tekst moet beschikken over voldoende kennis om over het onderwerp te kunnen schrijven. Dit kan bepaald worden door te kijken naar de achtergrond en opleiding van de auteur. Ook kan er gekeken worden of bronnen van de auteur door anderen worden geciteerd.

Accuraatheid: Het controleren of de informatie wordt ondersteund door bewijsmateriaal of eerdere onderzoeken waaruit conclusies worden getrokken.

Doel: Door te kijken naar het doel van de bron kan men bepalen met welke reden de tekst is geschreven. Hieruit kan worden geconcludeerd of een auteur bijvoorbeeld subjectief of objectief onderzoek heeft gedaan.

4. RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek behandeld. De resultaten zijn onderverdeeld in de paragrafen: Componentkeuze, Gedetailleerd ontwerp en Kostenindicatie

4.1 COMPONENTKEUZE

ELEKTROLYSER

De elektrolyzers zijn gekozen op basis van de volgende criteria:

- De elektrolyser is commercieel beschikbaar.
- De elektrolyser heeft een vermogen tussen de 5 en 10 kW.
- Het component is in de vorm van een elektrolyser stack te verkrijgen.

Het type elektrolyser is gekozen aan de hand van het theoretisch kader, de wensen van het lectoraat en de wensen van het bedrijfsleven. Vanuit deze eisen en wensen is er gekozen voor een PEM elektrolyser en een alkaline elektrolyser.

Elektrolyse door middel van een alkaline elektrolyser is een technologie die momenteel door veel bedrijven wordt gehanteerd voor het maken van waterstof. Uit werksessies is gebleken dat bedrijven graag willen dat een alkaline elektrolyser ook onderdeel uitmaakt van het waterstoflab. Aangezien Delta Power aan de wensen van het bedrijfsleven wil voldoen, wordt er een alkaline elektrolyser geplaatst in het waterstoflab. Daarnaast zijn alkaline elektrolyzers commercieel beschikbaar waardoor ze aangeschaft en geïnstalleerd kunnen worden.

Voor het waterstoflab waren er twee mogelijk geschikte alkaline elektrolyzers beschikbaar, de Piel P-Series van McPhy en de Alkaline Water Electrolyzer Stack – 60 Cell van Lightbridge. De laatstgenoemde is geen complete elektrolyser, enkel de elektrolyser stack.

De Piel P-Series is een complete alkaline elektrolyser met een vermogen tussen de 6 tot en met 9kW die direct aangesloten en gebruikt kan worden. Het nadeel van deze elektrolyser is dat deze minder educatieve mogelijkheden biedt aangezien de elektrolyser volledig omhult is en mogelijk niet alle gegevens afgelezen kunnen worden.

De Alkaline Water Electrolyzer Stack – 60 Cell is een elektrolyser stack met 60 cellen. Binnen een systeem biedt deze elektrolyser stack een hogere educatieve waarde dan de Piel-P-Series. Doordat het enkel de stack betreft kunnen er rondom de stack meerdere en verschillende metingen worden uitgevoerd die niet kunnen worden beïnvloedt door een ander systeem, dit is bij de Piel P-Series wel het geval.

Op basis van de criteria is gekozen voor de Alkaline Water Electrolyzer Stack – 60 Cell van LightBridge. Deze elektrolyser stack heeft een vermogensbereik van 1,8 tot en met 9,6kW, hiermee voldoet deze aan de eis van een elektrolyser met een vermogen tussen de 5 en 10kW die Delta Power voor ogen had. De elektrolyser is ontworpen voor een oplossing met 30% alkaline. In de door LightBridge opgestelde offerte kwamen de kosten voor deze elektrolyser uit op \$12.300,00. De gegevens van de elektrolyser stack zijn te vinden in bijlage D4.

PEM elektrolyse kenmerkt zich ten opzichte van alkaline elektrolyse door de snellere opstarttijd, geen corrosie en hogere efficiëntie. Delta Power heeft de wens geuit dat zij naast een alkaline elektrolyser ook beschikking willen hebben over een PEM elektrolyser voor het waterstoflab. PEM elektrolyzers zijn net als alkaline elektrolyzers commercieel beschikbaar.

Voor het waterstoflab zijn er twee mogelijk geschikte PEM elektrolyzers beschikbaar, de Hydrogen Generator – S40 van NEL Hydrogen en de H-TEC Series-S: S 30/30 van H-TEC.

De Hydrogen Generator – S40 is net als de Piel P-Series een complete elektrolyser die direct aangesloten en gebruikt kan worden. Dit zorgt er ook bij deze elektrolyser voor dat er een lagere educatieve waarde is.

De gekozen PEM elektrolyser betreft de H-TEC Series-S: S 30/50. Deze elektrolyser heeft een vermogensbereik van 1,28 tot en met 9,38kW en voldoet hiermee ook aan de eis van Delta Power. In augustus 2021 worden de nieuwe prijzen voor de H-TEC Series-S bekend gemaakt. De gegevens van deze elektrolyser zijn te vinden in bijlage D3.

BRANDSTOFCEL

In het theoretisch kader zijn twee brandstofcellen met elkaar vergeleken, een PEM brandstofcel en een alkaline brandstofcel.

Op basis van onderstaande criteria is de keuze voor een brandstofcel gemaakt:

- De brandstofcellen zijn beschikbaar met een vermogen minstens 2,5 en 4 kW.
- De brandstofcel is luchtgekoeld.
- De brandstofcel is commercieel beschikbaar.

Vanuit de criteria is geconcludeerd dat de PEM brandstofcel het meest geschikt is voor het waterstoflab. In tegenstelling tot een alkaline brandstofcel is een PEM brandstofcel wel commercieel beschikbaar. Daarnaast is een alkaline brandstofcel niet luchtgekoeld maar gebeurt de koeling door middel van het elektrolyt. PEM brandstofcellen kunnen met vloeistof en lucht gekoeld worden. Ook had Delta Power de wens geuit voor een PEM brandstofcel. Delta Power heeft daarnaast ook ervaring met het werken met PEM brandstofcellen, zo maakt de waterstofboot ook gebruik van een PEM brandstofcel. Murre (2020) heeft ook onderzoek gedaan voor Delta Power naar de meest geschikte brandstofcel voor het verwarmen van een woning, vanuit dit onderzoek is ook een PEM brandstofcel aangeraden.

De gekozen brandstofcellen voor het waterstoflab bedragen de H-5000 en H-3000 PEM Fuel Cell van Horizon Educational. De H-5000 heeft een bereik tot 5kW en de H-3000 een bereik tot 3kW, beide brandstofcellen zijn luchtgekoeld. De H-5000 en H-3000 onderscheiden zich andere brandstofcellen door de ingebouwde humidifier. Hierdoor hoeft er geen aparte humidifier geïnstalleerd te worden in de opstelling voor de brandstofcel.

De datasheets van beide brandstofcellen zijn te vinden in bijlage D1 en D2.

WATERSTOFKETEL

Momenteel kan er nog geen concrete keuze gemaakt worden voor een waterstofketel in het waterstoflab. Producenten zoals Remeha en Nefit zijn zelf nog steeds bezig met het onderzoeken naar de mogelijkheden binnen deze sector (S. Rietveld & M. Kok, persoonlijke communicatie, 19 maart 2021). Hierdoor zijn waterstofketels nog niet commercieel beschikbaar. Alleen ATAG verkoopt een cv-ketel die gecertificeerd is om te werken op een mengsel van 70% aardgas en 30% waterstof. Echter voldoet deze cv-ketel dus niet aan de gestelde eis om volledig op waterstof te kunnen functioneren. Aangezien een cv-ketel op aardgas hetzelfde werkt als een waterstofketel, is dit component wel meegenomen in het ontwerp van het waterstoflab in afwachting van het beschikbaar komen van een geschikte waterstofketel.

4.2 GEDETAILEERD ONTWERP

4.2.1 PROCESBESCHRIJVING

Het waterstoflab zal opgedeeld worden in vijf verschillende installaties: Alkaline elektrolyser, PEM elektrolyser, PEM brandstofcel, waterstofketel en het leidingnetwerk afkomstig uit de waterstofopslag. Het opdelen van het waterstoflab zorgt ervoor dat de installaties op verschillende volgordes met elkaar gekoppeld kunnen worden. Van de vijf installaties zijn de twee elektrolyzers, de brandstofcel en de waterstofketel mobiel. Dit geeft het de mogelijkheid om de installaties buiten te zetten, hierdoor wordt de kans op een explosieve atmosfeer verminderd aangezien waterstof in de buitenlucht vervliegt. Ook geeft het de mogelijkheid om het waterstoflab eenvoudig te verplaatsen mocht de locatie ooit veranderen. Dit geldt echter niet voor het leidingnetwerk van de waterstof toevoer aangezien deze gemonteerd is binnen in het waterstoflab.

PROCESBESCHRIJVING PEM ELEKTROLYSER

Hieronder volgt de procesbeschrijving van de PEM elektrolyser. De P&ID van de PEM elektrolyser is te vinden in bijlage A1.

Gedemineraliseerd water stroomt uit T-001 door leiding 25-RVS-WA-001 naar de PEM elektrolyser PEME-001. In de elektrolyser zal het water worden omgezet naar H_2 en O_2 . De H_2 zal het systeem verlaten via 25-RVS-H2-003 en kan hierna opgevangen worden of naar een andere installatie worden gestuurd. Als de druk in de leiding hoger wordt dan de standaard 16 bar in de leidingen zal PRV-001 zich openen en het overtollige waterstof naar buiten leiden. Hierdoor ontstaat er in het waterstoflab geen explosieve omgeving. De O_2 zal met het niet omgezette water uit de elektrolyser door een membraanpomp (P-001) terug richting K-004 worden gepompt. In K-004 zal tevens de O_2 door de overdruk uit het systeem verdwijnen via 25-RVS-O2-009. Bij de elektrolyser zijn drie drains aangebracht om water uit de elektrolyser te laten stromen, hierdoor wordt de levensduur van de elektrolyser verlengd. Deze drains moeten worden geopend na elk gebruik van de elektrolyser.

PROCESBESCHRIJVING ALKALINE ELEKTROLYSER

Hieronder volgt de procesbeschrijving van de alkaline elektrolyser. De P&ID van de alkaline elektrolyser is te vinden in bijlage A2.

De tanks K-001 en K-002 bevatten beide 50 liter KOH oplossing met een concentratie van 30%. Via HA-101 en HA-102 stroomt de KOH oplossing naar regelklep 1-CV-002 waar beide stromen bij elkaar komen. Deze regelklep is een fail to close en zal sluiten op het moment dat er geen elektriciteit meer aanwezig is of als de druk in K-001 of K-002 te hoog wordt. Vanuit 1-CV-002 stroomt de oplossing naar pomp P-002 vanaf waar de oplossing door het proces wordt gepompt. In de elektrolyser stack AWE-001 wordt een deel van de ingaande KOH oplossing omgezet naar waterstof en zuurstof. De waterstof gaat met de niet gereageerde KOH oplossing door leiding 25-RVS-KOH-007 terug naar tank K-002. In de tank wordt de waterstof gescheiden van de KOH, de waterstof zal het proces verlaten via 25-RVS-H2-0010. De niet gereageerde KOH oplossing blijft in K-002 en zal hergebruikt worden. De geproduceerde zuurstof zal via 25-RVS-KOH-008 samen met de niet gereageerde KOH oplossing terug stromen richting K-001. Hier wordt de KOH oplossing hergebruikt en zal de zuurstof het proces verlaten via 25-RVS-02-009. Op de tanks K-001 en K-002 zitten level indicators, LI-001 en LI-002. Deze geven het niveau van de KOH oplossing in de tank aan, hierdoor kan er gemonitord worden of de tanks bijgevoerd moeten worden.

KOH kan corroderend werken in leidingen en pompen. Om de leidingen en de pomp te spoelen van KOH dient er in K-003 gedemineraliseerd water gemengd met methanol of acetonitril te zitten (S. De Reu, Persoonlijke communicatie, 11 juni 2021). Om het proces te spoelen dienen HA-118 en HA-115 gesloten te worden en HA-117 en HA-116 geopend te worden. Door HA-113 te openen kan het spoelmiddel vanuit K-003 het proces instromen. Het proces dient na elk gebruik gespoeld te worden om degradatie van de materialen te gaan.

PROCESBESCHRIJVING PEM BRANDSTOFCEL

Hieronder volgt de procesbeschrijving van de brandstofcel. De P&ID van de brandstofcel is te vinden in bijlage A3.

Waterstof komt vanuit de waterstofflessen of via de elektrolyzers de toevoerleiding van FC-001 binnen. Via een reduceerventiel wordt de druk gereduceerd tot 0,5 bar. Mocht de druk in de leiding hoger worden dan 0,6 bar, dan zal PRV-003 zich openen en het overschot aan waterstof naar buiten afblazen. PRV-003 zal zich weer sluiten zodra de druk lager is dan 0,6 bar. Nadat de druk is gereduceerd wordt de ingaande waterstof in de brandstofcel omgezet tot elektriciteit, water en warmte. Door de blowers (V-001) wordt de brandstofcel gekoeld en wordt de warmte richting de warmtewisselaar gestuurd. Deze warme lucht kan hier gebruikt worden om water op te warmen. Dit water komt de warmtewisselaar binnen via leiding 25-RVS-WA-0014 en wordt rondgepompt door P-004. Via 25-RVS-WA-0015 verlaat het water de warmtewisselaar. Het water dat uit de brandstofcel komt als restproduct wordt opgevangen en kan mogelijk gebruikt worden voor andere doeleinden.

PROCESBESCHRIJVING WATERSTOFKETEL

Hieronder volgt de procesbeschrijving van de waterstofketel. De P&ID van de waterstofketel is te vinden in bijlage A4.

Via leiding 25-RVS-H2-0020 komt de waterstof de waterstofketel binnen. Hier wordt de waterstof naar de brander geleid waar het ontstoken wordt. Deze brander verwarmt het water dat door de warmtewisselaar in de ketel loopt. Als de druk in 25-RVS-H2-0020 hoger wordt dan de druk die de waterstofketel aan kan zal 1-PRV-004 zich openen waardoor de waterstof naar buiten wordt geleid en de druk in de leiding wordt verminderd. Het water dat door de warmtewisselaar loopt is

afkomstig uit leiding 25-RVS-WA-0019 en wordt door P-003 door de warmtewisselaar gepompt. Dit verwarmde water zal het proces via 25-RVS-WA-0018 weer verlaten. Aan de bovenkant van de ketel komt de lucht binnen door leiding 50-RVS-AIR-0017 en wordt het rookgas afgevoerd door leiding 50-RVS-AIR-0021. Het condensaat dat kan ontstaan bij de verbranding van waterstof wordt afgevoerd via 25-RVS-WA-0022.

PROCESBESCHRIJVING LEIDINGNETWERK

Hieronder volgt de procesbeschrijving van het leidingnetwerk. De P&ID van het leidingnetwerk is te vinden in bijlage A5.

Via een waterstofgasfles buiten het waterstoflab komt de waterstof de leidingen binnen. De druk wordt door middel van een reduceerventiel direct teruggebracht van 200 naar 16 bar. Er is gekozen voor een reductie naar 16 aangezien dit de maximale druk is waarop de huidige waterstofflessen gevuld kunnen worden. De waterstof wordt vervolgens via 25-RVS-H2-0024 naar de brandstofcel worden vervoerd, via 25-RVS-H2-0025 naar de waterstofketel en via 25-RVS-H2-0026 naar een waterstofaansluiting buiten het waterstoflab. 25-RVS-H2-0027 is een extra waterstofaansluiting die in de toekomst mogelijk gebruikt kan worden voor een vulstation waar waterstofflessen gevuld kunnen worden. Naast de waterstofgasfles bevindt zich de stikstofgasfles. Dit stikstof wordt gebruikt om de leidingen en apparatuur te spoelen.

4.2.2 MATERIAALKEUZE

Het waterstof dat door de leidingen stroomt kan ervoor zorgen dat er een potentiaalverschil ontstaat (IFV, 2020). Om er voor te zorgen dat dit potentiaalverschil niet zorgt voor een vonk en ontsteking van de waterstof, dienen de leidingen geaard te worden. Dit betekent dat de leidingen in het waterstoflab gemaakt moeten zijn van een geleidend materiaal.

Waterstof heeft invloed op de kwaliteit van verschillende metalen. Waterstofverbrossing is een verschijnsel waarbij het metaal wordt aangetast en de sterkte afneemt. Voor het waterstoflab is dit geen probleem aangezien de leidingen geen krachten hoeven te dragen.

Door de leidingen naar de alkaline elektrolyser loopt een oplossing van water met KOH. KOH of kaliumhydroxide is een bijtende stof die gebruikt wordt als katalysator in de alkaline elektrolyser. Het water dat naar de alkaline elektrolyser wordt gevoerd is een oplossing met 30% KOH met een temperatuur van maximaal 85°C. In onderstaande tabel staat de corrosiesnelheid in millimeter per jaar van verschillende soorten RVS. In deze tabel spreekt men over NaOH, deze stof is net als KOH een loog en heeft nagenoeg dezelfde eigenschappen (Schornagel, sd).

Type	Concentratie NaOH, %	Temperatuur, °C	Proefduur, dagen	Corrosiesnelheid, mm/jaar
302	20	50 - 60	134	<0,1
304	22	50 - 60	134	<0,1
309	20	50 - 60	134	<0,1
310	20	50 - 60	134	<0,1
410	20	50 - 60	134	0,1
430	20	50 - 60	134	0,1
304	72(a)	120 - 125	119	3,7
316	72(a)	120 - 125	119	3,1
329	72(a)	120 - 125	119	0,1
21Cr-4Ni-0,5Cu	72(a)	120 - 125	119	6
410	72(a)	120 - 125	119	32
302	73(b)	100 - 120	88	38
304	73(b)	100 - 120	88	45

Figuur 3: Aantasting van KOH op verschillende soorten RVS (Schornagel, sd)

Het meest geschikte materiaal voor het waterstoflab zijn RVS 302, 304, 309, 310 en 316. RVS wordt gezien als een materiaal dat goed bestendig is tegen KOH (Quick Cut Gasket, sd; CPLabSafety, sd). Deze typen RVS hebben een ook een hoog nikkel gehalte tussen de 8 en 10%. Nikkel is bestendig tegen KOH en wordt daarom ook vaak gebruikt in een alkaline elektrolyser (Mendoza, 2019).

4.2.3 VEILIGHEIDSEISEN EN WETGEVING

De veiligheidseisen waaraan het waterstoflab moet voldoen zijn te vinden in bijlage B. De eisen zijn gebaseerd op NPR 7910-1: *Gevarenzone-indeling met betrekking tot explosiegevaar – Deel 1: Gasexplosiegevaar*, de richtlijnen van ATEX 114 en praktijkervaring van de Hogeschool Rotterdam en de Hanzehogeschool te Groningen.

4.2.4 DETECTIE EN VENTILATIE VAN WATERSTOF

DETECTIE

Waterstoflekkages in het waterstoflab dienen vroegtijdig gedetecteerd te worden zodat er geen explosieve atmosfeer kan ontstaan. Hierdoor moet er een waterstofdetectie worden geplaatst in het waterstoflab dat gebruikers alarmeert bij de aanwezigheid 1 vol.% waterstof. Daarnaast dient de spanning direct van het systeem gehaald te worden waardoor 1-CV-001 sluit en de waterstof toevoer wordt gesloten.

Waterstoflekkages vinden het meeste plaats bij koppelstukken, flenzen en lassen. Om de oorsprong van een lekkage vast te stellen dienen deze gedeeltes te worden voorzien van waterstofdetectietape. Deze tape verandert van kleur op het moment dat het in aanraking komt met waterstof (figuur 4). Hierdoor is het mogelijk om visueel een waterstoflekkage op te sporen. ResQ-tape H2-Detect is een waterstofdetectietape die geschikt is voor gebruik in het waterstoflab. De tape verandert van kleur als het in contact komt met waterstof en is toepasbaar op meerdere materialen aangezien de tape aan zichzelf hecht.



Figuur 4: De tape verandert van wit/grijs naar zwart als het in aanraking komt met waterstof (ResQ-tape, sd).

VENTILATIE

Om geen explosieve omgeving te laten ontstaan moet er door het gehele waterstoflab geventileerd worden. Door ramen en deuren open te zetten kan er op natuurlijke wijze worden geventileerd. Ook kan er geventileerd worden door middel van mechanische ventilatie. Bij het gebruik van mechanische ventilatie moeten de apparaten ATEX gecertificeerd zijn. Daarnaast dient er een opening in het dak te worden gemaakt waardoor de waterstof naar buiten kan vervliegen.

4.2.5 PROCESVEILIGHEID

Onderstaand de HAZOP van het waterstoflab. De HAZOP dient voor het analyseren en identificeren van gevaren in industriële opstellingen.

Guide Word	Proces Section	Deviation	Cause	Risk	Consequence	Safeguards	Action
No	FI-002	Reading	Defect/lekkage		Geen indicatie van de H2 flow, mogelijk lek	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-001	Flow	-		Geen flow naar elektrolyser	-	Stop proces
More	HA-001	Flow	-		Overmatige flow naar elektrolyser	-	HA-001 dicht of HA-003 open
Less	HA-001	Flow	Lekkage		Water lekt uit de afsluiter	-	Stop proces
No	HA-002	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-202	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-203	Flow	Verstopping		Geen uitgaande waterflow uit fuel cell	-	HA-204 open, FI toevoegen?
No	HA-306	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-306	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-501	Flow	Verstopping		Geen waterstof naar fuel cell	-	-
No	HA-501	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-502	Flow	Verstopping		Geen waterstof naar waterstofketel	-	-
No	HA-502	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-503	Flow	Verstopping		Geen waterstof naar buitenleiding	-	-
No	HA-503	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-504	Flow	Verstopping		Geen waterstof naar systeem	-	-
No	HA-504	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-505	Flow	Verstopping		Geen waterstof naar waterstofketel en buitenleiding	-	-
No	HA-505	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-506	Flow	Verstopping		Geen waterstof naar buitenleiding	-	-
No	HA-506	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
More	25-RVS-H2-003	Pressure	-		Te hoge uitgaande druk	PRV-001	Stop proces
No	25-RVS-WA-002	Flow	defecte pomp		Geen flow door leiding HA-005	-	Stop proces
Reverse	25-RVS-WA-002	Flow	-		Water de verkeerde kant van de elektrolyser en pomp in	HA-005	-
More	25-RVS-H2-0011	Pressure	Defect RV-201		Te hoge druk naar fuelcell	PRV-003	Sluit HA-202 en stop proces
No	25-RVS-WA-0019	Flow	Pomp defect		Geen waterflow door waterstofketel	-	Stop proces
More	25-RVS-WA-0019	Flow	-		Te veel flow door waterstofketel	-	Sluit HA-301
Reverse	25-RVS-WA-0019	Flow	-		Water stroomt de pomp aan de verkeerde kant in	HA-308	Stop proces
No	25-RVS-WA-0018	Flow	Verstopping		Geen flow uit waterstofketel	-	Stop proces
No	25-RVS-WA-0022	Flow	Verstopping		Condensaat blijft in waterstofketel	-	stop proces
More	25-RVS-WA-0019	Pressure	Reduceer defect		Te veel waterstof naar waterstofketel	PRV-004	Stop proces
More	25-RVS-WA-0023	Flow	Defect RV-501		Te hoge druk uit waterstoffles	PRV-005	Sluit HA-504
No	PI-001	Reading	Defect/lekkage		Geen gegevens over druk	PRV-001 bij te hoge druk, waterstofdetectie en tape bij lekkage	Stop proces
No	PI-003	Reading	Defect/lekkage		Kans op te hoge druk naar fuel cell	PRV-003	Stop proces
No	FI-003	Reading	Defect/lekkage		Geen indicatie van de H2 flow, mogelijk lek	Waterstofdetectie en detectietape	
No	FI-004	Reading	Defect/lekkage		Geen indicatie van de H2 flow, mogelijk lek	Waterstofdetectie en detectietape	
No	FI-005	Reading	Defect/lekkage		Geen indicatie van de H2 flow, mogelijk lek	Waterstofdetectie en detectietape	
No	FI-006	Reading	Defect/lekkage		Geen indicatie van de water flow, mogelijk lek	-	Stop proces en controleer FI op defect
No	FI-001	Reading	Defect/lekkage		Geen indicatie van de H2 flow, mogelijk lek	Waterstofdetectie en detectietape	
No	HA-001	Flow	Verstopping		Geen flow naar elektrolyser	-	Stop proces
No	HA-001	Flow	Lekkage		KOH lek	-	Stop proces
No	HA-002	Flow	Verstopping		Geen flow naar elektrolyser	-	Stop proces
No	HA-002	Flow	Lekkage		KOH lek	-	Stop proces
Reverse	P-002	Flow	-		Water stroomt verkeerde kant van de pomp in	HA-004	
No	TI-003	Flow	Lekkage		KOH lek	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	FT-001	Flow	Lekkage		KOH lek	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
More	P-002	Flow	-		Te veel flow door elektrolyser	HA-007	Stop proces
No	HA-011	Flow	Lekkage		KOH en H2 lek	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-011	Flow	Verstopping		Geen flow naar K-002	-	Stop proces
No	HA-003	Flow	Verstopping		Geen flow naar elektrolyser	-	Stop proces
No	HA-003	Flow	Lekkage		Geen flow naar elektrolyser	Waterstofdetectie en detectietape	stop proces
No	HA-010	Flow	Verstopping		Geen uitgaande zuurstof flow	-	Stop proces
No	P-002	Flow	defect		Geen flow naar elektrolyser	-	Stop proces
No	HA-008	Flow	Verstopping		Geen flow naar K-001	-	Stop proces
More	K-002	Flow	-		Te hoog niveau in tank K-002	LI-001	Stop proces
More	K-001	Flow	-		Te hoog niveau in tank K-001	LI-002	Stop proces
No	K-002	Flow	-		Te laag niveau in tank k-001	LI-001	Stop proces
No	K-001	Flow	-		Te laag niveau in tank k-002	LI-002	Stop proces
No	HA-009	Flow	Verstopping		Geen uitgaande H2 flow	-	Pressure indicator toevoegen
No	HA-009	Flow	Lekkage		waterstof lekt uit de afsluiter	Waterstofdetectie en detectietape	Stop proces
No	HA-010	Flow	Verstopping		Geen uitgaande O2 flow	-	Pressure indicator toevoegen
No	HA-010	Flow	Lekkage		Zuurstof lekt uit afsluiter	Zuurstofdetectie	Stop proces

4.3 KOSTENINDICATIE

Onderstaand de kostenindicatie van het waterstoflab. De totale geschatte kosten van het waterstoflab komt uit op +/- €110.000.

Apparaten	Aantal	Prijs	Prijs totaal
PEM Elektrolyser	1	17000 *	€17000
Alkaline Elektrolyser	1	13000	€13000
PEM Brandstofcel 3kW	1	9100	€9100
PEM Brandstofcel 5kW	1	15000	€15000
Waterstofketel	1	2000 *	€2000
Kleppen			
RVS afsluiter	36	150 **	€5400
Regelklep	2	2000 **	€4000
Pressure relief valve	4	500 **	€2000
Flow meter	8	1000 **	€8000
Druk meter	8	650 **	€5200
Temperatuur meter	9	100 **	€900
Totaal apparaten			€81600
Leidingen	Meter	Prijs	
RVS leidingen	75	30	€2250
Totaal leidingen			€2250
Overig	Aantal	Prijs	
Waterstof sensoren	2	1500	€3000
Ventilatoren	4	200	€800
Totaal overig			€3800
Totaal materiaal			€87650
Onvoorzien (25%)			€21913
Totaal			€109563

De kostenindicatie is gemaakt op basis van offertes en schattingen aan de hand van de prijslijst van Eriks.nl. Voor de onvoorziene kosten is gekozen voor een percentage van 25% van het totale geschatte bedrag. Aangezien het nog niet duidelijk is hoe duur de inzet van een aannemer is voor de installatie van het waterstoflab, het inschakelen van bijvoorbeeld een extern bureau om de veiligheidsmaatregelen door te rekenen en verdere onvoorziene kosten in de algemeenheid. Daarnaast is er ook bestedingsruimte nodig voor het ontwerpen van de modulaire installaties voor de componenten.

Onderstaand de links naar de gekozen producten. De prijs voor deze producten is opgevraagd door middel van een offerte:

1. <https://www.h-tec.com/en/products/pem-electrolysis-stacks/h-tec-series-s/>
2. <https://www.fuelcellstore.com/alkaline-water-electrolyzer-stack-60-cell>
3. <https://www.horizoneducational.com/h-3000-pem-fuel-cell-3kw/p1359>
4. <https://www.horizoneducational.com/h-5000-pem-fuel-cell-5kw/p1361>

*Deze prijzen zijn geschat op basis van vergelijkbare producten. De PEM elektrolyzers staan erom bekend dat deze duurder zijn dan alkaline elektrolyzers. Dit komt omdat PEM elektrolyser gebruik maken van duurdere materialen. Hierdoor is er bij de schatting van de prijs €4000 bij de prijs van een alkaline elektrolyser opgeteld. De prijs van de waterstofketel is geschat op basis van een standaard Cv-ketel. Aangezien een waterstofketel een nieuwe techniek is, is er uitgegaan van een hogere prijs. Hierdoor is de prijs twee keer zo duur als een standaard Cv-ketel.

**Deze prijzen zijn geschat op basis van de opgegeven prijzen op Eriks.nl voor vergelijkbare producten. Bij de gekozen producten is altijd uitgegaan van RVS en 25mm diameter. Van de producten die aan deze criteria voldeden is de gemiddelde prijs genomen.

5. CONCLUSIE

In dit onderzoek is onderzoek gedaan naar de vraag: “Wat is het ontwerp van een waterstoflab voor de HZ University of Applied Sciences, waarin componenten in verschillende configuraties met elkaar gekoppeld kunnen worden, dat voldoet aan de gestelde veiligheidseisen, regel -en wetgeving voor de bebouwde omgeving en de wensen van het bedrijfsleven?”. Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag is er kwalitatief onderzoek uitgevoerd.

Via het theoretisch onderzoek zijn er verschillende elektrolyzers en brandstofcellen met elkaar vergeleken. De meest geschikte brandstofcel en elektrolyzers zijn de alkaline elektrolyser, PEM elektrolyser en een PEM brandstofcel.

De P&ID's vormen de basis voor het ontwerp en de werking van het waterstof. De P&ID's zijn voortgekomen uit de blokschema's en PFD's. De ontwerpstappen van het waterstoflab zijn te vinden in bijlage A.

De veiligheidseisen en regelgeving waaraan het waterstoflab moet voldoen zijn gebaseerd op de NPR-7910, ATEX 114 en praktijkervaring van andere hogescholen. Vanuit deze eisen kan de gevarenczone van het waterstoflab worden bepaald en kunnen er veiligheidsmaatregelen worden genomen.

Uit de kosten indicatie op basis van de P&ID's is naar voren gekomen dat de geschatte kosten voor het waterstoflab €110.000 zijn.

6. DISCUSSIE

Waterstof is een trend die momenteel voorloopt op de wet- en regelgeving. Hierdoor is het erg lastig om concrete informatie te vinden over het werken met waterstof in een bebouwde omgeving. Echter is er wel informatie te vinden over het veilig werken met waterstof. In dit onderzoek is er meer focus gelegd op de veiligheidseisen waar het waterstoflab aan moet voldoen, dan aan de wet- en regelgeving. De gedachte hierachter is dat de wet- en regelgeving voor waterstof in de bebouwde omgeving uiteindelijk voort zal komen uit de veiligheidseisen die bijvoorbeeld beschreven staan in de NPR-7910 of de PGS-35.

In het onderzoek wordt 20% KOH vergeleken met 30% KOH in RVS leidingen. Omdat er weinig informatie te vinden is over RVS leidingen en KOH was dit de meest vergelijkbare situatie. Door andere bronnen wordt ook ondersteund dat RVS bestendig is tegen KOH, desalniettemin presteert RVS minder goed dan een kunststof zoals PTFE. PTFE is echter niet geleidend waardoor er een potentiaal verschil kan ontstaan waarbij een vonk vrij kan komen.

De P&ID van de waterstofketel is gemaakt op basis van een aardgasketel. Aangezien er nog niet veel bekend is over waterstofketels en deze nog niet op de markt beschikbaar zijn, is de informatie hierover schaars. Het ontwerp van de waterstofketel is daarom ook niet compleet representatief, omdat het ontwerp van een waterstofketel nog niet volledig bekend is.

De huidige druk van het leidingnetwerk in het waterstoflab is 16 bar. Dit zou mogelijk kunnen veranderen naar een andere druk. De Hogeschool Rotterdam heeft namelijk een maximale druk van 12 bar wegens (plaatselijk) regelgeving voor het werken met hogere drukken en studenten. In de gevonden regelgeving op de website van de rijksoverheid over gassen of in de PGS databank kon echter niets worden gevonden over een maximale druk van 12 bar.

7. AANBEVELINGEN

Er is op kleinere schaal nog niet veel informatie over het werken met een alkaline elektrolyser. De hogescholen van Rotterdam en Groningen hadden ondanks toekomstplannen voor een alkaline elektrolyser nog weinig kennis van het werken met een KOH oplossing en de uitdagingen die dit met zich meebrengt. Zo is er bijvoorbeeld nog weinig kennis over de bijtende eigenschappen van KOH als het stilstaat in leidingen of pompen. Om meer kennis te vergaren over het veilig werken met een alkaline elektrolyser is meer onderzoek nodig.

De P&ID van de brandstofcel bevat momenteel geen humidifier omdat de humidifier is ingebouwd in de brandstofcel. Een humidifier zorgt ervoor dat de waterstof wordt bevochtigd en verwarmd waardoor het membraan in de brandstofcel minder snel uitdroogt. Het is van belang om bij aankoop van de componenten rekening te houden met de extra kosten die een humidifier met zich meebrengt mocht er een andere brandstofcel worden aangeschaft.

Bij het opzetten van het waterstoflab is het verstandig om de veiligheidsregio bij het verdere ontwerp te betrekken. Op deze manier zijn meerdere instanties op de hoogte van de veiligheidseisen en de risico's die bij een waterstoflab komen kijken. Hierdoor is men beter voorbereid mochten er calamiteiten plaatsvinden. Naast het betrekken van de veiligheidsregio kan het inschakelen van een extern bureau om de veiligheidsmaatregelen door te rekenen de veiligheid bevorderen.

Het personeel dat aanwezig is in het waterstoflab moet een gecertificeerde ATEX cursus volgen. Kennis hebben van de veiligheidseisen en risico's kan ervoor zorgen dat gevaarlijke situaties worden vermeden. Als studenten aanwezig zijn in het waterstoflab is het altijd verstandig als er een persoon aanwezig is die kennis heeft van de ATEX richtlijnen.

REFERENTIES

- abelenco. (sd). *Hoe werkt een cv-ketel*. Opgehaald van Abelenco:
<https://abelenco.nl/kennisbank/hoe-werkt-een-cv-ketel/>
- Amyotte, P., & Rigas, F. (2013). *Applications of Process Safety Concepts to the Hydrogen Economy*.
- Balkenende, F. (2021, maart 31). Wat heeft Zeeland aan de grootste groene waterstoffabriek ter wereld? *AD*. Opgehaald van <https://www.ad.nl/zeeland/wat-heeft-zeeland-aan-de-grootste-groene-waterstoffabriek-ter-wereld~abbfe3ee/>
- Buiting, E. (2016, Oktober 26). *Van stadsgas naar aardgas*. Opgehaald van Installatie.nl:
<https://www.installatie.nl/installatie-van-weleer/van-stadsgas-naar-aardgas/>
- CBS. (2021, maart 12). *Nieuws*. Opgeroepen op mei 18, 2021, van CBS: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/10/uitstoot-broeikasgassen-8-procent-lager-in-2020>
- Central Michigan University. (2021, Januari 15). *Website Research: CRAAP Test*. Opgehaald van CMU University Libraries: https://libguides.cmich.edu/web_research/craap
- Chemgaroo. (sd). *Chemgapedia*. Opgehaald van
http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap_11/vlus/elektrolyse.vlu/Page/vsc/de/ch/11/aac/vorlesung/kap_11/kap_11_3/text.vscml.html
- Chemical Engineering Design. (2009). In R. Sinnott, & G. Towler. Elsevier Science & Technology.
- CPLabSafety. (sd). *Stainless Steel CHemical Compatibility Chart*. Opgeroepen op Juli 21, 2021, van CPLabSafety: <https://www.calpaclab.com/stainless-steel-chemical-compatibility-chart/>
- Cummins. (2020, November 16). *Electrolyzers 101: What they are, how they work and where they fit in a green economy*. Opgehaald van Cummins:
[https://www.cummins.com/news/2020/11/16/electrolyzers-101-what-they-are-how-they-work-and-where-they-fit-green-economy#:~:text=An%20electrolyzer%20is%20a%20system,in%20a%20process%20called%20electrolysis.&text=Electricity%20is%20applied%20to%20the,\)%20and](https://www.cummins.com/news/2020/11/16/electrolyzers-101-what-they-are-how-they-work-and-where-they-fit-green-economy#:~:text=An%20electrolyzer%20is%20a%20system,in%20a%20process%20called%20electrolysis.&text=Electricity%20is%20applied%20to%20the,)%20and)
- Cummins. (sd). *Electrolysis*. Opgehaald van Cummins: <https://www.cummins.com/new-power/applications/about-hydrogen/electrolysis>
- Energy efficiency & renewable energy. (sd). *Hydrogen production: Electrolysis*. Opgehaald van Energy.gov: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- Europese commissie van gemeenschappen. (2003). *Tenuitvoerlegging van Richtlijn 1999/92/EG betreffende minimumvoorschriften voor gezondheidsbescherming en veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen*. Brussel.
- FCHEA. (sd). *Fuel cell basics*. Opgehaald van FCHEA:
<https://www.fchea.org/fuelcells#:~:text=A%20fuel%20cell%20is%20a,electricity%2C%20heat>

%2C%20and%20water.&text=At%20the%20cathode%2C%20the%20protons,combine%20to%20produce%20water%20molecules.

Gasunie. (sd). *Wat is waterstof?* Opgehaald van De wereld van waterstof:
<https://www.dewereldvanwaterstof.nl/gasunie/wat-is-waterstof/>

Gasunie. (sd). *Waterstof*. Opgehaald van Gasunie:
<https://www.gasunie.nl/energietransitie/waterstof>

Gummer, J., & Hawksworth, S. (2008). *Spontaneous ignition of hydrogen*. HSE, Buxton. Opgehaald van <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr615.pdf>

Hengeveld, Meij, V. d., & Aué. (2020). *Waterstofwijk hoogeven*. Opgehaald van https://www.researchgate.net/publication/345429782_Waterstofwijk_Plan_voor_Waterstof_in_Hoogeven_-_Hydrogen_plan_in_the_Dutch_town_of_Hoogeven

Hermkens, R., Jansma, S., Laan, M. v., Laat, H. d., Pilzer, B., & Pulles, K. (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*. Kiwa, Apeldoorn. Opgehaald van <https://bureauleiding.nl/kennisdossier/artikel/kiwa-rapport-over-toekomstbestendige-gasdistributie-netwerken/>

HIER. (2017, Mei 15). *Waterstof: Geen energiebron, maar energiedrager*. Opgehaald van HIER:
<https://www.hier.nu/themas/klimaatwoordenboek/waterstof-geen-energiebron-maar-energiedrage>

Holstein, J., van Gerwen, R., Douma, J., van Delft, Y., & Saric, M. (2018). *Technologiebeoordeling van groene waterstofproductie*.

Hysafe. (2009). *Initial guidance for using hydrogen in confined spaces*.

IEA. (2019, Juni). *The Future of Hydrogen*. Opgehaald van https://renewableh2.org/wp-content/uploads/2019/07/The_Future_of_Hydrogen.pdf.

IFV. (2020). *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*. Arnhem.

J. Pasman, J. R. (2010). *Safety challenges in view of the upcoming hydrogen economy: An overview*.

Jak, M. (2019, September 12). *Wie, wat, waterstof*. Opgehaald van Shell:
<https://www.shell.nl/media/venster/eerder-verschenen/twaalf-weetjes-waterstof.html>

Keçebaşa, A., Kayfecib, M., & Bayatc, M. (2019). *Solar Hydrogen Production*. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/book/9780128148532/solar-hydrogen-production>

Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). *Hydrogen production by PEM water electrolysis*. KeAi, Hyderabad. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>

Lenntech. (sd). *Chemical properties of hydrogen*. Opgehaald van Lenntech:
<https://www.lenntech.com/periodic/elements/h>

- Linde. (2015). *Zuurstofgebrek*.
- Lyzard. (sd). *Waterstofopslag*. Opgehaald van Lyzard: <http://www.lyzard.eu/nl/waterstof/opslag>
- Matthijssen, A., & Kooi, E. (2006). *Safety distances for hydrogen filling stations*. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285906712470>
- McLean, G., Niet, T., Prince-Richard, S., & Djilali, N. (2002). *An assessment of alkaline fuel cell technology*. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319901001811>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). *Comparative study of different fuel cell technologies*. Kuala Lumpur.
- Melaina, M., Antonia, O., & Penev, M. (2013). *Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues*. NREL. Opgehaald van https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/03/f11/blending_h2_nat_gas_pipeline.pdf
- Mendoza, P. G. (2019, Juni). Materials for intensified alkaline water electrolysis. Opgehaald van <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5f0/319/f2d/5f0319f2d6a30956850267.pdf>
- Murre, F. (2020). *Het ontwerpen van een installatie die warmte opwekt met behulp van waterstof*. Vlissingen.
- NRDC. (2018, Juni 15). *Renewable Energy: The Clean Facts*. Opgehaald van NRDC: <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts>
- Ophoff, & Kippers. (2012). *Waterstof in aardgas op Ameland*.
- Pijnenburg, H. (2017). *Inherente veiligheid*. Opgehaald van https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/171002_RIVM-Netwerkdag-Omgevingsveiligheid_.pdf
- PZC. (2020, Mei 11). DOW-topman: Meer tijd nodig om uitstoot broeikasgas te beperken, nationale CO₂-heffing zal in nadeel DOW Terneuzen werken. PZC. Opgehaald van <https://www.pzc.nl/zeeuws-vlaanderen/dow-topman-meer-tijd-nodig-om-uitstoot-broeikasgas-te-beperken-nationale-co2-heffing-zal-in-nadeel-dow-terneuzen-werken~a00c8cc1/#:~:text=Alle%20bedrijven%20op%20het%20Dow,van%20grootste%20uitstoters%20in%20Nederland.>
- Quick Cut Gasket. (sd). Opgehaald van QuickCutGasket: <https://www.quickcutgasket.com/pdf/Chemical-Resistance-Chart.pdf>
- Rasheed, R., Q. Liao, Z. C., & Chan, S. H. (2017). *A review on modelling of high temperature proton exchange membrane fuel cells (HT-PEMFCs)*. Signapore. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916330981?via%3Dihub>
- Remeha. (2019). *Waterstofgas en de waterstofketel*. Opgehaald van Remeha: <https://tools.remeha.nl/actueel/waterstofgas-en-waterstofketel/>

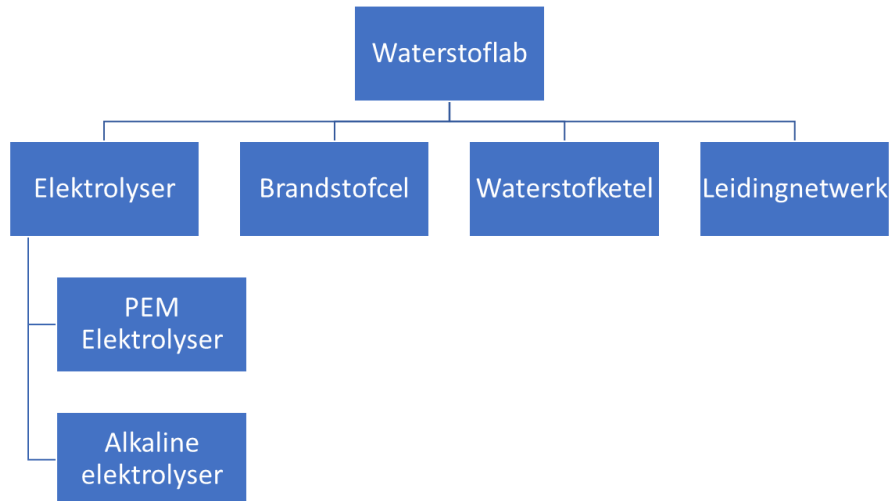
- ResQ-tape. (sd). *Producten ResQ-tape*. Opgeroepen op Mei 15, 2021, van ResQ-tape:
<https://www.resqtape.nl/nl/producten>
- Rijksoverheid. (sd). *Overheid stimuleert de inzet van meer waterstof*. Opgeroepen op Mei 13, 2021, van Rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/overheid-stimuleert-de-inzet-van-meer-waterstof>
- RIVM. (sd). *Energietransitie*. Opgehaald van RIVM:
<https://www.rivm.nl/onderwerpen/energietransitie>
- RVO. (2018, Januari 12). *De eisen voor waterstof in aardgas*. Opgehaald van RVO:
<https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/energie-en-milieu-innovaties/gassamenstelling/waterstof-aardgas/de-eisen-voor-waterstof-aardgas>
- Schornagel, A. (sd). *CO₂ corrosie van roestvast staal in alkaliën en hypochloriet*. Opgeroepen op Juni 14, 2021, van ALURVS: <https://www.alurvs.nl/roestvast-staal/artikellijst/456/>
- Shell. (sd). *Energy and innovation*. Opgehaald van Shell: <https://www.shell.nl/energy-and-innovation/waterstof/waterstof-grijs-blauw-groen.html>
- Spoelstra, M. (2020). *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*. Arnhem.
- Staffell, I. (2018). *The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system*.
- Stedin. (2019, Maart 12). *Rozenburg klaar voor verwarming met 100% waterstof*. Opgehaald van Stedin: <https://www.stedin.net/over-stedin/pers-en-media/persberichten/rozenburg-klaar-voor-verwarming-met-100-procent-waterstof>
- Swain, M. R., Filoso, P., & Swain, M. (2004). *Ignition of lean hydrogen-air mixtures*. International Journal of Hydrogen energy 30, University of Miami, Department of Mechanical Engineering, Miami. Opgehaald van
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319904003763>
- TNO. (sd). *Wat is waterstof?* Opgehaald van TNO:
<https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energietransitie/roadmaps/co2-neutrale-industrie/waterstof-voor-een-duurzame-energievoorziening/tien-dingen-die-je-moet-weten-over-waterstof/>
- Waterstofnet. (sd). *Eigenschappen van waterstof*. Opgeroepen op Juli 12, 2021, van Waterstofnet:
https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/Pdf-Ppt/waterstoftabel.pdf
- Waterstofnet. (sd). *Hoe verloopt opslag en distributie?* Opgehaald van Waterstofnet:
<https://www.waterstofnet.eu/nl/waterstof/wat-is-waterstof/hoe-verloopt-opslag-en-distributie#default>
- waterstofnet. (sd). *Welke toepassingen kent waterstof*. Opgehaald van Waterstofnet:
<https://www.waterstofnet.eu/nl/waterstof/wat-is-waterstof/welke-toepassingen-kent-waterstof>

YARA. (2019, Juli 16). *Kunstmestindustrie halveert uitstoot broeikasgas*. Opgeroepen op Mei 18, 2021, van YARA: <https://www.yara.nl/gewasvoeding/uitgelicht/akkerbouw/yara-akkeractueel-04/kunstmestindustrie-halveert-uitstoot-broeikasgas/>

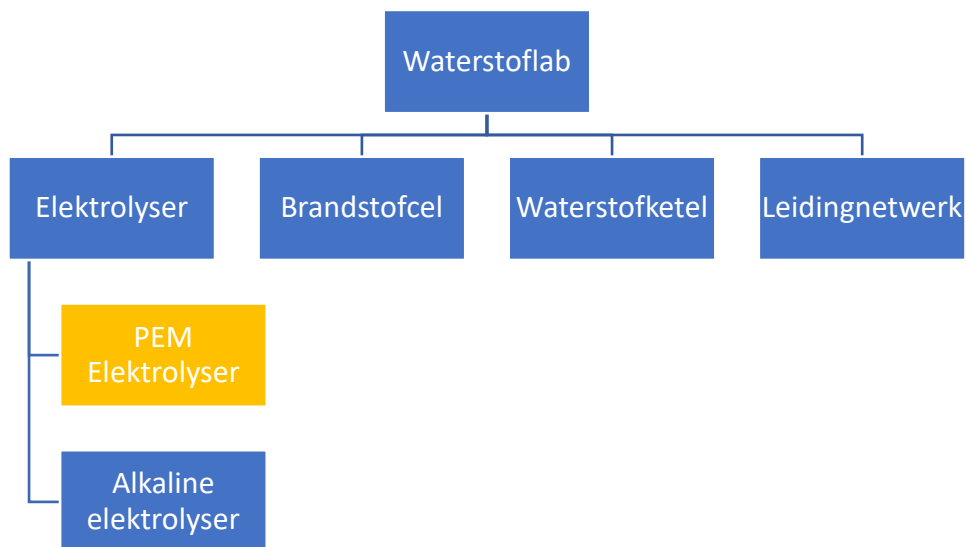
Zeeuws Energieakkoord. (sd). *Waterstof*. Opgeroepen op Mei 19, 2021, van Zeeuws Energieakkoord: <https://www.zeeuwsenergieakkoord.nl/bibliotheek/waterstof>

BIJLAGE A: ONTWERP VAN HET WATERSTOFLAB

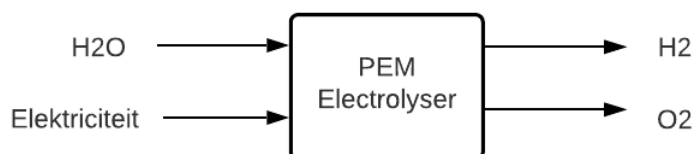
In deze bijlage bevinden zich de P&ID's, PFD's en blokschema's van het waterstoflab. De bijlage is opgedeeld in secties van het waterstoflab. Onderstaand is een organogram weergegeven van het waterstoflab. Per sectie zal het behandelde onderdeel van het waterstoflab gearceerd worden ter verduidelijking.



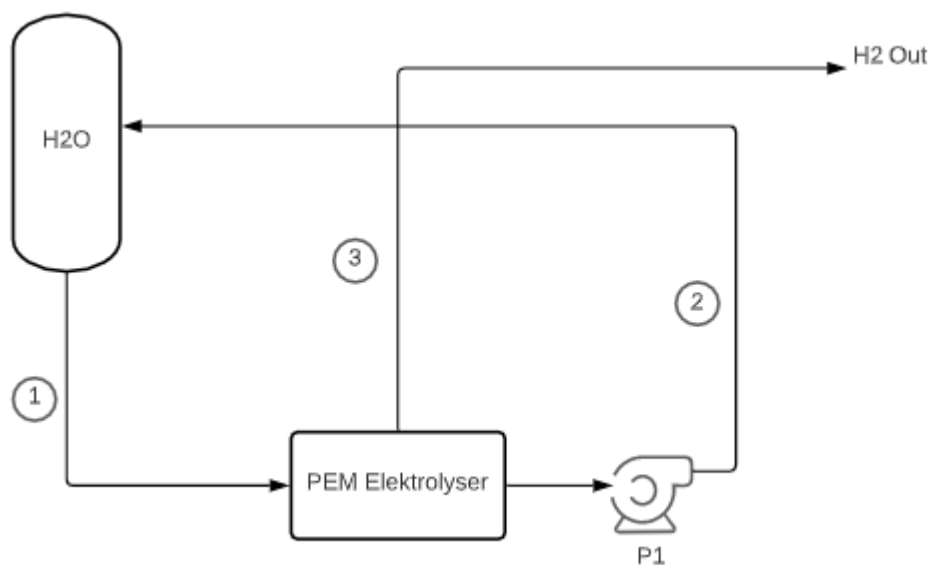
BIJLAGE A1: PEM ELEKTROLYSER



BLOKSCHEMA: PEM ELEKTROLYSER

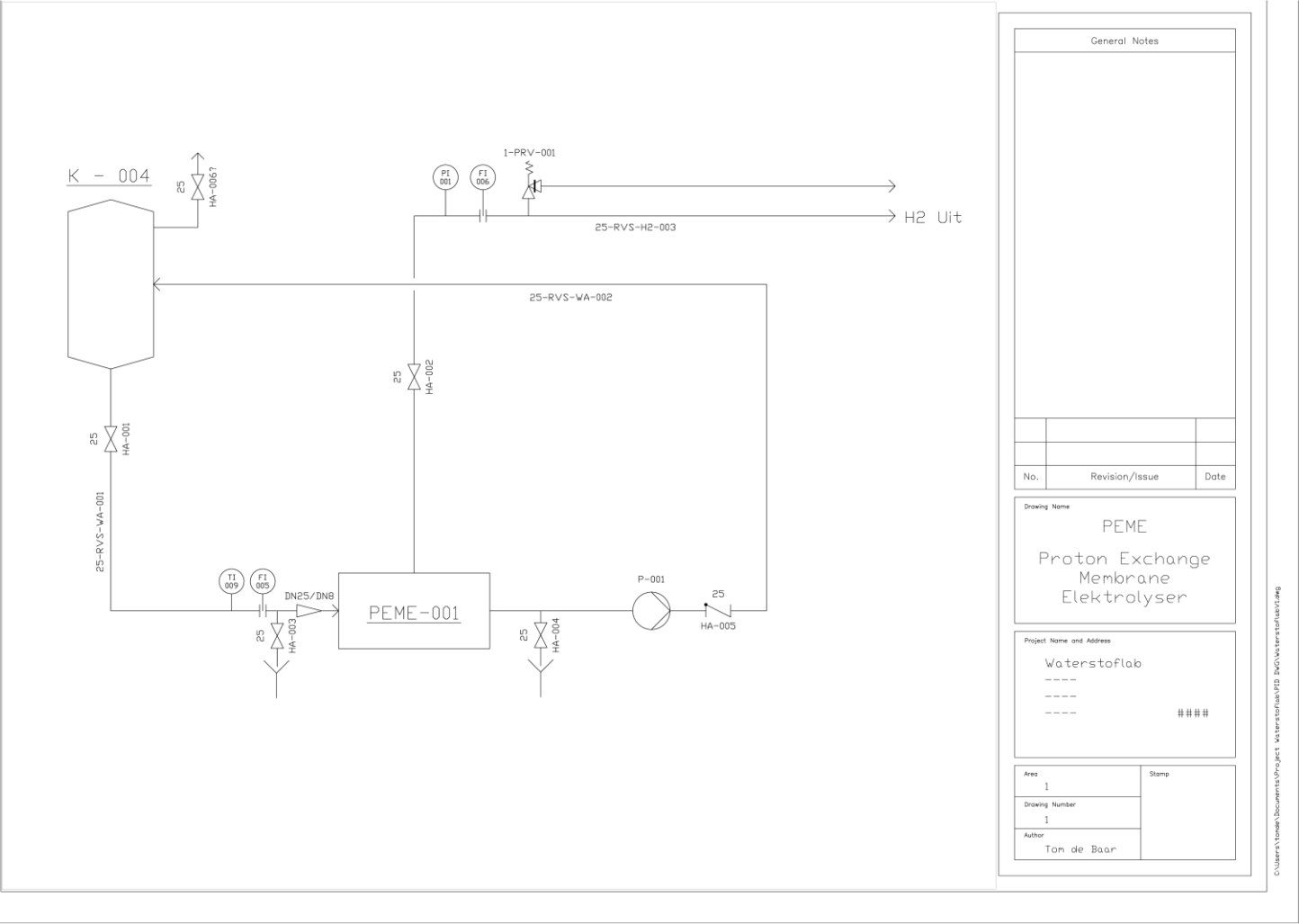


PFD: PEM ELEKTROLYSER

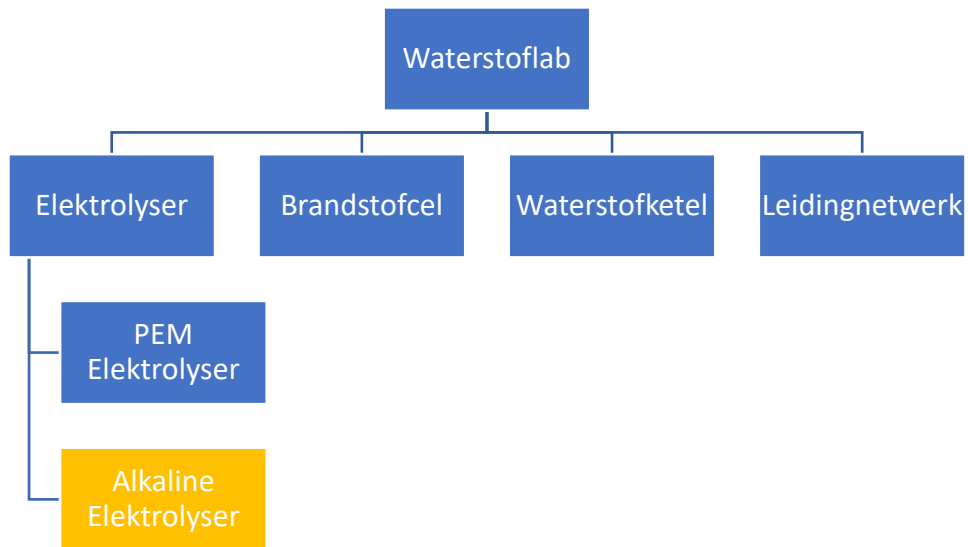


Nr.	Afkorting	Toelichting	Medium	Flow minimaal	Flow maximaal	Druk	Temperatuur
1	WF	Water flow naar elektrolyser	H2O	-	0,183 kg/s	-	-
2	RF	Return flow naar watertank	H2O	-	-	-	80°C
3	WO	Waterstof outlet	H2	0,31 Nm ³ /h	1,57 Nm ³ /h	20 Bar	-

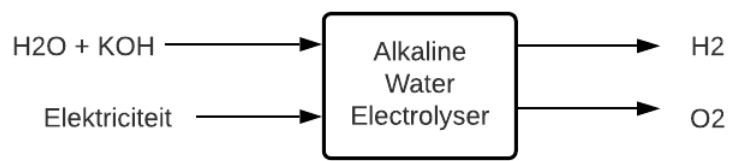
P&ID: PEM ELEKTROLYSER



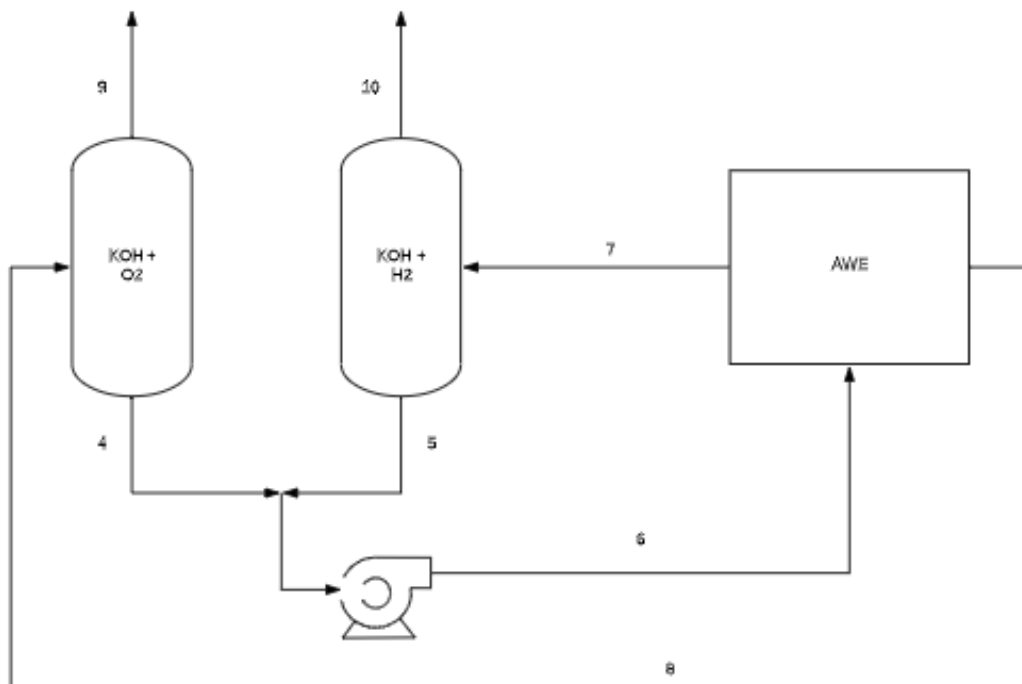
BIJLAGE A2: ALKALINE ELEKTROLYSER



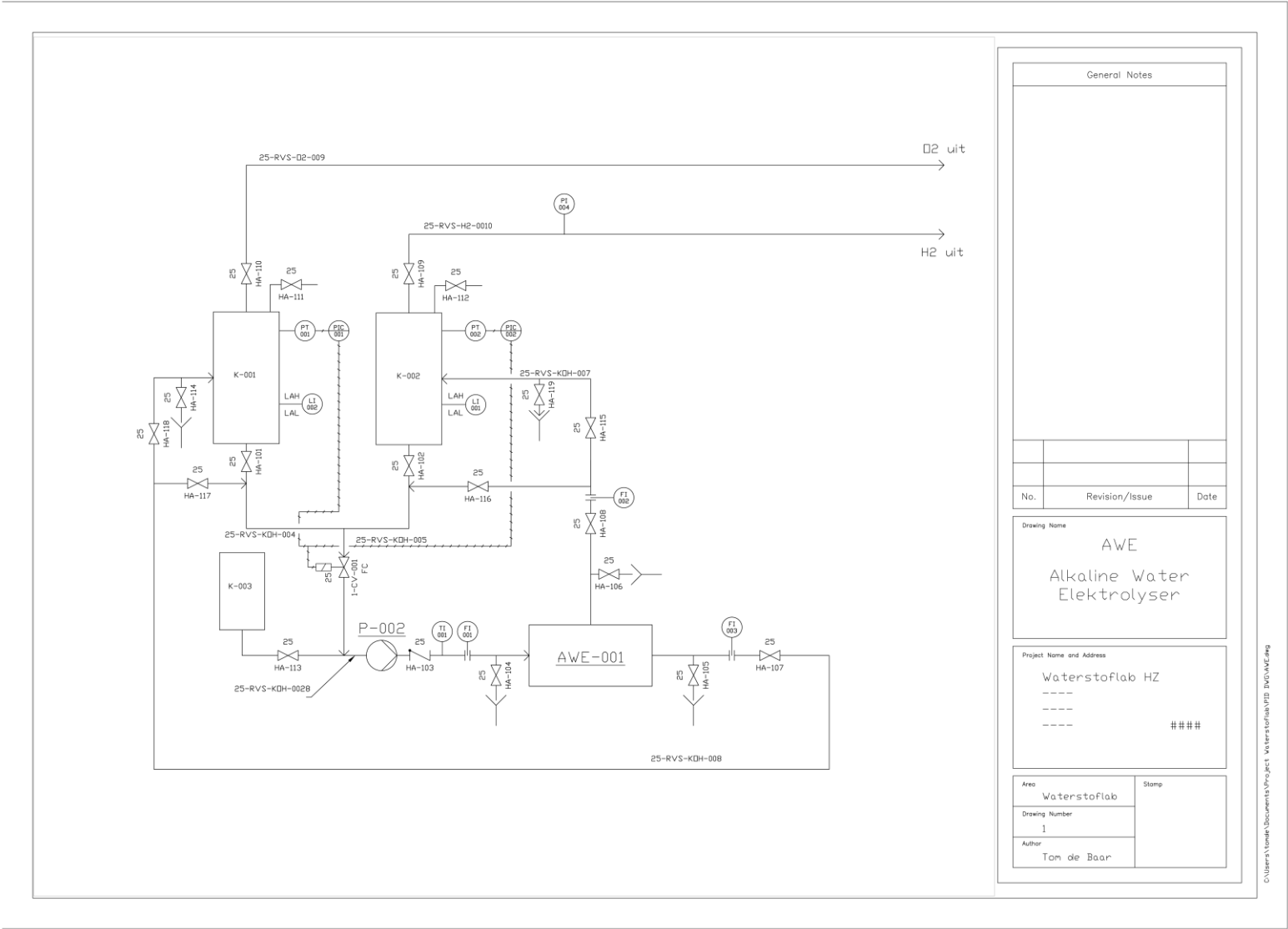
BLOKSCHEMA: ALKALINE ELEKTROLYSER



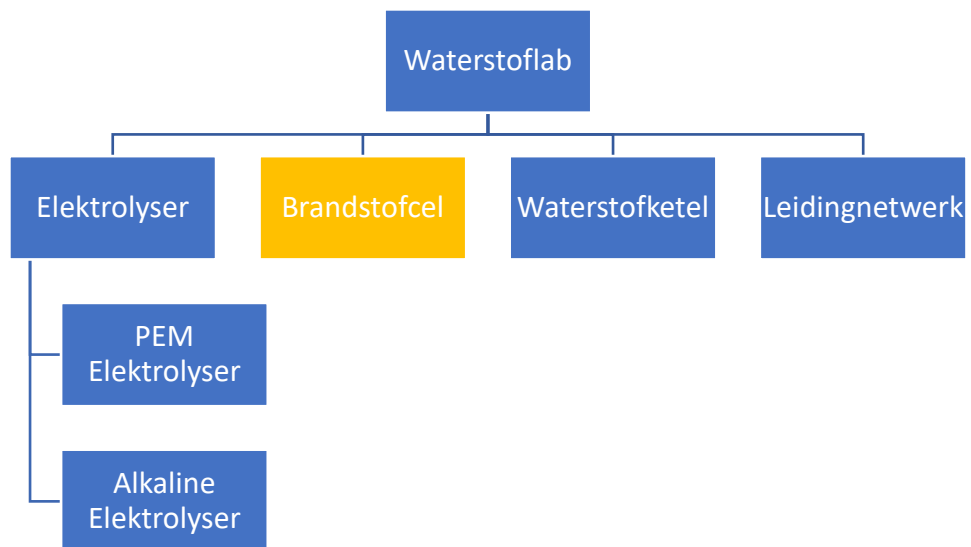
PFD: ALKALINE ELEKTROLYSER



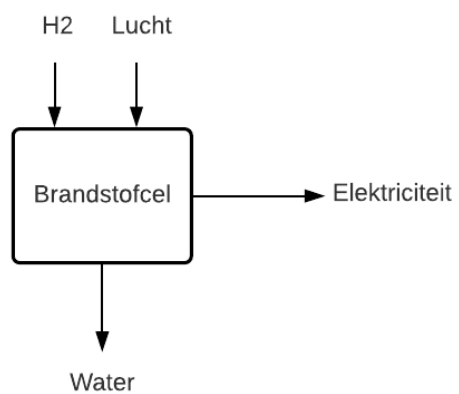
Nr.	Afkorting	Toelichting	Medium	Flow minimaal	Flow maximaal	Druk	Temperatuur
4	WF	Water flow naar elektrolyser	H ₂ O + KOH	-	-	-	-
5	WF	Water flow naar elektrolyser	H ₂ O + KOH	-	-	-	-
6	WF	Water flow naar elektrolyser	H ₂ O + KOH	-	-	-	-
7	WRF	Waterstof en KOH return naar opslagtank	H ₂ + KOH + H ₂ O	-	2 Nm ³ /h	5 Bar	50-80C
8	ZRF	Zuurstof en KOH return naar opslagtank	O ₂ + KOH + H ₂ O	-	-	-	80C
9	ZO	Zuurstof outlet	O ₂	-	-	-	80C
10	WO	Waterstof outlet	H ₂	-	-	-	-



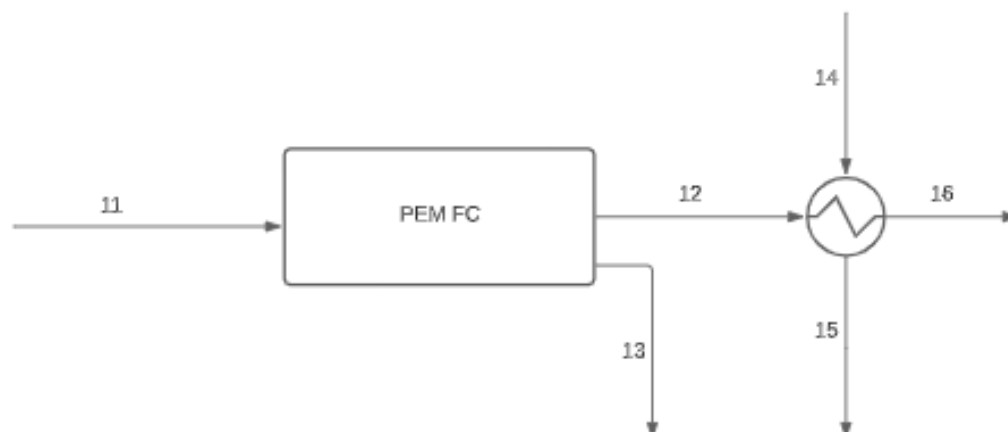
BIJLAGE A3: BRANDSTOFCEL



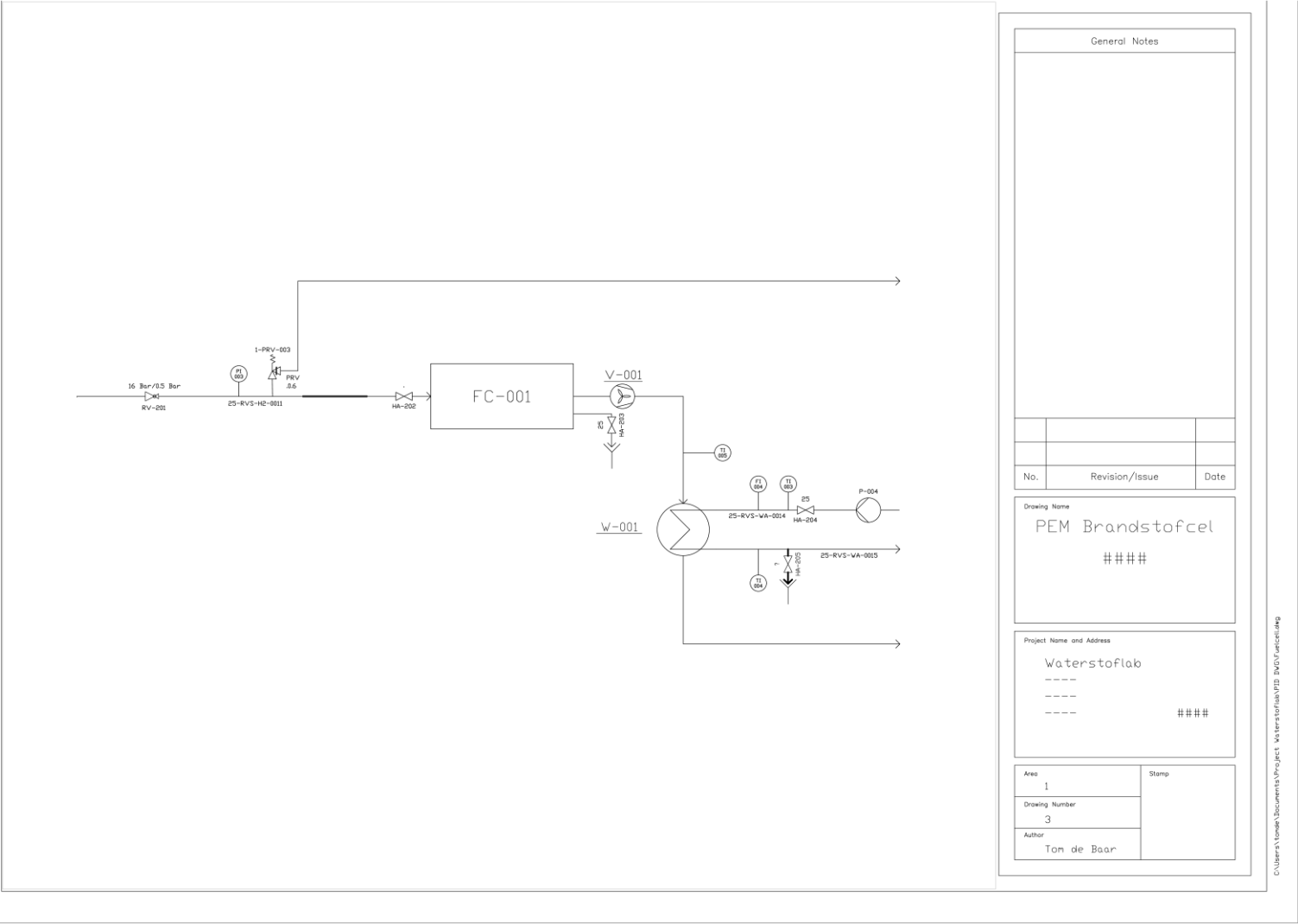
BLOKSCHEMA: BRANDSTOFCEL



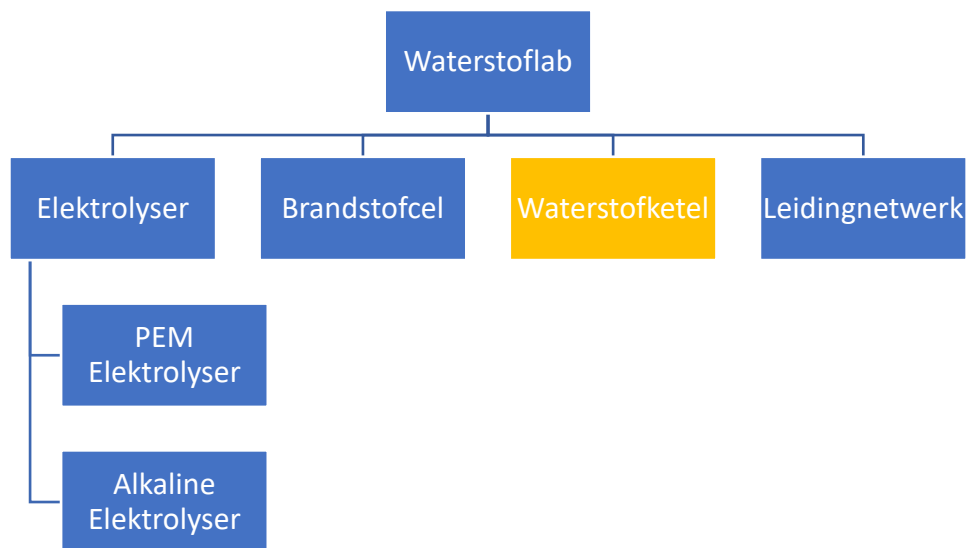
PFD: BRANDSTOFCEL



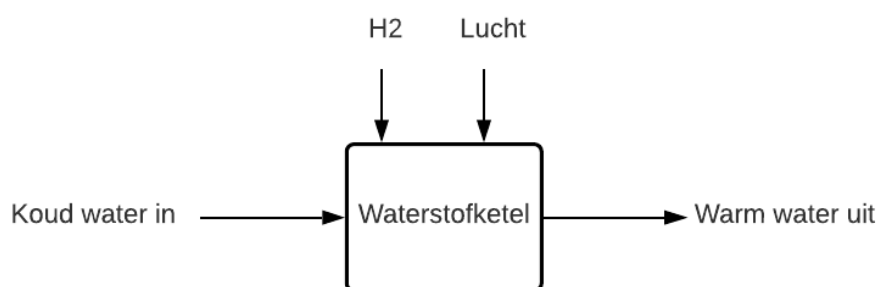
Nr.	Afkorting	Toelichting	Medium	Flow minimaal	Flow maximaal	Druk	Temperatuur
11	HI	Waterstof inlet	H2	-	-	0,5 bar	-
12	LI	Lucht inlet	Lucht	-	-	-	65
13	WO	Water outlet	H2O	-	-	-	-
14	WI	Water inlet	H2O	-	-	-	-
15	WO	Water outlet	H2O	-	-	-	-
16	LO	Lucht outlet	Lucht	-	-	-	-



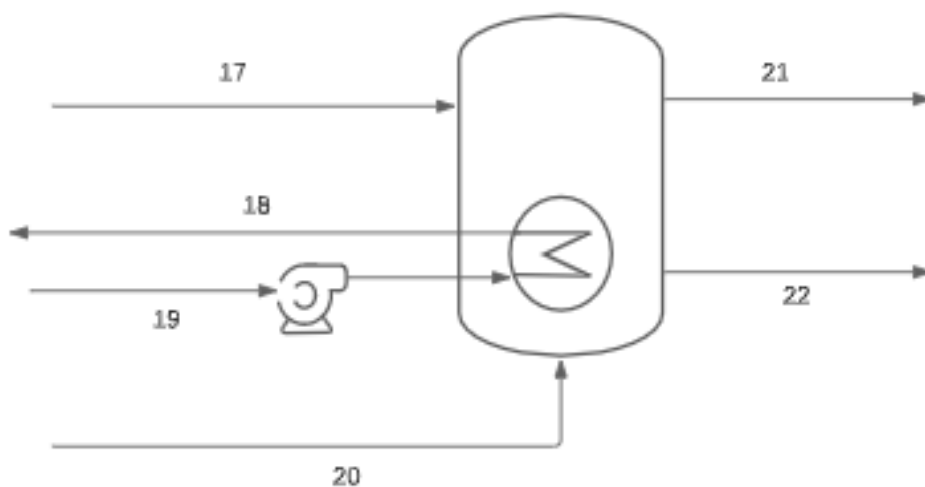
BIJLAGE A4: WATERSTOFKETEL



BLOKSCHEMA: WATERSTOFKETEL

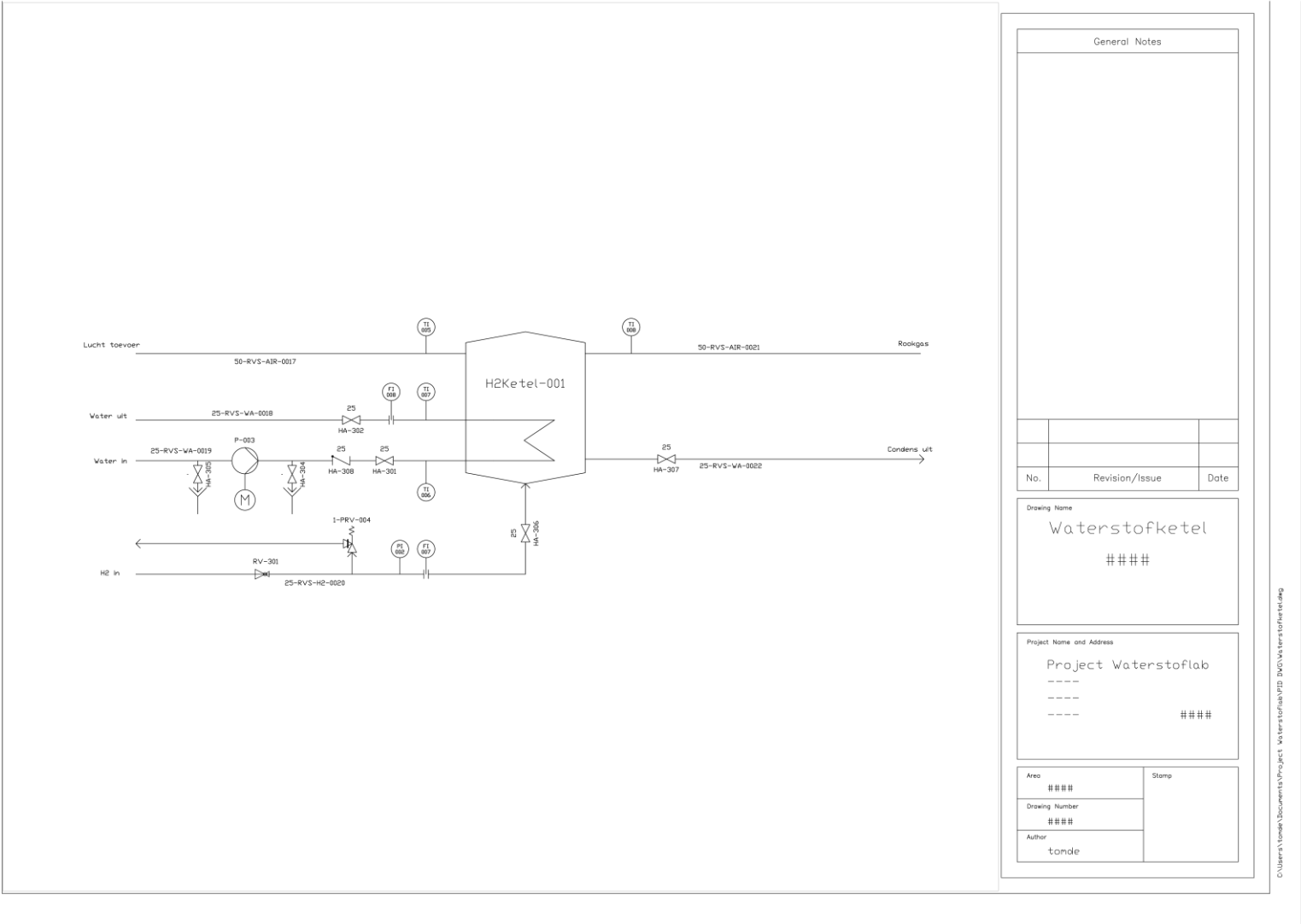


PFD: WATERSTOFKETEL

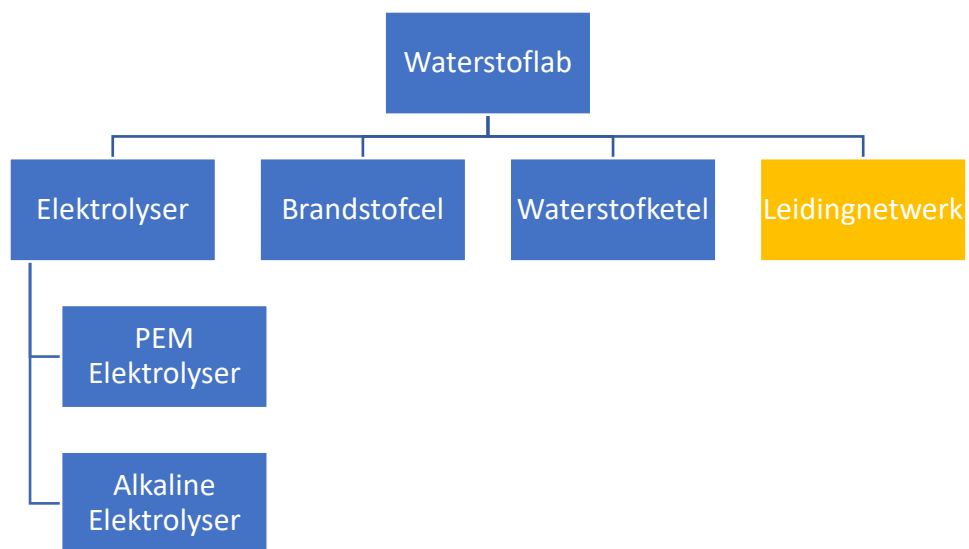


Nr.	Afkorting	Toelichting	Medium	Flow minimaal	Flow maximaal	Druk	Temperatuur
17	LI	Lucht inlet	-	-	-	-	-
18	WO	Water outlet	H2O	-	-	-	-
19	WI	Water inlet	H2O	-	-	16 Bar	-
20	HI	Waterstof inlet	H2	-	-	-	-
21	LO	Lucht outlet	-	-	-	-	-
22	CO	Condens outlet	H2O	-	-	-	-

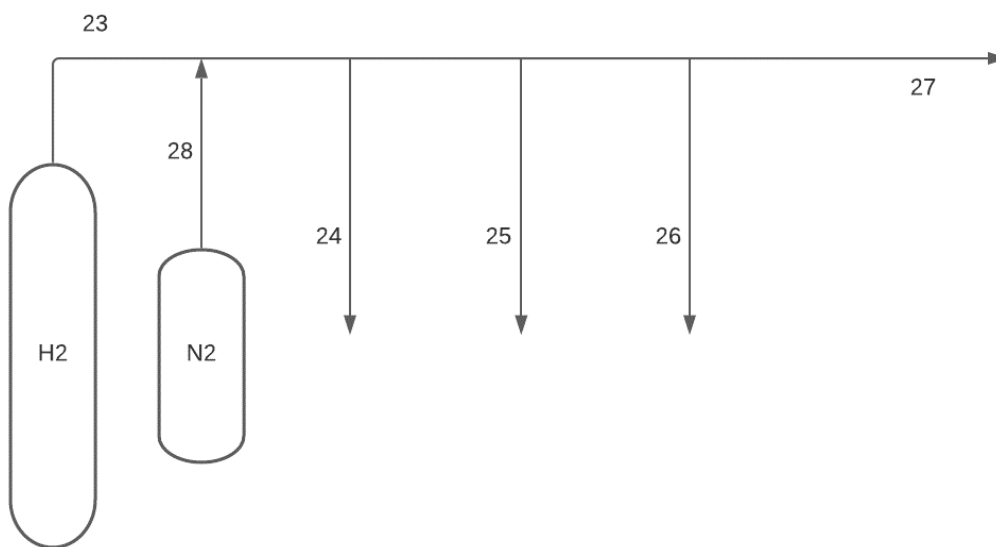
P&ID: WATERSTOFKETEL



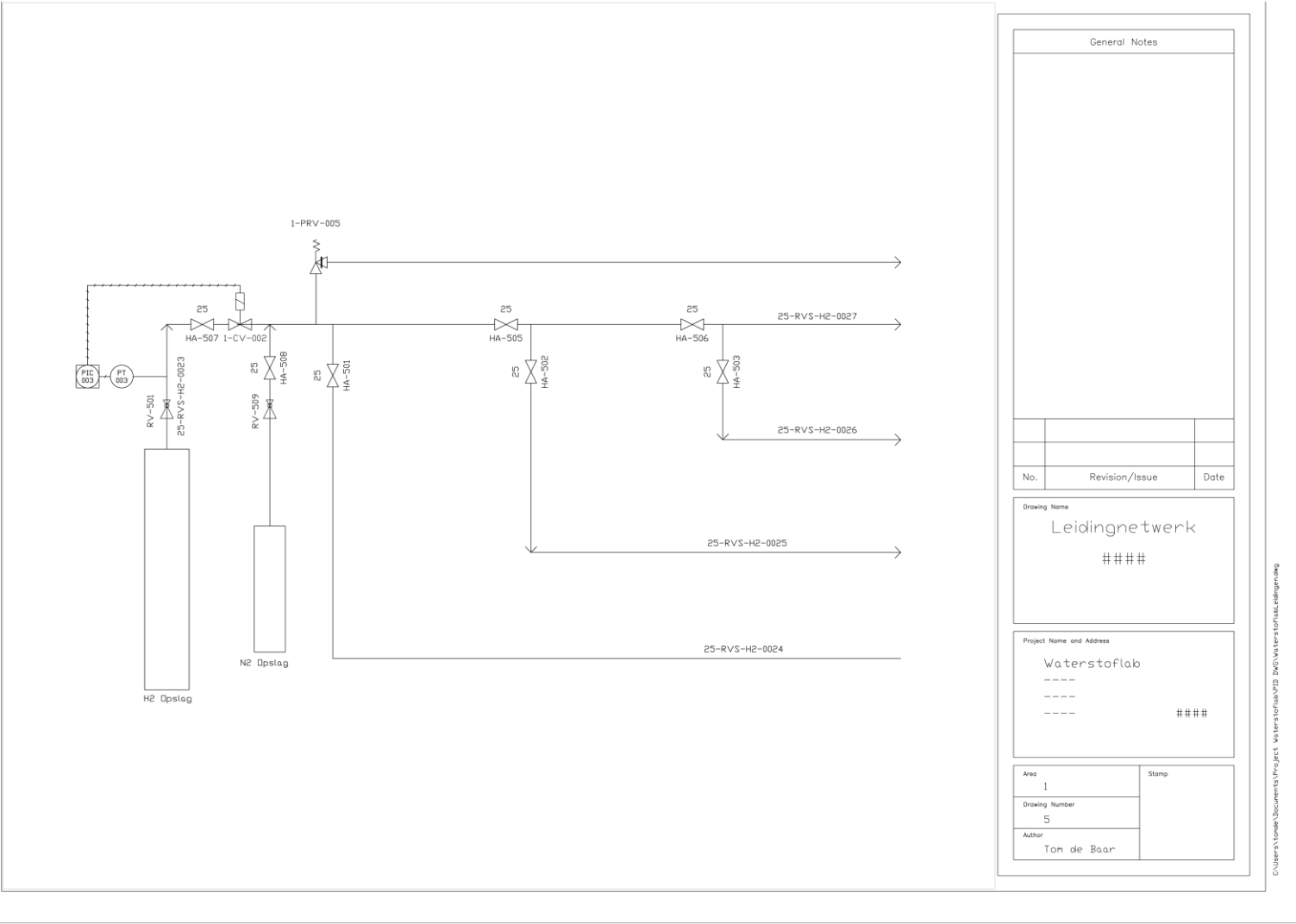
BIJLAGE A5: LEIDINGNETWERK



PFD: LEIDINGNETWERK



Nr.	Afkorting	Toelichting	Medium	Flow minimaal	Flow maximaal	Druk	Temperatuur
23	HO	Waterstof outlet	H2	-	-	200 Bar	-
24	HO	Waterstof outlet	H2	-	-	16 Bar	-
25	HO	Waterstof outlet	H2	-	-	16 Bar	-
26	HO	Waterstof outlet	H2	-	-	16 Bar	-
27	HO	Waterstof outlet	H2	-	-	16 Bar	-
28	N2	Stikstof	N2	-	-	-	-



BIJLAGE A6: MEETSYSTEMEN

Nummer	Omschrijving	Functie
FI-001	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-KOH-0028
FI-002	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-KOH-007
FI-003	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-KOH-008
FI-004	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-WA-0014
FI-005	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-WA-001
FI-006	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-H2-003
FI-007	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-H2-0020
FI-008	Flow Indicator	Meet en weergeeft de flow door 25-RVS-WA-0018

Nummer	Omschrijving	Functie
TI-001	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 25-RVS-KOH-0028
TI-002	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur van de warme lucht die uit FC-001 komt
TI-003	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 25-RVS-WA-0014
TI-004	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 25-RVS-WA-0015
TI-005	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 50-RVS-AIR-0017
TI-006	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 25-RVS-WA-0019
TI-007	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 25-RVS-H2-0020
TI-008	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 50-RVS-AIR-0021
TI-009	Temperature Indicator	Meet en weergeeft de temperatuur in 25-RVS-WA-001

Nummer	Omschrijving	Functie
PI-001	Pressure Indicator	Meet en weergeeft de druk in 25-RVS-H2-003
PI-002	Pressure Indicator	Meet en weergeeft de druk in 25-RVS-H2-0020
PI-003	Pressure Indicator	Meet en weergeeft de druk in 25-RVS-H2-0011
PI-004	Pressure Indicator	Meet en weergeeft de druk in 25-RVS-H2-0010

Nummer	Omschrijving	Functie
LI-001	Level Indicator	Meet en weergeeft het niveau van de KOH oplossing in tank K-002
LI-002	Level Indicator	Meet en weergeeft het niveau van de KOH oplossing in tank K-001

Nummer	Omschrijving	Functie
PT-001	Pressure Transmitter	Meet de druk in tank K-001 en stuurt deze gegevens door naar PIC-001
PT-002	Pressure Transmitter	Meet de druk in tank K-002 en stuurt deze gegevens door naar PIC-002
PT-003	Pressure Transmitter	Meet de druk door 25-RVS-H2-0023 na het reduceerventiel. Stuur deze gegevens door naar PIC-003.

Nummer	Omschrijving	Functie
PIC-001	Pressure Indicator Controller	Weergeeft de druk in K-001 en sluit 1-CV-001 als de druk in K-001 hoger wordt dan de maximale ontwerpdruk van K-001
PIC-002	Pressure Indicator Controller	Weergeeft de druk in K-002 en sluit 1-CV-001 als de druk in K-002 hoger wordt dan de maximale ontwerpdruk van K-002

PIC-003	Pressure Indicator Controller	Weergeeft de druk door 25-RVS-H2-0023 en sluit 1-CV-002 als de druk hoger is dan 16 bar
---------	-------------------------------	---

BIJLAGE B: VEILIG WERKEN MET WATERSTOFINSTALLATIES

Onderstaande de inhoud van het document: “Veilig werken met waterstofinstallaties: Het veilig indelen van zones waarin gewerkt wordt met waterstofinstallaties.”

1. BRANDBARE STOFFEN

1.1 ALGEMEEN

Als een brandbaar gas of brandbare damp in een bepaalde verhouding wordt gemengd met zuurstof kan er een explosief mengsel ontstaan. Bij een lage concentratie aan brandbare stoffen in de lucht hoeft er geen explosie te ontstaan. Snelle verbranding van deze lage concentratie kan zich wel uiten in de vorm van een steekvlam.

Men spreekt bij waterstof over een explosief mengsel bij een volume tussen de 4% en 75%.

1.2 VRIJKOMEN VAN BRANDBARE STOFFEN

Het lekken/vrijkomen van brandbare stoffen komt vaak voor op de onderstaande locaties:

- Afdichtingen
- Pompen
- Roerwerken
- Afsluiters
- Afblaasleidingen
- Monsternamepunten

De hoeveelheid brandbare stof die uit een systeem lekt heeft invloed op de omvang van de explosiezone.

1.3 HET MENGEN VAN EEN BRANDBARE STOF MET LUCHT

Voor een explosie of vlam heeft een brandbare stof zuurstof nodig. De snelheid waarmee een brandbare stof zich kan mengen met zuurstof is afhankelijk van onderstaande omstandigheden.

- **Turbulentie van de lucht**
Bij turbulentie in de lucht zal er een snellere vermenging plaatsvinden met de brandbare stof. Ook zorgt turbulentie ervoor dat het mengsel sneller wordt verdund waardoor de kans op ontsteking wordt weggenomen. Bij lage luchtsnelheden of op plaatsen met obstakels gaat vermenging van de brandstof met zuurstof trager. Door gebruik te maken van kunstmatige ventilatie kan de menging worden versneld.
- **De snelheid van uitstroming**
Als brandbare stoffen met een hoge snelheid vrijkomen ontstaat er lokaal een hoge turbulentie. Hierdoor vindt er een snellere menging met de lucht plaats.
- **Dichtheid van een brandbare stof**
Als de dichtheid van een brandbare stof groter is dan de lucht, zal deze stof naar beneden zakken. Hierdoor kan er op grondniveau een explosieve atmosfeer ontstaan. Een gas zoals

waterstof dat lichter is dan lucht kan er juist voor zorgen dat er onder het plafond een explosieve atmosfeer ontstaat.

Een brandbare stof zal door het mengen met de lucht in de omgeving de omgevingstemperatuur aannemen. Deze verandering in temperatuur kan invloed hebben op de dichtheid. In de meeste gevallen zal dit verschil echter gering zijn. Het gedrag van een vrijgekomen brandbare stof wordt meestal bepaald door de factoren dichtbij de locatie van de lek. Dit gedrag is belangrijk voor het inrichten van een zone-indeling voor explosies.

1.4 EXPLOSGEGREZEN

Een brandbare stof zal alleen ontsteken als de verhouding met zuurstof binnen een bepaald percentage ligt. Dit percentage is per stof verschillend. Men spreekt bij deze verhouding over LEL en UEL.

UEL: De bovenste explosiegrens. Bij deze grens is er net voldoende zuurstof aanwezig voor een ontsteking. Bij waterstof is deze grens 75 vol.%.

LEL: De onderste explosiegrens. Bij deze grens is er net voldoende brandbare stof aanwezig voor een ontsteking. Bij waterstof is deze grens 4 vol.%.

1.5 ONTSTEKINGSBRONNEN

Mogelijke ontstekingsbronnen:

1. Hete oppervlakken.
2. Vlammen en hete gassen.
3. Mechanische opgewekte vonken, impact, wrijving en schuren.
4. Elektrische installaties en elektrisch materieel.
5. Zwerfstromen en kathodische bescherming.
6. Statische elektriciteit.
7. Bliksem.
8. Radiofrequentie, elektromagnetische golven van 10^4 tot 3×10^{12} Hz.
9. Elektromagnetische straling van 3×10^{11} Hz tot 3×10^{15} Hz.
10. Ioniserende straling.
11. Ultrasone golven.
12. Adiabatische compressie en schokgolven.
13. Exotherme chemische reacties, inclusief zelfontbranding van een stof.

1 t/m 6 zijn de meest voorkomende vormen van ontstekingsbronnen. Bij het indelen van een gevarezone dienen deze ontstekingsbronnen altijd in acht te worden genomen.

1.5.1 HETE OPPERVLAKKEN

VOORBEELDEN VAN HETE OPPERVLAKKEN ZIJN:

- Hete onderdelen van fornuizen, stoomketels, naverbranders, verwarmingsketels etc.
- Kachels en verwarmingselementen
- Rookgaskanalen
- Hete stoom- en productleidingen

- Warmtewisselaars
- Warmgelopen lagers en asdoorvoeringen
- Slippende V-snaren
- Remmen en koppelingen

VOORKOMEN VAN ONTSTEKING:

- Het oppervlak van een materiaal dat in aanraking kan komen met een brandbaar gas mag niet boven de 80% van de minimale ontstekingstemperatuur van het gas komen. Als er oppervlaktes zijn waarbij een opwarming is te verwachten, dienen deze continue te worden bewaakt tot is bewezen dat deze niet boven de 80% van de minimale ontstekingstemperatuur komt. De minimale ontstekingstemperatuur voor waterstof is 585°C. De temperatuur van een oppervlakte mag niet boven de $585 \cdot 0,8 = 468^\circ\text{C}$ uitkomen.

1.5.2 VLAMMEN EN HETE GASSEN

VOORBEELDEN VAN VLAMMEN EN HETE GASSEN ZIJN:

- Aanstekers en lucifers
- Roken
- Branders in fornuizen, stoomketels, naverbranders, fakkels etc.
- Elektrische vlambogen
- Laswerkzaamheden
- Luchtvoorverwarmers
- Rookgaskanalen
- Droogtorens
- Geisers
- Kachels

VOORKOMEN VAN ONTSTEKING:

- Open vuur en het veroorzaken van vonken door bijvoorbeeld lassen, is ten alle tijden niet toegestaan.
- Apparaten waar een explosieve stof doorheen gaat dienen te worden uitgerust met een vlamdover.

1.5.3 MECHANISCH OPGEWEKTE VONKEN

VOORBEELDEN VAN MECHANISCH OPGEWEKTE VONKEN ZIJN:

- Slijpen
- Slaande of stotende bewerkingen met handgereedschappen
- Hakken en boren
- Vreemde voorwerpen in transportsystemen
- Ventilatoren

VOORKOMEN VAN ONTSTEKING

Apparatuur dat mechanisch vonken kan veroorzaken is niet toegestaan.

Mechanisch apparaat waarvon vonken kunnen ontstaan mag alleen gebruikt worden als er bewezen is dat er geen explosiegevaar is op het moment van gebruik.

Apparaat met wrijvingsvlakken waarvon een combinatie van lichtmetaal en staal voorkomt, is niet toegestaan. RVS is hierop uitgezonderd.

1.5.4 ELEKTRISCHE INSTALLATIES EN ELEKTRISCH MATERIAAL

Voorbeelden van elektrische installaties en elektrisch materiaal zijn:

- Openen of sluiten van elektrische contacten
- Losse verbindingen
- Zwerfstromen

VOORKOMEN VAN ONTSTEKING

Elektrische installaties dienen geïnstalleerd en onderhouden te worden omtrent wet- en regelgeving beschreven in NEN-EN-IEC-60079-14. Hierin staat uitgelegd waaraan elektrische componenten moeten voldoen en hoe ze veilig geïnstalleerd en onderhouden moeten worden.

1.5.5 ZWERFSTROMEN EN KATHODISCHE BESCHERMING

Zwerfstromen kunnen worden veroorzaakt door:

- Installaties voor kathodische bescherming
- Elektrisch spoor- of tramwegen
- Kort- of aardsluiting in elektrische installaties
- Blikseminslag
- Elektrisch lassen

VOORKOMEN VAN ONTSTEKING

Alle geleidende delen van een installatie dienen te worden geaard. Dit geldt ook voor delen die in de buurt zitten van elektrische apparaten.

1.5.6 STATISCHE ELEKTRICITEIT

Statische elektriciteit kan ontstaan bij het transporteren van vloeistof, granulaat, poeder of gas. Ook bij het afwikkelen van bijvoorbeeld folie of het lopen van een riem over een schijf kan statische elektriciteit ontstaan. Ontsteking kan voorkomen worden door alle geleidende delen die zich kunnen opladen te aarden.

2. INDELING VAN GEVARENZONE

2.1 ALGEMEEN

Het opzetten van een gevarezone zorgt ervoor dat er optimaal en veilig gewerkt kan worden in een situatie waar er explosiegevaar is. Gevarezones worden ingedeeld in verschillende klassen op basis van explosiegevaar. Een ruimte of gebied kan altijd worden ingedeeld in een hogere klasse (grotere kans op een explosie), maar nooit in een lagere klasse.

2.2 INDELINGSCRITERIA

Voor het indelen van een gevarenzone moeten de onderstaande stappen worden uitgevoerd.

Stap 1: Bepalen of gevarenzone-indeling nodig is.

- Is er een brandbare stof aanwezig?
- Is er een gevaarlijke hoeveelheid van een brandbare stof aanwezig?

Stap 2: Bepaling van de aard van de gevarenzones.

- Wat zijn de eigenschappen van de gevaarbron? (Dichtheid, temperatuur, druk etc)
- Wat zijn de mogelijkheden tot ventilatie?

Stap 3: Bepaal de afmeting van de zones.

- Hoeveel brandbare stof kan er vrijkomen
- Welke ventilatieomstandigheden heersen in de omgeving van de gevaarbron
- Wat is de aard en vorm van obstakels in de omgeving van de gevaarbron

2.3 VERSCHILLENDE ZONES

2.3.1 ZONES

Gevarenzones kunnen ingedeeld worden in 3 groepen.

1. **Zone 0: Continue gevarenbron**
Een brandbare stof komt voortdurende, gedurende lange perioden of herhaaldelijk vrij.
(>10% van de bedrijfsduur)
2. **Zone 1: Primaire gevarenbron**
Een brandbare stof komt af en toe vrij.
(Tussen 0,1% en 10% van de bedrijfsduur)
3. **Zone 2: Secundaire gevarenbron**
Het vrijkomen van een brandbare stof is niet waarschijnlijk.
(<0,1% van de bedrijfsduur)

Deze zones staan ook wel bekend als de “ATEX Zones”.

Het waterstoflab behoort vanwege de mogelijke herhaaldelijke lekkages tot zone 0.

2.3.2 CONTINUE GEVARENBRON

Voorbeelden van continue gevarenbronnen zijn:

- Ontluchtingsopeningen
- Uitmondingen van analysers
- Ademventielen op tanks en vaten

2.3.3 PRIMAIRE GEVARENBRON

Voorbeelden van primaire gevarenbronnen zijn:

- Plaatsen waar delen frequent aan- of losgekoppeld worden
- Pakkingen
- Lekbakken
- Kwetsbare apparatuur
- Onbeschermde kijk- en peilglazen
- Drains

2.3.4

Voorbeelden van secundaire gevarenbronnen zijn:

- Flenzen en schroefdraad
- Aansluitingen van gascilinders
- Pompen

2.4 AFMETINGEN VAN GEVARENZONES

De afmetingen van een zone worden bepaald door het debiet aan brandbaar gas dat een gevaarbron verlaat. Hierna dient te worden bepaald op welke afstanden de concentratie onder de onderste explosiegrens is gedaald. Hierbij dient er rekening gehouden te worden met de ventilatie.

In de buitenlucht of in een vergelijkbare ruime omgeving gaat men uit van een bolvormige explosie. Hierbij is het midden van deze bol de oorsprong van de explosie. Bij het bepalen van de straal van deze bolvormige explosie dient men uit te gaan van de meest ongunstige ventilatieomstandigheden.

In zones waarbij de ventilatie niet vergelijkbaar is met de omstandigheden in de buitenlucht, is de gehele ruimte de gevarezone.

2.5 VORM VAN DE ZONE

Gassen zoals waterstof die lichter zijn dan lucht zullen opstijgen. Hierdoor zal een zone zich cilindrisch naar boven voortzetten. Bij aanwezigheid van een plafond kan hier een paddenstoelvormige explosieve wolk ontstaan, dit vergroot de diameter van een zone.

2.6 AFBLAASVEILIGHEDEN (PRV'S) ALS GEVARENBRON IN DE BUITENLUCHT

Afblaasveiligheden als continue bron:

Als een afblaasveiligheid bij normale bedrijfsomstandigheden regelmatig afblaast, dan dient deze afblaasveiligheid te worden beschouwd als een gevaarbron ter grootte van de afblaascapaciteit.

Afblaasveiligheden als primaire bron:

Als een afblaasveiligheid bij normale bedrijfsomstandigheden kan openen maar nadien altijd weer volledig sluit. De gevaarbron tijdens het openen van de afblaasveiligheid is even groot als de afblaascapaciteit.

Afblaasveiligheid als secundaire bron:

Als een afblaasveiligheid zelden opent of zeer keer kortstondig. Nadien moet de afblaasveiligheid altijd volledig sluiten.

Afblaasveiligheden worden niet beschouwd als gevaarbron als de kans op afblazen verwaarloosbaar klein is en waarvan verwacht wordt dat ze niet lekken.

3. VENTILATIE

3.1 ALGEMEEN

Explosief gas kan verdund worden door turbulente vermenging met lucht tot de concentratie van het aanwezige gas verwaarloosbaar is. Goede ventilatie kan er voor zorgen dat de concentratie van een explosief gas onder de explosiegrens komt waardoor er geen explosie op kan treden.

Ventilatie heeft twee basisfuncties:

1. Snelheid van de verdunning verhogen en de omvang van een zone verminderen
2. De werkingsduur van een explosieve atmosfeer beperken zodat het type van een zone kan worden verlaagd.

Een gevarenczone hangt af van de plaats van de gevarenbron en de ventilatieomstandigheden

Drie plaatsen van een gevarenbron worden onderscheden:

1. In de buitenlucht geplaatste gevarenbron
2. In een open gebouw geplaatste gevarenbron
3. In een gesloten gebouw geplaatste gevarenbron

Bij plaatsing in een gesloten gebouw kunnen vijf ventilatieomstandigheden optreden:

1. Geen ventilatie
2. Beperkte ventilatie
3. Kunstmatige ruimtelijke ventilatie
4. Kunstmatige plaatselijke ventilatie
5. Ventilatie in een groot gebouw

3.2 IN DE BUITENLUCHT GEPLAATSTE GEVARENBRON

Als er geen obstakels zijn die de natuurlijke luchtbewegingen verstoren is de luchtsnelheid gewoonlijk hoger dan 2 m/s en nauwelijks lager dan 0,5 m/s. Bij deze omstandigheden wordt gesproken over buitenluchtomstandigheden en 'wind'.

3.3 IN EEN OPEN GEBOUW GEPLAATSTE GEVARENBRON

Men spreekt over een open gebouw als de open gedeelten van de wanden de onderstaande afmetingen hebben:

- Horizontaal: totale open lengte van ten minste 50% van de totale omtrek
- Verticaal: Totale open hoogte ten minste van 2,5m, waarbij er doorstroming mogelijk is onder het dak. De ruimte onder scheve daken dient ook geventileerd te worden.

3.4 IN EEN GESLOTEN GEBOUW GEPLAATSTE GEVARENBRON

Men spreekt over een gesloten gebouw als er geen natuurlijke ventilatie plaatsvindt. Als er voldoende wordt geventileerd door middel van mechanische ventilatie, spreekt men over beperkte ventilatie.

3.4.1 BEPALING VAN DE VENTILATIECAPACITEIT IN EEN GESLOTEN GEBOUW

De zoneafmeting is afhankelijk van de ventilatiecapaciteit. Om de ventilatiecapaciteit te kunnen bepalen wordt er onderscheid gemaakt tussen twee mogelijkheden:

- **Gematigde capaciteit**
De capaciteit is gematigd wanneer bij het voorzienbare totale lekdebië van de in de ruimte aanwezige gevarenbronnen de gemiddelde concentratie van brandbaar gas in de ruimte 25% van de onderste explosiegrens niet overschrijdt. Voor het waterstoflab betekent dit dat het lekdebië niet groter mag zijn dan 1 vol.%
- **Voldoende capaciteit**
De capaciteit is voldoende wanneer bij het voorzienbare totale lekdebië van de in de ruimte aanwezige gevarenbronnen de gemiddelde concentratie van brandbaar gas in de ruimte 10%

van de onderste explosiegrens niet overschrijdt. Voor het waterstoflab betekent dit dat het lekdebiet niet groter mag zijn dan 0,4 vol.%

De ventilatiecapaciteit kan berekend worden aan de hand van de volgende formule:

$$VC = a \times \frac{100}{LEL} \times \frac{100}{k}$$

VC: De ventilatiecapaciteit, in m³/h lucht

a: Het lekdebiet, in m³/h

k: Is het percentage van de LEL.

LEL is de onderste explosiegrens in volumeprocent.

Rekenvoorbeeld:

In het waterstoflab is de brandstofcel niet goed aangesloten. Hierdoor is een lek met een debiet van 0,5 m³/uur ontstaan.

$$0,5 * (100/4) * (100/10) = 125 \text{ m}^3/\text{h}$$

3.5 KUNSTMATIGE RUIMTELIJKE VENTILATIE

Van kunstmatige ruimtelijke ventilatie wordt gesproken als de atmosfeer in de gehele ruimte wordt vervest door een mechanisch systeem

De beschikbaarheid van de ventilatie heeft invloed op de zone-indeling van een ruimte. De beschikbaarheid kan op drie niveaus worden onderscheiden:

1. **Zwakke beschikbaarheid**

De ventilatie is afhankelijk van menselijk ingrijpen bij uitvallen. Pas bij ingrijpen kan de ventilatie zich weer hervatten

2. **Voldoende beschikbaarheid**

De ventilatie valt zelden uit of alleen voor zeer korte duur

3. **Goede beschikbaarheid**

De ventilatie is dubbel uitgevoerd met een reserve ventilator die bij een defect de andere ventilator op kan vangen.

Deze niveaus zijn ook van toepassing op kunstmatige plaatselijke ventilatie.

De ventilatiecapaciteit van een ruimte is voldoende wanneer bij het hoogst mogelijke lekdebiet de gemiddelde concentratie van brandbaar gas in de ruimte 10% van de onderste explosiegrens niet overschrijdt.

Als de gemiddelde concentratie 25% van de onderste explosiegrens overschrijdt spreekt men over beperkte ventilatie.

Voor het berekenen van de capaciteit wordt de formule uit 3.4.1 gebruikt.

3.6 VENTILATIE VAN EEN GROOT GEBOUW

Een groot gebouw is een ruimte of gebouw met een grote inwendige vrije hoogte waardoor zich in het gebouw een verticale luchtstroom kan ontwikkelen.

Men spreekt over een groot gebouw als:

- De hoogte tussen een dichte vloer en een dicht plafond minstens 8 meter bedraagt
- De horizontale doorsnede van de ruimte zo groot is dat de luchtlaag met een dikte van 1 meter onder het plafond ten minste driemaal de maximale hoeveelheid gas die in één uur uit de gevarenbronnen kan ontsnappen, kan verdunnen tot de onderste explosiegrens.
- Het gebouw van normale constructie is waarbij door berekeningen is aangetoond dat zonder mechanische hulpmiddel de lucht in de gehele ruimte voldoende kan worden ververs

4. AFMETINGEN EN KLASSE VAN DE GEVARENZONE

4.1 DEBIET VAN GEVARENBRONNEN

Lekdebiet van gevaarbronnen kan worden opgedeeld in twee grootten:

1. Kleine gevaarbronnen met een debiet tot 1 gram/s
2. Grote gevaarbronnen met een debiet tussen 1 gram/s en 10 gram/s

Een debiet groter dan 10 gram/s komt tijdens normale omstandigheden zelden voor. Mocht dit wel (vaak) voorkomen dan dient er een berekening te worden gemaakt binnen welk gebied het gas explosief is.

4.2 VENTILATIEOMSTANDIGHEDEN IN DE OMGEVING VAN DE GEVARENBRON

4.2.1 GEVARENBRON IN DE BUITENLUCHT

Bij buitenluchtomstandigheden ontstaat een bolvormige gevaarzone met de gevaarbron als middelpunt.

- Kleine gevaarbron: Een zone met een straal van 1 meter vanaf de gevaarbron
- Grote gevaarbron: Een zone met een straal van 7 meter vanaf de gevaarbron

4.2.2 IN EEN OPEN GEBOUW GEPLAATSTE GEVARENBRON

Voor open gebouwen gelden dezelfde zoneafmetingen als voor een gevaarbron in de buitenlucht.

4.2.3 EEN GEVARENBRON IN EEN GESLOTEN GEBOUW

Geen ventilatie

Bij geen ventilatie strekt de zone zich uit over de gehele ruimte waarin de gevaarbron zich bevindt.

Beperkte ventilatie

Bij beperkte ventilatie met een gematigde capaciteit ontstaat een zone die zich uitstrekt over de gehele ruimte waarin de gevaarbron zich bevindt.

Kunstmatige ruimtelijke ventilatie

Bij kunstmatige ruimtelijke ventilatie ontstaat een zoneafmeting die:

- Voor zwakke beschikbaarheid van de ventilatie gelijk is aan die voor buitenluchtomstandigheden en afhankelijk van de klasse van de bron een aanvullende zone voor de gehele ruimte
- Voor voldoende beschikbaarheid van de ventilatie gelijk is aan die voor buitenluchtomstandigheden en een aanvullende zone 2 voor de gehele ruimte;
- Voor goede beschikbaarheid van de ventilatie gelijk is aan die voor buitenluchtomstandigheden.

5. BEGRENZING VAN GEVARENZONE

Obstakels kunnen ervoor zorgen dat de ventilatie belemmerd wordt. Hierdoor kan een stof zich minder snel verdunnen tot een niet explosieve concentratie.

Veel voorkomende obstakels zijn:

- Muren en dijken
- Goten, greppels en sloten
- Kuilen, kelders en putten
- Hellende bodems of daken

Als een muur of plafond openingen heeft voor bijvoorbeeld ventilatie, of een deur heeft die voor een lange tijd open staat, ontstaat er aan de buitenzijde van deze openingen een gevarenczone van 1m.

Openingen kunnen worden opgedeeld in verschillende klassen:

Type A

- Open doorgangen voor toegang of ten behoeve van nutsvoorzieningen.
- Vast aangebrachte ventilatieopeningen in ruimten en gebouwen die frequent of langdurig open zijn

Type B

Gewoonlijk gesloten openingen die niet frequent worden geopend en precies afsluiten

Type C

Dezelfde type opening als type B, echter zijn openingen van type C ook voorzien van bijvoorbeeld pakkingen. Of een dubbel uitgevoerde opening van type B, die onafhankelijk van elkaar kan sluiten.

Type D

Dezelfde type opening als type C, deze opening kan alleen in geval van nood worden geopend.

Zone voor de opening	Type van de opening	Klasse van de gevarenbron en zone-afmeting die door de opening wordt veroorzaakt
Zone 0	A B C D	Continu Continu/primair* Secundair (r=1m) Geen uitstroming
Zone 1	A	Primair Primair/secundair* Secundair/geen uitstroming*

	B C D	Geen uitstroming
Zone 2	A B C D	Secundair Secundair/geen uitstroming* Geen uitstroming Geen uitstroming

*In het bepalen van de klasse en zoneafmeting dient rekening gehouden te worden met de frequentie van het openen.

BIJLAGE C: TABEL MET ZONE AFMETINGEN

Zone en afmetingen in relatie tot de ventilatie (gebaseerd op de NPR 7910-1:2012)

Buitenlucht			
Omstandigheden	Klasse bron	Zone	afmetingen
Normaal gesproken voldoende windsnelheid > 0,5 m / s	Alle	Overeenkomstig klasse van de gevarenbron ¹	R = 1 m, 7 m of anders bepaald ²
Open gebouw			
Wanden : 50% van de omtrek open over tenminste 3 zijden en minimaal 2,5 hoogte	Alle	Overeenkomstig klasse van de gevarenbron	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Gesloten gebouw			
Geen ventilatie	Continu	Zone 0	Gehele ruimte
	Primair	Zone 0	Gehele ruimte
	Secundair	Zone 1	Gehele ruimte
Gesloten gebouw met beperkte ventilatie ³			
Gematigde capaciteit VV < 5 ⁴	Continu	Zone 0	Gehele ruimte
	Primair	Zone 1	Gehele ruimte
	Secundair	Zone 2	Gehele ruimte
Voldoende capaciteit VV > 5	Continu	Zone 0	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
	Primair	Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
	Secundair	Zone 2	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Gesloten gebouw met kunstmatige ruimtelijke ventilatie ⁵			
Zwakke beschikbaarheid met voldoende capaciteit (1 ventilator)	Continu	Zone 0	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 1	Overige deel van de ruimte
	Primair	Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 2	Overige deel van de ruimte
Voldoende beschikbaarheid met voldoende capaciteit (1 ventilator)	Continu	Zone 2	Gehele ruimte
		Zone 0	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
	Primair	Zone 1	Overige deel van de ruimte
		Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Goede beschikbaarheid met voldoende capaciteit (2 ventilatoren of andere borging)	Continu	Zone 2	Overige deel van de ruimte
		Zone 2	Gehele ruimte
	Primair	Zone 0	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Gesloten gebouw met kunstmatig plaatselijke ventilatie	Continu	Zone 2	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 0	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
	Voldoende beschikbaarheid met voldoende capaciteit (1 ventilator)	Primair	Zone 1
Zone 2			R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Secundair		Zone 2	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Goede beschikbaarheid met voldoende capaciteit (2 ventilatoren)	Continu	Zone 2	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
	Primair	Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Goede beschikbaarheid met absolute waarborgen en voldoende capaciteit (2 ventilatoren + noodstroom)	Continu	Zone 2	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
	Primair	Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
Groot gebouw	Alle	Zone 2	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 1	R = 1 m, 7 m of anders bepaald
		Zone 0	R = 1 m, 7 m of anders bepaald

1. Continue bron = zone 0, primaire bron = zone 1, secundaire bron = zone 2
2. R = 1 m bij een lekdebiet tot 1 gram / s, R = 7 m bij een lekdebiet van 1 – 10 gram / s, R = anders bepaald bij een lekdebiet > 10 gram / s. (LET OP: lekdebieten gaat over gram / s damp of gas)
3. Beperkte ventilatie is natuurlijke trek. De capaciteit kan worden ingeschat door met een luchtsnelheid van 0,1 m/s door openingen te rekenen.
4. De ventilatievoud moet niet al te klein worden, anders moet deze situatie worden beschouwd als geen ventilatie.
5. De ventilatievoud moet minimaal 4x per uur de inhoud van de ruimte verversen en ook de bron tot 10% LEL verdunnen.
6. De afmetingen van de verwaarloosbare zone dienen zelf geïnterpreteerd te worden. Voor verwaarloosbaar kan een afmeting van 50 cm worden gehanteerd. De genoemde afmeting van 50 cm is een indicatie (staat niet in de NPR 7910-1). Het is de bedoeling dat in de verwaarloosbare zone geen ontstekingsbronnen overeenkomstig de zone aanwezig zijn.

BIJLAGE D: DATASHEETS

BIJLAGE D1: DATASHEET PEM BRANDSTOFCEL 5KW

Aantal cellen	120
Vermogen	5000W
Performance	72V @ 70A
Temperatuur buitenkant	5 tot 30°C
Stack temperatuur	65°C
H ₂ druk	0,45 – 0,55 bar
H ₂ puurheid	99,995%
Gewicht	30 Kg
Gewicht controller	2,5 Kg
Afmetingen	65cm x 35cm x 21,2cm
Maximaal debiet	65 L/min
Efficiëntie	40% @ 72V

BIJLAGE D2: DATASHEET PEM BRANDSTOFCEL 3KW

Aantal cellen	72
Vermogen	3000W
Performance	42,2V @ 70A
Temperatuur buitenkant	5 tot 30°C
Stack temperatuur	65°C
H ₂ druk	0,45 – 0,55 bar
H ₂ puurheid	99,995%

Gewicht	15 Kg
Gewicht controller	2,5 Kg
Afmetingen	41,8cm x 35cm x 18,3cm
Maximaal debiet	39 L/min
Efficiëntie	40% @ 43,2V

BIJLAGE D3:DATASHEET PEM ELEKTROLYSER

Vermogen	5 kW
Bereik	1,28 – 9,38 kW
Spanning	125 V
Stroombereik	15 – 75 A
H ₂ productie nominaal	1.10 m ³ /h
H ₂ productie bereik	0,31-1,57 m ³ /h
H ₂ zuiverheid	99,999%
H ₂ druk	0-20 bar
O ₂	0 bar
WATERVERBRUIK	0,27-1,33 kg/uur
Stroomsnelheid water	14-330 kg/uur
Temperatuur	30-70°C
Afmetingen	27,9cm x 10,7cm x 11,0cm
Gewicht	5,6 Kg

BIJLAGE D4: DATASHEET AWE

Vermogen	5 kW
Bereik	1,8 – 9,6 kW
Temperatuur	15 – 85°C
Zuiverheid	99,9%
Alkaline oplossing	KOH 30%
Stroombereik	12-200A bij 54V en 80°C
Afmetingen	26,5cm x 26,5cm x 40cm

BIJLAGE E: INTERVIEW MET EMILE JACKSON EN OSCAR GROOTEN**MEETING MET EMILE JACKSON – HOGESCHOOL ROTTERDAM 8-6-2021**

Bij de Hogeschool Rotterdam heeft men nog geen ervaring met een alkaline elektrolyser. Binnenkort wordt er wel een geleverd.

Knelpunten bij het ontwerp:

- Bestuurlijk → men schrikt snel van het woord “waterstof”
- Te veel focus op de explosiegevoeligheid van waterstof, men vergeet vaak de hoge drukken

Voor het werken met drukken boven de 12 bar is een certificering nodig. Studenten mogen niet zelfstandig werken met een druk boven de 12 bar. Studenten onder de 18 jaar mogen helemaal niet werken met een druk boven de 12 bar.

De ATEX zone wordt per proef bepaald en is dus flexibel, er bevindt zich geen vaste ATEX zone.

Waterstoflekkages worden gedetecteerd door draagbare sensoren en een lekdetectie. Nadeel van een lekdetectie is dat de sensor verzadigd kan raken. Hierdoor duurt het een tijdje voordat deze weer gebruikt kan worden → ResQ Waterstof Tape

Proeven met een elektrolyser vinden bijna altijd buiten plaats, dit in verband met mogelijke lekkages en ontstekingen.

Natuurlijke ventilatie door een gat in een dak is waarschijnlijk effectiever dan afzuiging. Een afzuiger zuigt minder effectief af dan natuurlijke ventilatie → een afzuiger zuigt plaatselijk af en natuurlijke ventilatie niet. Afzuiger moet ATEX gecertificeerd zijn.

MEETING OSCAR GROOTEN – HANZEHOGESCHOOL 10-6-2021

Het waterstoflab van EnTranCe richt zich net als bij de HZ op bedrijven, studenten en onderzoek.

Momenteel bestaan er alleen kleine elektrolyser units. Alkaline en PEM. De alkaline opstelling is ongeveer 30 tot 40 Watt. De opstellingen zijn standaard proefopstelling gericht op studenten.

Er worden voorbereidingen getroffen voor het opschalen naar grotere AWE en PEM elektrolyzers.

Er is nog geen onderzoek geweest naar geschikte materialen voor de AWE. Echter is men wel op de hoogte van de problemen die KOH met zich meebrengt.

- Opmerking over een alkaline elektrolyser: bij een noodstop is men bij Hanze van plan om de KOH die op dat moment in het systeem zit, te lozen in een specifiek daarvoor bestemde bak.

Vanuit de Hanzehogeschool zijn er een aantal personen die zich nadrukkelijk bezig houden met de wetgeving rondom waterstof.

Afstudeerders van werktuigbouwkunde en elektrotechniek zijn bezig met het installeren van een 5kW brandstofcel. Deze brandstofcel is watergekoeld.

Holthausen is een bedrijf dat veelvuldig met brandstofcellen werkt en hier ook veel kennis over heeft. Zij assisteren Hanze ook waar nodig met de installatie van de brandstofcel.

- Tip voor het installeren → plaats een diode achter de brandstofcel. Anders is het mogelijk dat de brandstofcel het begeeft.

De purgeklep op de brandstofcel blaast nu overige H_2 af naar buiten. In de toekomst wordt deze mogelijk gecirculeerd en hergebruikt.

Het is erg moeilijk om alle leidingen volledig af te sluiten voor waterstof. Lekkages gebeuren vaak en zijn geen uitzondering. Ventilatie is erg belangrijk. Het detecteren van lekkages wordt gedaan door onder andere waterstoftape.



Position paper HZ UAS Waterstof-onderwijs en -onderzoek

Auteur: Jan Maas

December 2020

Vanaf 2020 is het Lectoraat Delta Power van de HZ gestart met onderzoek op het gebied van Waterstof als duurzame energiedrager voor de energietransitie.

Verwacht wordt dat waterstof een belangrijke rol zal vervullen in de warmte-transitie, in de mobiliteit en in de verduurzaming van de energie-intensieve industrie.

Als lectoraat willen wij kennis en expertise opbouwen op het gebied van waterstof om zo met name een bijdrage te kunnen leveren aan regionale vraagstukken rond de toepassing van waterstof. Voor Zeeland betreft dit ook vraagstukken rondom de verduurzaming van havens en scheepvaart.

Algemeen wordt verwacht dat waterstof vanaf 2030 een grotere rol zal gaan spelen in de energietransitie. Waterstoftechnieken zijn nog niet volwassen en er is nog niet voldoende groene stroom beschikbaar om voldoende groene waterstof te maken.

De komende 10 jaar worden doorbraken verwacht doordat meer dan 10 GW aan offshore windparken in bedrijf komt voor de Nederlandse kust, en de techniek van elektrolyse opgeschaald zal worden tot GW-niveau, waardoor groene waterstof beschikbaar komt tegen een prijs van 1-2 €/kg (nu nog 3-4 €/kg). De opschaling zal in eerste instantie plaatsvinden voor levering aan de industrie die nu waterstof maakt uit aardgas, waarna waterstof ook voor andere sectoren beschikbaar komt tegen marktconforme tarieven.

De heer Nico Bolleman van bureau Clean Technology Desk in Nieuwvliet heeft ons op basis van een eerder rapport dat hij heeft geschreven i.o.v. de Provincie Zeeland (zie *) geadviseerd om ons onderwijs en onderzoek vooral te richten op:

- Conversie van duurzame energie naar waterstof en omgekeerd, en opslag van waterstof. Verbetering van het rendement van conversie en benutting van nevenproducten zoals restwarmte, zuurstof en waterdamp.

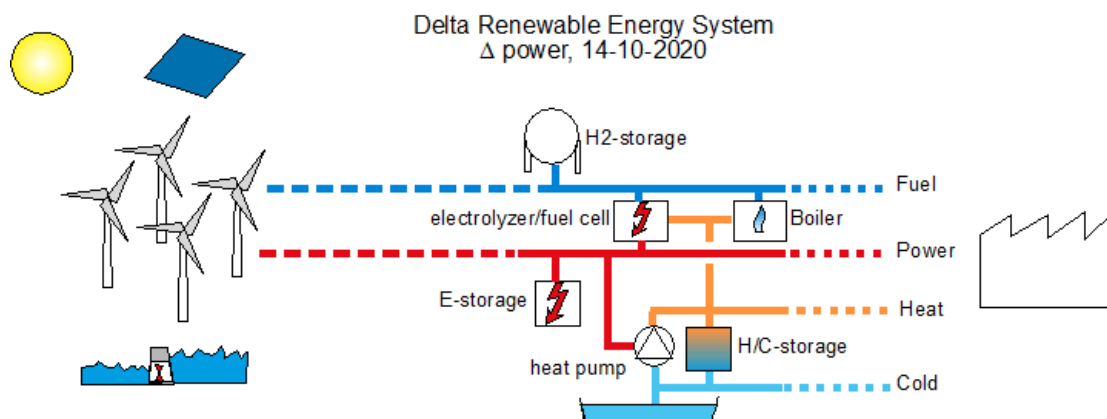
- Toepassing van waterstof in de warmtetransitie van de gebouwde omgeving, in waterstofketels en brandstofcellen, met nadruk op veilige toepassing.
- Toepassing van waterstof in de mobiliteit: zwaar transport, landbouw en schepen, focus op conversie en elektromechanische drive-train.

*) Waterstof als energiedrager voor de Energie Transitie Zeeland, 23 aug. 2018

Waterstof in Lectoraat Delta Power

Zoals gezegd is Waterstof vanaf 2020 een nieuwe “onderzoekspoot” binnen het Lectoraat Delta Power, naast Energie uit Water, Duurzame Warmte/Koude , en Offshore Renewables.

Dit hebben we als volgt gevisualiseerd:



In 2019 zijn we gestart met een onderzoeks-minor waarbij we de stand van de techniek in kaart hebben gebracht op het gebied van productie, transport, opslag en gebruik van waterstof.

In het voorjaar van 2020 hebben studenten in twee minors onderzoek gedaan op het gebied van waterstof-productie en mobiliteit:

- Hydrogen Generator: onderzoek naar alternatieve technieken voor de productie van waterstof met mogelijk hogere efficiency en lagere kosten dan het traditionele elektrolyse-proces.
- Hydrogen Boat: ombouw van één van de twee zonneboten naar een waterstof aangedreven boot, door een nieuw ontwerp van de drive train met een brandstofcel die reeds beschikbaar is en een besturings- en monitoringssysteem.

In dezelfde periode is een student afgestudeerd op de inrichting van een waterstoflab voor het testen van waterstofketels en brandstofcellen t.b.v. ruimteverwarming.

Na de zomer zijn nieuwe opdrachten gestart, met name gericht op realisatie van een werkende waterstofboot en de realisatie van een waterstoflab.

Een groep studenten van de minor Offshore Renewable Energy is bezig met een ontwerp en begroting voor een waterstoflab in de PSD loods, waar o.a. de volgende apparatuur komt te staan: electrolyser, brandstofcel, waterstofketel, waterstofcilinders en waterstof-vulstation, pijpen en buizen, meet- en regelapparatuur.

Dimensionering van deze componenten op basis van middelgrote systemen met een ontwerp-capaciteit van 10-20 kW. Veel aandacht voor veiligheids-aspecten.

Parallel hieraan voert onze Facilitaire Dienst gesprekken met de gemeente Vlissingen, eigenaar van de PSD loods, over een milieuvergunning die nodig is voor het werken met waterstof.

Regelmatig contact met bedrijven die met waterstof werken is essentieel om te weten welke onderzoeksvragen er leven en om vervolgens deze vragen uit te zetten bij studenten die hieraan kunnen werken in de vorm van minors, stages en afstudeerwerk. Hierbij wordt in eerste instantie gedacht aan bedrijven die hun grote waterstof-ambities naar buiten hebben gebracht, zoals DOW, Yara, North Seaports, Delmeco en Zeeland Refinery. In samenwerking met deze bedrijven kunnen proefopstellingen in het waterstoflab gerealiseerd worden waaraan de studenten experimenten, tests en metingen kunnen verrichten.

Waterstof-onderwijs en -onderzoek bij HZ UAS, Scalda en UCR

Parallel aan het onderzoek zal ook onderwijs op het gebied van waterstof moeten worden gegeven. Gezien de toenemende samenwerking tussen HZ UAS, Scalda en Roosevelt Academy lijkt het voor de hand te liggen om onderwijs en onderzoek op het gebied van waterstof onderling af te stemmen.

Onderzoek op het gebied van waterstof past ook heel goed in het nieuw op te richten DeltaKennisCentrum (140 miljoen euro), waarin Scalda, UCR, HZ, Universiteit Utrecht en Wageningen University & Research zullen samenwerken op de thema's: Deltatechnologie, Energietransitie en duurzame voedselproductie. Op deze wijze zouden Wind op Zee en Waterstof de twee pijlers gaan worden binnen het thema Energietransitie. Dit past bij de overheids-visie waarin Wind op Zee straks de belangrijkste bron zal worden van groene elektriciteit en groene waterstof.

Bij HZ UAS BSc niveau zal de nadruk liggen op ontwerp en systeem-integratie van waterstof-systemen, bij Scalda op realisatie, onderhoud en beheer van deze systemen en bij UCR op de sociaal-maatschappelijke impact en draagvlak.

De samenwerking tussen Scalda en HZ UAS op AD-niveau vraagt van de studenten kennis van ontwerp, realisatie en assetmanagement. De minors Offshore Renewable Energie en Energietransitie sluiten hierbij aan.

Omdat deze drie onderwijs-instellingen ook samenwerken in het JRCZ ligt onderlinge afstemming des te meer voor de hand. Naast hoe het PSD-Lab zich verhoudt tot het lab in het JRCZ moet ook helder worden hoe het PSD-Lab zich verhoudt tot o.a. het Technum-lab.

Het waterstoflab dat is voorzien in het JRCZ (30 m² op 1^e etage) zal vooral ingezet worden voor kleinschalige opstellingen voor onderwijs en praktica.

Onderzoek aan middelgrote opstellingen (10-20 kW) zoals beschreven in het vorige hoofdstuk zal gezien de grotere ruimtebehoefte en het hogere veiligheidsrisico plaatsvinden in de PSD loads, waar ook de nodige voorzieningen getroffen zullen worden om deze risico's te mitigeren, zoals waterstofdetectie, ventilatie en explosieveilige deuren.

Benodigd budget waterstof-lab (materialen)

Het budget dat benodigd zal zijn voor de bouw in de PSD loods wordt door ons vooralsnog als volgt geraamd:

• Gasflessen-opslag en koppeling leidingnet	15.000
• PEM Electrolyzer 5-10 kW	50.000
• Alkaline Electrolyzer 5-10 kW	50.000
• Compressor	10.000
• Brandstofcel 4 kW	20.000
• Brandstofcel 2,5 kW	15.000
• Buffervat	10.000
• Waterstofketel	5.000
• Kabels en leidingen	5.000
• Meet- en regelapparatuur	10.000
• Waterstofdetectie, afzuiging	10.000
• Onvoorzien (10%)	20.000 +
Totaal apparatuur	€ 220.000,-

Gedacht wordt aan een financiering waarbij 50% van dit budget betaald wordt door HZ, Scalda en bedrijven, en 50% bekostigd wordt vanuit subsidie-bijdragen.