

April 2019

# Waterstof voor off-grid toepassingen

Publiek eindrapport Haalbaarheidsstudie



Sjoerd Wittkampf & Robert Kleiburg  
RECOY B.V.

## Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd door Recoy B.V. in samenwerking met ECN part of TNO.

### **Het rapport is opgesteld door**

Recoy B.V.

Johan Huizingalaan 400

1066 JS

Amsterdam

[info@recoy.com](mailto:info@recoy.com)

[www.recoy.com](http://www.recoy.com)

### **Contactpersonen**

Recoy:

Sjoerd Wittkampf

088-7326 927

ECN part of TNO:

Yvonne van Delft

088-5154949

### **Subsidie**

Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

### **Informatie & kopie rapport**

Voor meer informatie of een kopie van dit rapport kunt u contact opnemen met Sjoerd Wittkampf via:

[info@recoy.com](mailto:info@recoy.com)

### **Overige publicaties over dit project**

Er zijn naast dit publieke eindverslag op moment van schrijven geen andere publicaties met betrekking tot dit project verschenen.

### **Disclaimer**

Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend.

© 2019 Recoy B.V.

## Samenvatting

In het toekomstige elektriciteitssysteem lijkt een belangrijke rol weggelegd voor waterstof, onder meer om tijdelijke overschotten van wind- en zonne-energie op te slaan en op momenten van energietekorten weer terug om te zetten naar elektriciteit. Met de huidige volatiliteit van de elektriciteitsprijzen is er in Nederland geen positieve business case voor waterstofproductie uit duurzaam opgewekte wind- en zonne-energie en omzetting terug naar elektriciteit. De marges tussen hoge en lage elektriciteitsprijzen zijn 'on-grid' niet hoog genoeg om de investeringen en operationele kosten terug te kunnen verdienen. Zelfs als de investeringen en operationele kosten gelijk zouden zijn aan nul, moet de inkoopprijs van de stroom een factor van meer dan 3 lager zijn dan de verkoopprijs van de stroom, aangezien de round-trip efficiency lager is dan 33%.

Het doel van dit onderzoek was te verkennen of er in de huidige markt, wellicht al wel een rendabele business case te vinden is voor elektriciteit uit waterstof op locaties waar geen netaansluiting beschikbaar is. Onze hypothese is dat elektriciteit uit waterstof op 'off-grid' locaties het eerst rendabel zal worden, omdat de prijs voor de geleverde elektriciteit daar hoger mag zijn. De eerste commerciële toepassingen van zonnecellen waren ook off-grid (ruimtevaart, rekenmachines, offshore industrie) en na steeds verdere kostendalingen en ondersteund door subsidies, is het uiteindelijk gelukt om zon-PV in grote delen van de wereld zonder subsidie concurrerend te krijgen met fossiele centrales.

In dit project hebben we de betrokken consortiumleden gevraagd om kansrijke off-grid toepassingen voor waterstof te vinden in de markten waarin zij actief zijn. Dit heeft geresulteerd in 3 mogelijke use-cases, die wij hebben onderzocht:

1. Leveren van walstroom aan zee cruiseschepen
2. Inzet van brandstofcelaggregaten op bouwplaatsen
3. Inzet van brandstofcelaggregaten op festivalterreinen & evenementlocaties zonder (of met kleine) netaansluiting

Om een beter inzicht te krijgen in de kostenopbouw in de waardeketen en een businessmodel te kiezen met een zo hoog mogelijke rentabiliteit zijn voor alle drie de use-cases 3 verschillende businessmodellen onderzocht:

1. De activiteiten bestaan alleen uit de verhuur van waterstofaggregaten, de waterstof inclusief de waterstofopslag wordt door een gasleverancier geleverd.
2. De activiteiten bestaan uit de verhuur van waterstofaggregaten en de waterstof wordt 'af fabriek' opgehaald met eigen waterstofopslag units.
3. Verticaal geïntegreerd businessmodel: de waterstof wordt zelf geproduceerd met een elektrolyser, opgeslagen in eigen opslagunits en gedistribueerd on-site naar eigen waterstofaggregaten.

Om de economische haalbaarheid te bepalen is voor elke use-case en businessmodel een exploitatiebegroting opgesteld en de netto contante waarde (Net Present Value, hierna: "NPV") bepaald.

Alle onderzochte business cases kwamen uit op een negatieve NPV en waren dus niet economisch haalbaar. De belangrijkste reden hiervoor is dat de stroomprijzen die off-grid gevraagd kunnen worden niet hoog genoeg zijn om een gezonde marge te maken op de ingekochte waterstof of op de elektriciteitskosten in het geval van d.m.v. elektrolyse geproduceerde waterstof.

Een belangrijke bevinding is dat toekomstige kostendaling van brandstofcelaggregaten en elektrolyzers, de NPV wel verbeteren, maar niet voldoende om in de toekomst een positieve business case te krijgen.

De cases, waarbij we de economische haalbaarheid van een elektrolyser hebben onderzocht, kunnen worden verbeterd door gebruik te maken van energieflexibiliteit. Door de elektrolyser te overdimensioneren kunnen momenten met hele hoge elektriciteitsprijzen vermeden worden. Dit verbetert de NPV, maar niet voldoende om deze positief te maken. Voor multi-megawatt elektrolyzers is dit effect sterker, omdat de CAPEX/kW lager zijn en de meerprijs eenvoudiger terug te verdienen is dan bij een kleinere elektrolyser. De hoge CAPEX van de elektrolyser zorgt ervoor dat deze veel draaiuren moet maken om voldoende waterstof te kunnen produceren om zichzelf terug te verdienen. Dit betekent dat elektrolyzers met name afregelend vermogen zullen leveren. Ze gaan uit bij hele hoge prijzen. Bij lage prijzen blijven ze aan. Voor het opslaan van overschotten van zonne- en windenergie is waterstof daarmee minder geschikt. Dit kan veranderen, maar dan moeten elektrolyzers eerst een aantal malen goedkoper worden.

De conclusie is dat van alle onderzochte use cases voor het gebruik van waterstof in off-grid toepassingen, de use case "walstroom voor zee-cruiseschepen" het meest aantrekkelijk is. Echter, de investeringskosten van €15 mln zijn substantieel hoger dan het realiseren van een walstroominstallatie en netaansluiting op de passanger terminal (circa € 1,8 miljoen). Derhalve zal deze toepassing alleen kunnen slagen indien er voldoende zekerheid kan worden geboden aan de investeerder dat er op middellange termijn geen netaansluiting zal komen. Een andere voorwaarde is dat er regelgeving komt vanuit de gemeente Amsterdam die het niet langer mogelijk maakt dat cruiseschepen hun scheepsmotoren gebruiken voor het produceren van stroom en dat de prijs voor walstroom wordt verhoogd naar €0,45/kWh.

Onze aanbeveling is om de mogelijkheid voor walstroomtoepassingen op basis van waterstof concreet te onderzoeken met de havenbedrijven Amsterdam, Rotterdam en Groningen (samen met de andere WaddenzeeHavens). Het doel zou dan moeten zijn om een project te definiëren om ook daadwerkelijk een mobiele brandstofcelaggregaat te gaan bouwen. Het is duidelijk dat hier sprake zal zijn van een significante onrendabele top, waardoor er aanspraak gemaakt zal moeten worden op subsidie-mogelijkheden zoals de SDE++ en DEI++.

## Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	5
1.1	Achtergrond .....	5
1.2	Doelstelling en werkwijze.....	8
2.	Technologie keuzes .....	11
2.1	Keuze brandstofcel technologie .....	11
2.2	Concept voor waterstofopslag .....	11
2.3	Technologie elektrolyser .....	11
3.	Walstroom voor zee cruiseschepen .....	14
3.1	Introductie .....	14
3.2	Businessmodellen.....	15
3.3	Analyse omzetpotentieel walstroom.....	15
3.4	Businessmodel 1 - Verhuur brandstofcelaggregaten.....	17
3.5	Businessmodel 2 - Verhuur & distributie.....	20
3.6	Businessmodel 3 - Verticale integratie .....	23
4.	Brandstofcelaggregaten op bouwplaatsen .....	27
4.1	Introductie .....	27
4.2	Businessmodellen.....	28
4.3	Analyse omzetpotentieel bouwplaatsen .....	28
4.4	Businessmodel 1 - Verhuur brandstofcelaggregaten.....	29
4.5	Businessmodel 2: verhuur & distributie.....	31
4.6	Businessmodel 3: Verticale integratie .....	33
5.	Brandstofcelaggregaten op festivalterreinen & evenementlocaties .....	36
5.1	Introductie .....	36
5.2	Businessmodellen.....	36
5.3	Analyse omzetpotentieel festivalterreinen, kermissen en evenementen .....	36
5.4	Businessmodel 1 - Verhuur brandstofcelaggregaten.....	37
5.5	Businessmodel 2 - Verhuur & distributie.....	40
5.6	Business model 3 – Verticale integratie.....	43
6.	Discussie.....	46
7.	Conclusie en aanbevelingen .....	49
8.	Bijdrage aan doelstellingen van regeling.....	50

# 1. Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De [routekaart waterstof](#) van de TKI Nieuw Gas schetst de contouren van een duurzame energievoorziening in 2050 waarin waterstof een robuust element speelt als CO<sub>2</sub> neutrale energiedrager. De waterstof zal worden geproduceerd uit gas door middel van Steam Methane Reforming (grijze waterstof), SMR in combinatie met CCUS (blauwe waterstof) of via elektrolyse uit hernieuwbare bronnen (groene waterstof).

Voor wat betreft het gebruik van waterstof is er aandacht voor nieuwe toepassingen en processen gebaseerd op waterstof. De routekaart spoort aan om nu te beginnen zodat Nederland in de voorhoede mee kan doen en ervaring kan opbouwen.

Tegen deze achtergrond heeft Recoy het initiatief genomen om een haalbaarheidsonderzoek uit te voeren om in kaart te brengen of er op dit moment in Nederland al een goede business case te vinden is voor de inzet van waterstof voor off-grid toepassingen.

Onze hypothese is dat elektriciteit uit waterstof op 'off-grid' locaties het eerst rendabel zal worden, omdat de prijs voor de geleverde elektriciteit daar hoger mag zijn. Wij zien een parallel met de eerste commerciële toepassingen van zonnecellen. De eerste commerciële toepassingen voor zon PV waren off-grid (ruimtevaart, rekenmachines, offshore industrie). Na steeds verdere kostendalingen en ondersteund door subsidies, werd zon-PV uiteindelijk zonder subsidie in grote delen van de wereld concurrerend met fossiele centrales.

### **Onderscheidend vermogen waterstof op off-grid locaties**

Op off-grid locaties wordt stroom in Nederland meestal opgewekt d.m.v. aggregaten op (bio)diesel of (bio)gas en sinds enkele jaren worden ook batterij systemen ingezet.

Waterstoffaggregaten bieden diverse voordelen ten opzichte van deze oplossingen, zoals:

1. Geen fijnstof emissies
2. Geen CO<sub>2</sub>-emissies (mits blauwe of groene waterstof wordt ingezet)
3. Geen/minder geluidsoverlast
4. Langer inzetbaar dan batterijen door hogere energiedichtheid

Daarnaast kan elektrolyse in de toekomst bijdragen aan het opvangen van schommelingen in de elektriciteitsprijs als gevolg van het variabele aanbod van wind- en zonne- energie.

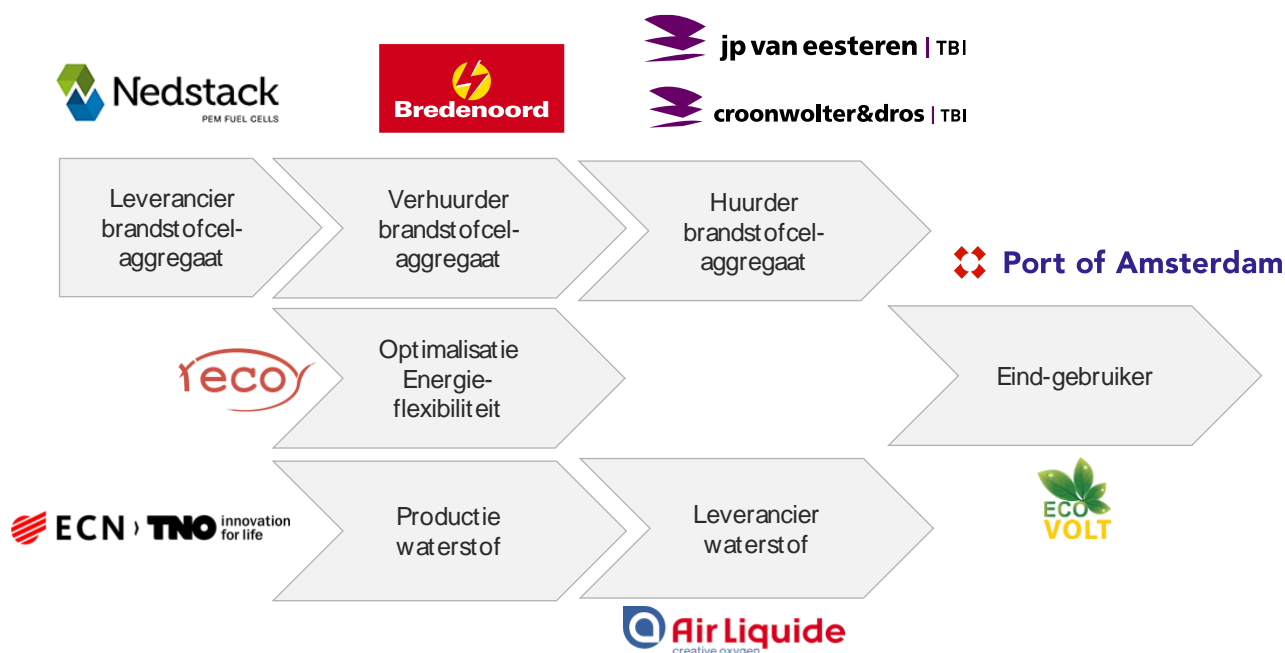
### **Use-cases & Consortium**

Recoy heeft een consortium bij elkaar gebracht van partijen uit elk deel van de waardeketen. Het consortium heeft besloten om binnen dit project de economische haalbaarheid te onderzoeken van drie verschillende use-cases voor elektriciteit uit waterstof op off-grid locaties:

1. Leveren van walstroom aan zeecruiseschepen
2. Inzet van brandstofcelaggregaten op bouwplaatsen

- Inzet van brandstofcelaggregaten op festivalterreinen & evenementlocaties zonder (of met kleine) netaansluiting

De hele waardeketen is vertegenwoordigd in het consortium



In de onderstaande tabel is een overzicht opgenomen van de partijen in het consortium en hun rol binnen het project:

Naam	Rol in project
Recoy B.V.	Initiatiefnemer, projectmanager en penvoerder, uitwerken van use-cases & techno-economische analyse.
ECN>TNO	Productie van groene waterstof via elektrolyse en impact op business case.
Bredenoord	Een van de marktleiders in Europa op het gebied van verhuur van aggregaten. Enige verhuurbedrijf in Nederland dat ervaring heeft met brandstofcelaggregaten. Delen van praktijkervaring en marktkennis.
Nedstack	Producent en leverancier van PEM brandstofcel-systemen. Delen van kennis over brandstofcel systemen.
TBI Croonwolter&dros / JP van Eesteren	Een van Nederland's grootste bouw- en installatiebedrijven. Potentiële afnemer van waterstofaggregaten. Delen van kennis over stroomvoorziening op bouwplaatsen.
Port of Amsterdam	Aanjager van emissieloos varen, ambitie om emissie in haven van Amsterdam te verlagen. Delen van kennis over walstroom.
Air Liquide	Een van de leidende spelers wereldwijd op het gebied van industriële gassen. Producent en leverancier van waterstof. Delen van kennis over waterstofopslag, distributie en marktkennis.

Ecovolt	Brengt kennis in van de aansluiting op het middenspanningsnet, inclusief maatwerkoplossingen voor uitbreiding of aanpassing van de netaansluiting.
---------	--



## 1.2 Doelstelling en werkwijze

Het doel van dit project is om te verkennen of er op dit moment in Nederland off-grid toepassingen zijn, waar een concurrerende business case voor waterstof kan worden gerealiseerd.

Hierbij richten wij ons op de inzet van waterstof in combinatie met een brandstofcel.

Buiten de scope van dit project vallen:

- toepassingen waar de waterstof direct ingezet kan worden ter vervanging van fossiele grondstof;
- het opwekken van elektriciteit d.m.v. een waterstofverbrandingsmotor;
- toepassing van waterstof voor wegtransport. Wij hebben hiervoor gekozen, aangezien er al veel over de voor- en nadelen voor deze toepassing is gepubliceerd; en
- technologieën die op dit moment nog niet commercieel verkrijgbaar zijn.

Het project is gestart met een kick-off meeting bij Port of Amsterdam, waarbij alle bij het project betrokken personen zijn geïnformeerd over de achtergrond en doelstelling van het project, de werkpakketten en de beoogde planning. Vervolgens zijn in een interactieve brainstormsessie door de consortiumleden zes mogelijke use-cases geïdentificeerd:

1. Leveren van tijdelijke walstroom aan schepen in de haven van Amsterdam
2. Start bouwwerkzaamheden voordat netaansluiting kan worden gerealiseerd
3. Bouwproject waar aggregaat goedkoper is dan realiseren netaansluiting
4. Bedrijf dat zich wil vestigen, maar niet tijdig netaansluiting kan krijgen
5. Tijdelijke behoefte bij bestaand bedrijf aan extra vermogen
6. Festivalterreinen & evenementen zonder (of met kleine) netaansluiting

In overleg met de consortiumleden is besloten om use-case 2 en 3 samen te voegen (beide cases zijn zeer vergelijkbaar) en use-case 4 en 5 niet verder te onderzoeken (deze cases zijn niet generiek, zeer afhankelijk van de energiebehoefte van het specifieke bedrijf).

In de vervolgespreken werd al snel duidelijk dat de vermogensbehoeftes in de bouw over het algemeen aanzienlijk lager liggen dan voor bijvoorbeeld zeecruiseschepen. Om beter inzicht te krijgen in de optimale schaalgrootte voor een succesvolle marktintroductie is er voor gekozen de use-case voor walstroom te vernauwen tot zeecruiseschepen, aangezien deze een zeer hoge elektriciteitsvraag hebben. Hierdoor hebben we zowel een use-case voor waterstof op de schaal van 150kW (bouwplaatsen en festivals/evenementen) kunnen onderzoeken als ook een use-case met een waterstofaggregaat van 6 MW (derhalve een factor 40x groter).

Dit heeft uiteindelijk geresulteerd in de selectie van 3 use-cases:

1. Leveren van walstroom aan zeecruiseschepen
2. Inzet van brandstofcelaggregaten op bouwplaatsen
3. Inzet van brandstofcelaggregaten op festivalterreinen & evenementlocaties zonder (of met kleine) netaansluiting

Van deze use-cases zijn gedurende het project de technische en commerciële randvoorwaarden verder onderzocht.



Om beter inzicht te krijgen in de kostenopbouw in de waardeketen en een business model te kiezen met een zo hoog mogelijke rentabiliteit is voor elke use case een drietal business modellen onderzocht:

1. De activiteiten bestaan alleen uit de verhuur van waterstofaggregaten, de waterstof inclusief de waterstofopslag wordt door een gasleverancier geleverd.
2. De activiteiten bestaan uit de verhuur van waterstofaggregaten en de waterstof wordt 'af fabriek' opgehaald met eigen waterstofopslag units.
3. Verticaal geïntegreerd business model: de waterstof wordt zelf geproduceerd met een elektrolyser, opgeslagen in eigen opslagunits en gedistribueerd on-site naar eigen waterstofaggregaten.

Om de economische haalbaarheid te bepalen is voor elke use-case een exploitatiebegroting opgesteld en zijn de netto contante waarde (Net Present Value, hierna: "NPV") van de investering berekend en de internal rate of return ("IRR") bepaalt.

## 2. Technologie keuzes

De drie belangrijkste technologie keuzes die gemaakt moesten worden waren:

1. technologie brandstofcel (PEMFC, Alkaline FC, SOFC, MCFC, PAFC)
2. concept voor waterstofopslag (Tube trailer, High Pressure Tube Trailer, 20ft zeecontainer)
3. technologie elektrolyser (Alkaline WE, PEMWE).

### 2.1 Keuze brandstofcel technologie

Voor de geselecteerde toepassingen bleken waterstoffaggregaten op basis van PEM brandstofcel technologie het meest geschikt. Op off-grid locaties kan de restwarmte meestal niet nuttig worden gebruikt. Hierdoor vallen brandstofcellen die op hoge temperaturen werken en restwarmte afgeven die op andere locaties nuttig gebruikt kan worden af (bijv. SOFC, MCFC en PAFC). Alkaline Fuel Cells werken weliswaar ook op lage temperaturen, maar hebben als nadeel dat de CO<sub>2</sub> uit de luchtstroom gezuiverd moet worden, wat een kwetsbaar en duur proces is<sup>1</sup>.

### 2.2 Concept voor waterstofopslag

Er zijn in nauwe afstemming met Air Liquide drie verschillende concepten voor waterstofopslag beoordeeld:

- a) normale tube trailers (200 bar, capaciteit circa 400kg waterstof, CAPEX €200k)
- b) high pressure tube trailers (300 bar, capaciteit circa 1000kg waterstof, CAPEX €600k)
- c) 20ft zeecontainer (300 bar cilinders, capaciteit circa 800kg waterstof, CAPEX €350k)

De omgebouwde 20ft zeecontainers bleken voor alle drie de geselecteerde toepassingen het meest interessant. De lagere CAPEX/kg is daarin een belangrijke factor, maar ook de compatibiliteit met bestaande infrastructuur (eenvoudig laden en lossen), mogelijkheid om waterzijdig te kunnen belevaren en robuustheid spelen een rol. Momenteel is 200 bar waterstofopslag algemeen gangbaar. Uit onze berekeningen blijkt dat de business case verbetert bij 300 bar opslag. De meerprijs voor een compressor en vulstation met hogere capaciteit en de energieverliezen bij compressie naar 300 bar i.p.v. 200 bar wegen op tegen de lagere CAPEX/kg voor de waterstofopslag en de lagere logistieke kosten.

### 2.3 Technologie elektrolyser

ECN>TNO heeft in dit project een literatuuronderzoek gedaan naar de huidige staat van Alkaline en PEM elektrolyzers (zie kader hierna). Op basis van deze gegevens hebben wij de verschillende use-cases doorgerekend met zowel Alkaline als PEM elektrolyzers. Uit onze analyses bleek dat de hogere efficiency en beter dynamische eigenschappen van de PEM elektrolyser onvoldoende waren om de beperktere levensduur en hogere CAPEX ten opzichte van de Alkaline elektrolyser te kunnen

---

1

[http://physics.oregonstate.edu/~hetheriw/energy/topics/doc/electrochemistry/fc/fuel\\_cells\\_green\\_power\\_lanl\\_p24.pdf](http://physics.oregonstate.edu/~hetheriw/energy/topics/doc/electrochemistry/fc/fuel_cells_green_power_lanl_p24.pdf)

## Alkaline Elektrolyzers

Alkaline-elektrolyse (AEL) is commercieel beschikbaar en is op dit moment de meest gebruikte technologie voor de productie van waterstof d.m.v. elektrolyse. Het wordt als meer volwassen beschouwd dan Proton Exchange Membrane elektrolyse (PEM)<sup>2</sup>. AEL werkt bij een temperatuur van rond 60-70 °C<sup>2</sup> en kan waterstof bij een druk van 30 bar<sup>1</sup> produceren. Dit zal naar verwachting toenemen tot 40 bar in 2030. Alkaline elektrolysecellen hebben een beperkte mogelijkheid om te reageren op veranderingen in belasting, hetgeen essentieel is wanneer flexibiliteit is vereist in het systeem. Bovendien, is het technisch ontwerp van een AEL elektrolyser complex, waardoor het potentieel om kosten te reduceren beperkt is<sup>3</sup>.

AEL wordt met name in het buitenland op industriële schaal ingezet om met goedkope stroom kunstmest te produceren. De levensduur bedraagt maximaal 90.000 uur, hetgeen voldoende is voor commerciële toepassing. De geproduceerde waterstof en zuurstof bereiken een zuiverheid van 99,9 vol.% met extra zuiveringsapparatuur en 99,7 vol.% zonder. Echter, het water dat wordt gebruikt voor de elektrolyse moet zeer zuiver zijn, met een elektrische geleidbaarheid van minder dan 5 µS/cm om de elektroden te beschermen en veilig te werken. Het waterverbruik bedraagt circa 0,8 tot 1 liter water/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>.

Op MW schaal, wordt de technologie commercieel aangeboden voor rond €800/kW met vooruitzichten op €700/kW in de volgende 10 jaar en uiteindelijk €650/kW na 2040. Wanneer de vraag naar elektrolyzers in de toekomst toeneemt, ontstaat de mogelijkheid de productie verder te industrialiseren met geautomatiseerde productielijnen en robotica. Dit kan een grote impact hebben op het verlagen van de productiekosten. De elektrolyse cel vertegenwoordigt ongeveer 30-40% van de kosten en schaal boven 1-2.5 MW vrijwel lineair. De resterende 60% omvat kosten voor de 'balance of plant'. Hierin spelen schaalvoordelen een sterkere rol. In grafiek 1 is een prognose opgenomen van de verwachte CAPEX/kW voor 2020, 2030 en 2040.

De totale installatie heeft een technische levensduur van ongeveer 25 jaar, volgens de literatuur<sup>2</sup>. De cellen en stacks hebben een leven van 9 tot 15 jaar<sup>3</sup>. De verwachte levensduur zal naar verwachting toenemen van de huidige 60.000 uur tot 80.000 uur in 2030 en 110.000 uur in 2050.

Volgens de literatuur<sup>3</sup> bedraagt de OPEX van een grootschalige AEL-installatie momenteel €28/kWoutput/jaar en zal deze dalen tot €14/kWoutput/jaar in 2030. Dit is voor 15 bar en zonder verdere compressie en exclusief OPEX voor vulstations.

Het energieverbruik voor alkaline elektrolyzers is 4,5-6.6 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>, hiervan komt 4,2-5.9 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> voor rekening van de stacks. Dit komt overeen met ongeveer 80% rendement op basis van Higher Heating Value ("HHV") bij nominaal vermogen. De relatie tussen de rendement op systeem niveau en het vermogen is weergegeven in grafiek 2. Het dynamisch bereik voor dit type elektrolyser is typisch tussen 15% en 100% van het nominale vermogen. De ramp-up snelheid is circa 17%/seconde en de ramp-down snelheid bedraagt 25%/seconde.

<sup>1</sup> De Vita et al (2018). *Sectoral integration- long term perspective*.

compenseren. Wij hebben daarom voor alle onderzochte use-cases gekozen voor Alkaline elektrolyzers.

## PEM Elektrolyzers

PEM-elektrolyse is een van de bekendere en meer ontwikkelde technologieën voor de productie van waterstof. De technologie werkt bij een temperatuur van rond 60-70 °C<sup>2</sup>. PEM elektrolyse is bijna 10 jaar<sup>6</sup> commercieel beschikbaar, maar volgens de literatuur<sup>3</sup> is de technologie is nog niet op industriële schaal gedemonstreerd (TRL 8).

Een belangrijke component van de PEM-technologie is de cel stack die ongeveer 40% van de totale systeemkosten uitmaakt. Deze stacks hebben een technische levensduur van ongeveer 7 jaar. De levensduur zal in de toekomst naar verwachting toenemen naar 10 jaar<sup>4</sup>. De totale installatie heeft een technische levensduur van ongeveer 30 jaar, volgens de literatuur<sup>5</sup>.

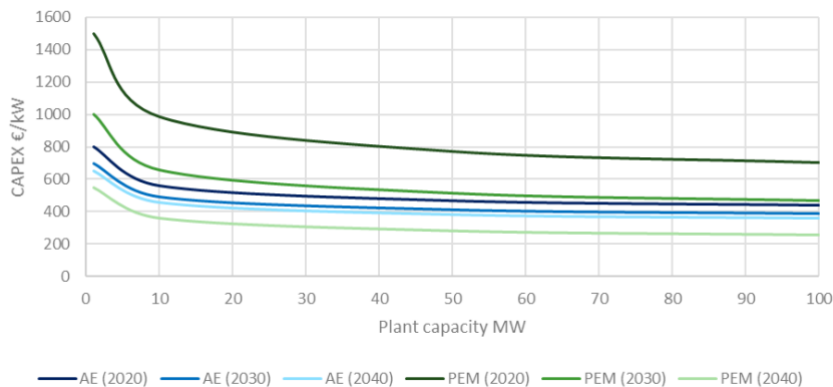
Voor PEM-elektrolyzers is water met een hogere zuiverheid vereist dan voor Alkaline-elektrolyzers. De elektrische geleiding van het water dat wordt gebruikt voor de elektrolyse moet minder dan 1 µS/cm bedragen. Normaal kraanwater wordt gezuiverd met behulp van reverse-osmosis, deze installatie maakt deel uit van de normale 'balance of plant' (BoP). De zuiverheid van waterstof in PEM-elektrolyzers is hoger dan voor alkaline elektrolyzers en is doorgaans hoger dan 99,99 vol.% (in sommige gevallen tot 99,999 vol.%) zonder dat extra zuiveringsapparatuur benodigd is. De zeer lage gas doorlaatbaarheid van de polymere membranen vermindert het risico op vorming van brandbare mengsels.

PEM elektrolyse is nog steeds in ontwikkeling, en na verwachting zullen de kostprijzen in de toekomst afnemen. De kosten van een PEM systeem zullen naar verwachting uiteindelijk lager worden dan van Alkaline-elektrolyzers als gevolg van het compactere ontwerp met minder materiaalgebruik, hogere stroomdichtheid, en relatief eenvoudigere opzet van het systeem. Op dit moment bedraagt de CAPEX van PEM ongeveer €1.500/kW op Megawatt-schaal. In 2030 zal dit naar verwachting dalen tot € 1.000/kW en naar € 550/kW in 2040 (zie grafiek 1). De OPEX van een multi-MW installatie is, volgens literatuur<sup>3</sup>, €40/kWoutput/jaar. Naar verwachting zal dit dalen tot €30/kWoutput/jaar in 2030.

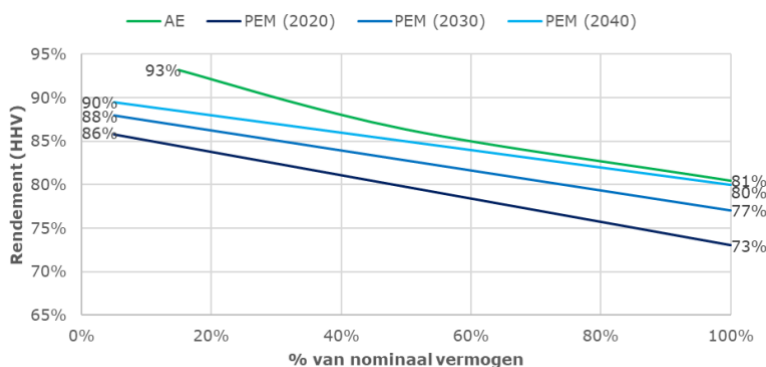
Het energieverbruik van een PEM elektrolyser bedraagt typisch tussen 4,2-6.6 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Hiervan verbruikt de stack tussen 4,2-5.5 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Gebruikelijk is om het rendement op te geven voor het nominale vermogen. Het rendement van de elektrolyser vermindert met de toename van de belasting zoals weeraangeven in grafiek 2.

Het dyn  
en ramp

Grafiek



Grafiek 2: Rend



## 3. Walstroom voor zeecruiseschepen

### 3.1 Introductie

In 2018 kwamen er 168 zeecruiseschepen aan op de passanger terminal in de Amsterdamse haven. Voor 'Ocean Going Vessels' is er nog geen walstroom beschikbaar. Zeecruiseschepen wekken met hun scheepsmotoren elektriciteit op en gebruiken hiervoor Heavy Fuel Oil of Marine Gas Oil. Dit zorgt voor veel emissies van fijnstof (NOx/SOx, etc). De inzet van waterstofaggregaten voor het leveren van walstroom kan de stedelijke luchtkwaliteit in Amsterdam (en andere havensteden) significant verbeteren.



De belangrijkste zeecruise rederijen in de haven van Amsterdam zijn:

- AIDA
- MSC
- Carnival (o.a. eigenaar van Holland America Line)
- Cruise & Maritime Voyages

Overige kenmerken:

- Verblijftijd: tussen 12 en 36 uur
- Gemiddeld elektrisch vermogen cruiseschip: 6 MW
- Hulpmotoren ondergrens 2 MW, bovengrens 10 MW

Waterstofaggregaten zijn voor deze use-case interessant omdat:

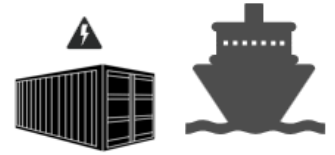
- Waterstofaggregaten mobiel kunnen worden ingezet en ook waterzijdig stroom kunnen leveren. Hierdoor is er een hogere benutting mogelijk dan met een vaste installatie.
- De meeste cruiseschepen hebben stroom op 60 hertz nodig in plaats van 50 hertz. Walstroom met een netaansluiting is duurder dan normaal, omdat een frequentieomvormer nodig is. Een waterstofaggregaat kan zo worden gebouwd dat deze 60 hertz levert zonder meerkosten.

### 3.2 Businessmodellen

Deze use case hebben we doorgerekend op basis van 3 verschillende businessmodellen:

#### 1. Verhuur brandstofcelaggregaten

Activiteiten zijn beperkt tot het waterzijdig leveren van walstroom met waterstofaggregaten op een duwboot. Waterstof wordt ingekocht bij gasleverancier, die ook opslagcontainers en logistiek voor haar rekening neemt.



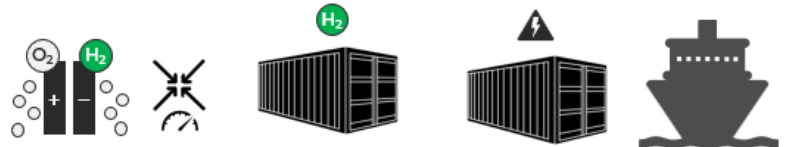
#### 2. Verhuur brandstofcelaggregaten incl. distributie

Waterstof wordt af-fabriek ingekocht, de waterstofopslag containers zijn nu in eigendom en de logistiek is in eigen beheer.



#### 3. Verticaal geïntegreerd business model

Productie groene waterstof d.m.v. elektrolyse, compressie & vulstations, distributie van waterstofcontainers en levering walstroom via een brandstofcelaggregaat.



### 3.3 Analyse omzetpotentieel walstroom

Voor het bepalen van de potentiële omzet, nemen we aan dat de geleverde walstroom voor € 0,223/kWh wordt verkocht en dat er geen andere omzetstromen zijn of andere kosten worden doorberekend. Dit tarief is gelijk aan het tarief dat op dit moment geldt voor walstroom aan riviercruiseschepen in de haven van Amsterdam<sup>2</sup>.

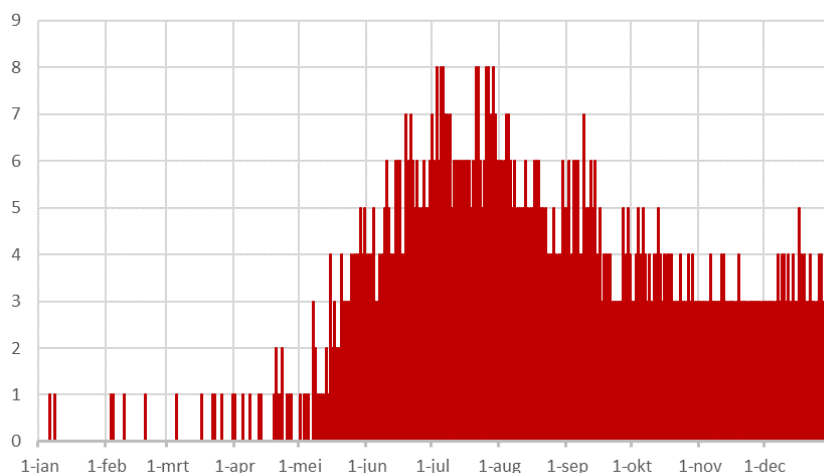
<sup>2</sup> <http://www.parkline.nl/water/walstroom/tarieven>



Vervolgens hebben we een analyse uitgevoerd van de aankomst- en vertrektijden van alle zee-cruiseschepen die in 2018 aanmeerden in Amsterdam. Zie de onderstaande grafiek.

Er is een duidelijk seizoenspatroon herkenbaar. Uit onze analyse blijkt dat met 1 waterstofaggregaat van 6 MW een jaarlijkse bezetting van 6.000 uur gerealiseerd kan worden en 26% van alle zee-cruiseschepen van walstroom kan worden voorzien.

Aangemeerde Cruiseschepen  
Port of Amsterdam 2018



De potentiële omzet bedraagt circa 8 miljoen euro per jaar met 1 brandstofcelaggregaat van 6 MW.

Kengetallen Cruiseschepen Port of Amsterdam 2018	
Aantal aankomsten	180
Cum. aantal uren met aangemeerde cruiseschepen	19.887
Cum. aantal uren met 1 of meer schepen aan kade	11.581
marktaandeel met 1 aggregaat	26%
Marktomvang in MWh	119.332 MWh
Addressable market (met 1 aggregaat)	36.000 MWh
<b>Addressable market in € miljoen (P = € 0,223/kWh)</b>	<b>8,0</b>

### 3.4 Businessmodel 1 - Verhuur brandstofcelaggregaten

In dit businessmodel zijn de activiteiten beperkt tot het waterzijdig leveren van walstroom aan zeecruiseschepen. De walstroom wordt geproduceerd door een 6 MW PEM brandstofcelaggregaat. De waterstof wordt ingekocht bij een gasleverancier (bijv. Airliquide), die ook de opslagcontainers en logistiek tot de kade voor haar rekening neemt.



#### 3.4.1 Logistiek

Het logistieke proces ziet er als volgt uit:

- De waterstof wordt afgeleverd in 10 gemodificeerde zeecontainers van 20ft bij een containerterminal. Elke container heeft een capaciteit van 800 kg waterstof.
- De opslagcontainers worden met een kraan van de truck gehaald en geladen op een duwbak.
- Op de duwbak staat ook het brandstofcelaggregaat in 2x20ft zeecontainers.
- De duwbak wordt door een duwboot naast het cruiseschip gepositioneerd en afgemeerd.
- Met een kabel wordt het aggregaat door een hoogspanningsgemachtigde op het schip aangesloten.
- Na 24 uur wordt de kabel ontkoppelt en verplaatst de duwboot de duwbak terug naar de kade, waar de lege containers worden gelost en volle containers worden geladen.

### 3.4.2 Belangrijkste aannames

<i>Inkoopprijs waterstof</i>	<i>€ 3,50/kg geleverd op 300 bar in units van 800 kg. De waterstof heeft een fossiele oorsprong, maar is d.m.v. certificaten vergroend</i>
<i>Waterstofaggregaat</i>	
CAPEX	€2400/kW
Systeem efficiency	52%
Technische levensduur	70.000 uur
Stack revisie (maximaal 2x) na	23.000 uur
Kosten stack revisie (vanaf 2022)	€600/kW
O&M kosten	2% van CAPEX
Restwaarde (vnl. waardevolle metalen)	5%
<i>Duwbak</i>	
CAPEX duwbak voor 14x20ft containers	€ 700.000
Technische levensduur	25 jaar
Onderhoudskosten	3% van CAPEX
<i>Handlingkosten</i>	
5 handlings per container à	€20/handling
260x retourtrip met duwboot à	€600/trip
<i>Personeelskosten hoogspanningsbevoegde</i>	€100.000/jaar
<i>Totaal benodigde investeringen:</i>	
Brandstofcelaggregaat	€ 14,4 miljoen
Duwbak	€ 0,7 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
Totaal	€ 15,1 miljoen

### 3.4.3 Economische analyse

Exploitatierkening Use Case Walstroom												
Business model 1: verhuur waterstofaggregaten	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10	Jaar 11	Jaar 12
<b>Netto omzet</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>
Kostprijs waterstof	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270	7.270
Handlingkosten	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
Duwbootkosten	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
Kostprijs van de omzet	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685	7.685
<b>Bruto marge</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>348</b>
Personeelskosten(*)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Onderhoudskosten	309	288	288	3.888	288	288	288	3.888	288	288	288	288
<b>OPEX</b>	<b>409</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>3.988</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>3.988</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>388</b>	<b>388</b>
<b>EBITDA</b>	<b>-61</b>	<b>-40</b>	<b>-40</b>	<b>-3.640</b>	<b>-40</b>	<b>-40</b>	<b>-40</b>	<b>-3.640</b>	<b>-40</b>	<b>-40</b>	<b>-40</b>	<b>-40</b>
Afschrijvingen op materiele vaste activa	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	<b>-1.236</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-4.815</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-4.815</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>

Berekening NPV & IRR													
Alle bedragen in €1.000	Jaar 0	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10	Jaar 11	Jaar 12
<b>EBIT</b>		<b>-1.236</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-4.815</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-4.815</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>	<b>-1.215</b>
Vpb (@22,5%)		278	273	273	1.083	273	273	273	1.083	273	273	273	273
<b>NOPLAT</b>		<b>-958</b>	<b>-942</b>	<b>-942</b>	<b>-3.732</b>	<b>-942</b>	<b>-942</b>	<b>-942</b>	<b>-3.732</b>	<b>-942</b>	<b>-942</b>	<b>-942</b>	<b>-942</b>
+ Afschrijvingen op materiele vaste activa		1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175	1.175
+/- Mutaties in netto werkkapitaal		P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	<b>-15.100</b>	<b>217</b>	<b>233</b>	<b>233</b>	<b>-2.557</b>	<b>233</b>	<b>233</b>	<b>233</b>	<b>-2.557</b>	<b>233</b>	<b>233</b>	<b>233</b>	<b>233</b>
IRR		n/a											
WACC		10%											
NPV expliciet period		-15.212											
NPV of terminal value		319											
Net Present Value		-14.894											

(\*) De personeelskosten bestaan uit de kosten voor een hoogspanningsbevoegde om de aggregaten op de cruiseschepen aan te sluiten. Er is geen rekening gehouden met overhead (bijv. management, verkoop/administratie, enz).

De NPV van de totale investering van 15,1 miljoen euro is negatief. De bruto marge die gerealiseerd kan worden op de geleverde stroom is te laag voor een positieve business case.

De looptijd van het project is gelijk aan de levensduur van het aggregaat. De hoge onderhoudskosten in jaar 4 en jaar 8 zijn te verklaren door de revisie van de stack die in die jaren plaatsvindt.

### 3.4.4 Sensitiviteitsanalyse

In de onderstaande tabellen is weergegeven in welke mate de NPV gevoelig is voor wijzigingen in de belangrijkste aannames. Hieruit blijkt dat de NPV positief wordt, en daarmee een interessante business case ontstaat, wanneer:

- de verkoopprijs van de stroom stijgt naar tussen 0,30 en 0,35 eurocent per kWh; of
- de inkooprijs van de waterstof daalt naar circa 2 euro per kilogram.

Zelfs als de CAPEX van het brandstofcelaggregaat halveert is met de gehanteerde stroomprijs en waterstofprijs geen positieve business case te realiseren.

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Walstroom business model 1**  
Alle bedragen in miljoenen euro's

		Verkoopprijs per kWh					
		0,22	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
Inkooprijs per kg waterstof	1,50	5.049	9.691	18.332	26.973	35.614	52.896
	1,75	2.556	7.198	15.839	24.480	33.121	50.403
	2,00	63	4.705	13.346	21.987	30.628	47.910
	2,25	-2.429	2.212	10.853	19.494	28.135	45.417
	2,50	-4.922	-280	8.361	17.002	25.643	42.925
	2,75	-7.415	-2.773	5.868	14.509	23.150	40.432
	3,00	-9.908	-5.266	3.375	12.016	20.657	37.939
	3,25	-12.401	-7.759	882	9.523	18.164	35.446
	3,50	-14.894	-10.252	-1.611	7.030	15.671	32.953

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Walstroom business model 1**  
Alle bedragen in miljoenen euro's

		Verkoopprijs per kWh					
		0,22	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
CAPEX / MW brandstofcel aggregaat	1.200.000	-8.566	-3.924	4.717	13.358	21.999	39.281
	1.400.000	-9.621	-4.979	3.662	12.303	20.944	38.226
	1.600.000	-10.675	-6.033	2.608	11.249	19.890	37.172
	1.800.000	-11.730	-7.088	1.553	10.194	18.835	36.117
	2.000.000	-12.784	-8.143	498	9.139	17.780	35.062
	2.100.000	-13.312	-8.670	-29	8.612	17.253	34.535
	2.200.000	-13.839	-9.197	-556	8.085	16.726	34.008
	2.300.000	-14.366	-9.725	-1.084	7.557	16.198	33.480
	2.400.000	-14.894	-10.252	-1.611	7.030	15.671	32.953

### 3.5 Businessmodel 2 - Verhuur & distributie

Het verschil met businessmodel 1 is dat de waterstof nu "af fabriek" wordt ingekocht op 300 bar. De containers voor waterstofopslag zijn nu in eigendom en de logistiek is volledig in eigen beheer.

#### 3.5.1 Logistiek

In businessmodel 1 werd de waterstof op de kade geleverd en werden de containers met een kraan op de duwbak gehesen. In businessmodel 2 vinden daarvoor nog de volgende handelingen plaats:

- De 10 lege waterstof containers worden op een container terminal van de duwbak gelift en op trailers geladen (2x20ft containers per trailer).
- De containers worden over de weg vervoerd naar het vulstation
- De containers worden gelost, bijgevuld en weer geladen op de trailers
- De volle containers worden over de weg vervoerd naar de kade

#### 3.5.2 Belangrijkste aannames

##### Inkooprijs waterstof

Uit ons onderzoek is gebleken dat de inkooprijs voor waterstof uit een 300 bar vulstation circa 2,50 per kilogram bedraagt. De waterstof heeft een fossiele oorsprong, maar is d.m.v. certificaten vergoend.

##### Waterstofopslag

In totaal zijn minimaal 20 opslagcontainers nodig . Er staan er steeds 10 op de duwbak, om 1 cruiseschip gedurende 24 uur van 6 MW te kunnen voorzien. Om daarna het volgende schip te kunnen bedienen moeten er nog 10 op de wal klaar staan.

De compressoren en de vulstations van de gasleverancier moeten over voldoende capaciteit beschikken om 10 containers binnen minder dan 24 uur te vullen met 8000 kg waterstof.

20 x 20ft zeecontainer met cilinders @300 bar, 800 kg opslag € 300.000/stuk  
O&M kosten opslagcontainers 4% van CAPEX  
Levensduur 25 jaar

##### Wegtransport

Afstand tot vulpunt (enkele reis) 10 km  
Transportkosten containers (2x20ft enkele reis) per 10km € 250

*Totaal benodigde investeringen:*

Brandstofcelaggregaat	€ 14,4 miljoen
Duwbak	€ 0,7 miljoen
20 x waterstofopslag in 20ft container voor 800kg H <sub>2</sub> @300bar	€ 6,0 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 21,1 miljoen</b>

N.B.: indien niet anders vermeld zijn de aannames gelijk aan businessmodel 1

### 3.5.3 Economische analyse

Exploitatierekening Use Case Walstroom												
Business model 2: verhuur incl. distributie												
	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10	Jaar 11	Jaar 12
<b>Netto omzet</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>	<b>8.033</b>
Kostprijs waterstof	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193	5.193
Handlingkosten	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
Duwbootkosten	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
Wegtransportkosten opslagcontainers	325	325	325	325	325	325	325	325	325	325	325	325
Kostprijs van de omzet	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>	<u>5.933</u>
<b>Bruto marge</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>	<b>2.100</b>
Personeelskosten(*)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Onderhoudskosten	789	789	789	4.389	789	789	789	2.589	789	789	789	789
<b>OPEX</b>	<b>889</b>	<b>889</b>	<b>889</b>	<b>4.489</b>	<b>889</b>	<b>889</b>	<b>889</b>	<b>2.689</b>	<b>889</b>	<b>889</b>	<b>889</b>	<b>889</b>
<b>EBITDA</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>-2.389</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>-589</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>
Afschrijvingen op materiele vaste activa	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-4.037</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-2.237</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>

Free cash flow analyse													
Alle bedragen in €1.000													
	Jaar 0	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10	Jaar 11	Jaar 12
<b>EBIT</b>		<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-4.037</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-2.237</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>
Vpb (@22,5%)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NOPLAT</b>		<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-4.037</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-2.237</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>	<b>-437</b>
+ Afschrijvingen op materiele vaste activa		1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648	1.648
+/- Mutaties in netto werkkapitaal		P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	<b>-21.100</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>-2.389</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>-589</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>	<b>1.211</b>
IRR		-10,0%											
WACC		10%											
NPV of explicit period		-14.678											
NPV of terminal value		<u>229</u>											
NPV		-14.448											

De NPV van de totale investering van 21,1 miljoen euro is negatief. Hoewel de brutomarge en cashflows positief zijn, kan de investering niet worden terugverdiend voordat de levensduur van het aggregaat voorbij is.

### 3.5.4 Sensitiviteitsanalyse

In de onderstaande tabellen is weergegeven in welke mate de NPV gevoelig is voor wijzigingen in de belangrijkste aannames. Hieruit blijkt dat de NPV positief wordt, en daarmee een interessante business case ontstaat, wanneer

- de verkoopprijs van de stroom stijgt naar circa € 0,30 per kWh; of
- de inkooprijs van de waterstof daalt naar tussen € 1,00 en € 1,50 per kilogram.

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Walstroom business model 2**  
Alle bedragen in miljoenen euro's

		Verkoopprijs per kWh					
		0,22	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
Inkooprijs per kg waterstof	1,00	1.664	6.434	15.075	23.716	32.357	49.639
	1,50	-3.482	1.310	10.089	18.730	27.371	44.653
	1,75	-6.097	-1.256	7.597	16.238	24.879	42.161
	2,00	-8.712	-3.843	5.071	13.745	22.386	39.668
	2,25	-11.327	-6.458	2.506	11.252	19.893	37.175
	2,50	-14.448	-9.073	-59	8.759	17.400	34.682

### 3.6 Businessmodel 3 - Verticale integratie

In tegenstelling tot businessmodel 1 en 2, wordt de waterstof in dit businessmodel zelf geproduceerd met een Alkaline elektrolyser. De productiefaciliteit beschikt daarnaast over een compressor & diverse vulstations.

#### 3.6.1 Belangrijkste aannames

##### *Elektrolyser:*

In deze use-case is er jaarlijks een vaste hoeveelheid waterstof die geproduceerd moet worden. Het minimale nominale vermogen dat de elektrolyser nodig heeft om deze hoeveelheid waterstof te produceren is 14,6 MW. Dit betekent echter wel dat de elektrolyser het hele jaar op vollast moet draaien en er daardoor geen energieflexibiliteit is. De gemiddelde elektriciteitsprijs die de eigenaar van de elektrolyser zal moeten betalen, is dan gelijk aan de gemiddelde day-ahead prijs. Het overdimensioneren van de elektrolyser creëert energieflexibiliteit, waardoor momenten met hoge elektriciteitsprijzen vermeden kunnen worden.

Uit ons optimalisatiemodel blijkt dat – onder de onderstaande assumpties - het vergroten van het nominale vermogen tot 20,3 MW leidt tot een betere NPV. De hogere CAPEX worden terugverdiend uit de lagere elektriciteitskosten. Hierbij zijn wij uitgegaan van perfecte voorspelling van de onbalansprijzen (2018). In onze dagelijkse praktijk zien wij dat het mogelijk is om met forecasting algoritmes op basis van machine learning / deep learning circa 80 tot 90% van het theoretisch besparingspotentieel te realiseren ten opzichte van de TenneT Balans Delta. Hiervoor hebben we niet gecorrigeerd, de berekende NPV is daarom te optimistisch.

Voor de keuze van de elektrolyser zijn we uitgegaan van een Alkaline elektrolyser met de volgende specificaties:

Nominaal vermogen:	20,3 MW
Minimaal vermogen:	15%
Uitgaande druk:	30 bar
Energieverbruik @nominaal vermogen:	62 kWh/kg waterstof
Waterverbruik:	10 liter/kg
Technische levensduur (systeem):	25 jaar
Technische levensduur stack:	60.000 uur
Beschikbaarheid:	98%
CAPEX – totale systeem:	€ 520/kW
OPEX - elektrolyser systeem:	5%
CAPEX - Stack revisie:	€ 182/kW

Degradatie van het systeem hebben we verwaarloosd en er is geen rekening gehouden met eventuele versnelde degradatie door het dynamisch bedienen van de elektrolyser.



#### *Compressor en vulstations:*

Druk in:	30 bar
Druk uit:	300 bar
Capaciteit:	330 kg/uur
Technische levensduur:	25 jaar
Energieverbruik:	1,5 kWh/kg waterstof
CAPEX:	€ 3,2 miljoen <sup>3</sup>

We hebben gedurende in dit project niet met zekerheid kunnen vaststellen of – en zo ja - in hoeverre de compressor een belemmerende factor is voor het dynamisch bedienen van de elektrolyser. In ons optimalisatiemodel houden we geen rekening met een vertragend effect op de ramping van de elektrolyser.

#### *Facility CAPEX & OPEX (overig)*

Onder deze categorie vallen alle overige investeringen die gerelateerd zijn aan het realiseren van een waterstoffabriek, zoals kosten voor civiele werkzaamheden, engineering, Distributed Control System, Energy Management Unit, netaansluiting, commissioning en opstart kosten. Deze kosten worden geschat op 20% van de CAPEX voor het elektrolyser systeem plus de CAPEX voor de compressor en vulstations. De operation & maintenance kosten van de faciliteit bedragen 4% van de Facility CAPEX.

#### *Waterstofopslag:*

Ten opzichte van businessmodel 1 en 2 zijn meer waterstofopslag containers nodig, aangezien bij elke wissel 20 containers 'in transit' zijn. De elektrolyser moet op deze momenten wel kunnen blijven produceren, hiervoor zijn 2 extra containers nodig.

#### *Brandstofcelaggregaat:*

De technische levensduur van het aggregaat is bij deze use-case 12 jaar. De elektrolyser heeft een levensduur van 20 jaar. In jaar 12 wordt een nieuw aggregaat aangeschaft. De verwachting is dat de prijzen dan rond €900k/MW bedragen.

#### *Totaal benodigde investeringen:*

Brandstofcelaggregaat	€ 14,4 miljoen
Duwbak	€ 0,7 miljoen
22 x waterstofopslag in 20ft container voor 800kg H <sub>2</sub> @300bar	€ 6,6 miljoen
CAPEX Elektrolyser incl balance of plant	€ 10,6 miljoen
CAPEX Compressoren en vulstations	€ 3,2 miljoen
CAPEX Faciliteit/overig	€ 2,8 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 38,2 miljoen</b>

<sup>3</sup> De CAPEX, OPEX van de compressor en de vulstations is bepaald op basis van een model gepubliceerd door FCH-JU (2017), *Early business cases for H<sub>2</sub> in energy storage and more broadly power to H<sub>2</sub> applications*, p. 51



### 3.6.3 Economische analyse

Exploitatierkening Use Case Walstroom																									
Business model 3: verticaal geïntegreerd																									
	Yr 1	Yr 2	Yr 3	Yr 4	Yr 5	Yr 6	Yr 7	Yr 8	Yr 9	Yr 10	Yr 11	Yr 12	Yr 13	Yr 14	Yr 15	Yr 16	Yr 17	Yr 18	Yr 19	Yr 20	Yr 21	Yr 22	Yr 23	Yr 24	Yr 25
<b>Netto omzet</b>	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Kostprijs van de omzet	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
<b>Bruto marge</b>	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Personeelskosten(*)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Onderhoudskosten	1,4	1,4	1,4	5,0	1,4	1,4	1,4	3,2	1,4	5,1	1,4	6,8	1,4	1,4	1,4	3,2	1,4	1,4	5,1	3,2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
<b>OPEX</b>	1,5	1,5	1,5	5,1	1,5	1,5	1,5	3,3	1,5	5,2	1,5	6,9	1,5	1,5	1,5	3,3	1,5	1,5	5,2	3,3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>EBITDA</b>	-0,3	-0,3	-0,3	-3,9	-0,3	-0,3	-0,3	-2,1	-0,3	-4,0	-0,3	-5,7	-0,3	-0,3	-0,3	-2,1	-0,3	-0,3	-4,0	-2,1	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Afschrijvingen op materiele vaste activa	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	-2,4	-2,4	-2,4	-6,0	-2,4	-2,4	-2,4	-4,2	-2,4	-6,1	-2,4	-7,8	-2,4	-2,4	-2,4	-4,2	-2,4	-2,4	-6,1	-4,2	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4

Free cash flow analyse																										
Alle bedragen in miljoenen euros																										
	Yr 0	Yr 1	Yr 2	Yr 3	Yr 4	Yr 5	Yr 6	Yr 7	Yr 8	Yr 9	Yr 10	Yr 11	Yr 12	Yr 13	Yr 14	Yr 15	Yr 16	Yr 17	Yr 18	Yr 19	Yr 20	Yr 21	Yr 22	Yr 23	Yr 24	Yr 25
<b>EBIT</b>		-2,4	-2,4	-2,4	-6,0	-2,4	-2,4	-2,4	-4,2	-2,4	-6,1	-2,4	-7,8	-2,4	-2,4	-2,4	-4,2	-2,4	-2,4	-6,1	-4,2	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4
Vpb (@22,5%)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NOPLAT</b>		-2,4	-2,4	-2,4	-6,0	-2,4	-2,4	-2,4	-4,2	-2,4	-6,1	-2,4	-7,8	-2,4	-2,4	-2,4	-4,2	-2,4	-2,4	-6,1	-4,2	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4
+ Afschrijvingen op materiele vaste activa		2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
+/- Mutaties in netto werkkapitaal		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	-38,2	-0,3	-0,3	-0,3	-3,9	-0,3	-0,3	-0,3	-2,1	-0,3	-4,0	-0,3	-5,7	-0,3	-0,3	-0,3	-2,1	-0,3	-0,3	-4,0	-2,1	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
IRR		n/a																								
WACC		10%																								
NPV of explicit period		-44,4																								
NPV of terminal value		0,2																								
<b>NPV</b>		-44,1																								

Uit deze berekening blijkt dat de business case voor walstroom uit groene waterstof niet haalbaar is met de huidige prijs voor walstroom en de huidige CAPEX voor een elektrolyser.

### 3.6.4 Sensitiviteitsanalyse

In de onderstaande tabellen is weergegeven in welke mate de NPV gevoelig is voor wijzigingen in de belangrijkste aannames. Hieruit blijkt dat de NPV positief wordt, en daarmee een interessante business case ontstaat, wanneer de verkoopprijs van de elektriciteit stijgt naar tussen € 0,40 en € 0,50 per kWh. Zelfs met een gemiddelde stroomprijs van € 0,005/kWh blijft de NPV negatief. De verklaring hiervoor is dat het verdienpotentieel te laag blijft om de kapitaalinvestering van € 38 miljoen terug te kunnen verdienen. In 2040 zullen de CAPEX voor alkaline elektrolyzers naar verwachting gedaald zijn tot €400/kW, helaas is dit niet genoeg om een positieve NPV te realiseren (zie rechter tabel).

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Walstroom business model 3**  
Alle bedragen in miljoenen euro's

		Verkoopprijs elektriciteit in € per kWh					
		0,22	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
Gemiddelde elektriciteitsprijs in € per kWh	0,005	-14	-7	5	16	28	51
	0,010	-18	-11	1	12	24	47
	0,020	-28	-21	-8	4	15	38
	0,030	-39	-31	-17	-5	7	30
	0,040	-49	-41	-27	-14	-2	22
	0,050	-60	-52	-37	-23	-11	13

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - business model 3**  
Alle bedragen in miljoenen euro's

		Gemiddelde elektriciteitsprijs (inkoop in €/MWh)					
		5	10	20	30	40	50
Capex / kW elektrolyzer	300	-7	-12	-21	-31	-42	-53
	350	-9	-13	-22	-33	-44	-55
	400	-10	-15	-24	-35	-46	-56
	450	-12	-16	-25	-36	-47	-58
	500	-13	-18	-27	-38	-49	-60
	550	-14	-19	-29	-40	-50	-61

## 4. Brandstofcelaggregaten op bouwplaatsen

### 4.1 Introductie

De bouwsector is een van de grootste gebruikers van aggregaten. Op veel bouwlocaties ontbreekt een netaansluiting of is de capaciteit van de beschikbare netaansluiting onvoldoende om de bouwplaats van stroom te voorzien. De elektriciteitsbehoefte verschilt sterk van project tot project. Voor nieuwbouwprojecten neemt de vermogensbehoefte vaak toe naarmate het project vordert, onder andere doordat hijskranen pas in een latere fase van de bouw worden ingezet.



TBI | JP van Eesteren gebruikt conventionele aggregaten op bouwplaatsen. Het zou interessant kunnen zijn om bij het centrale magazijn waterstof te produceren en

waterstofaggregaten in te zetten bij specifieke opdrachtgevers of op bouwlocaties met strenge omgevingsnormen. Steeds vaker kunnen bouwbedrijven extra punten verdienen in aanbestedingen door extra aandacht voor duurzaamheid. Brandstofcelaggregaten zijn stil en emissievrij. Net als batterijen, alleen is de energiedichtheid een factor 8 hoger, waardoor er op locaties zonder netaansluiting veel vaker een batterij gewisseld moet worden.

*JP van Eesteren bouwt het nieuwe hoofdkantoor van Triodos. Duurzaam bouwen is een vereiste voor dergelijke*

Daarnaast wordt het vervangen van dieselaggregaten voor bouwbedrijven steeds relevanter, aangezien geluid- en emissienormen die gemeentes voorschrijven worden steeds strenger worden net als de Europese emissienormen voor 'Non-road mobile machinery'<sup>4</sup>.

Over de inzet van aggregaten in de bouwsector ontbreken exacte data, maar uit een studie van stichting Research Rationalisatie Bouw uit 2010<sup>5</sup> blijkt dat de 'tijdelijke aansluitkosten' circa 0,6% van de gemiddelde aanneemsom uitmaken. De omzet van de Nederlandse bouwsector was 10,4 miljard euro in 2018<sup>6</sup>. Op basis hiervan schatten wij de 'tijdelijke aansluitkosten' op 62 miljoen per jaar. Hierbij moet opgemerkt worden dat onder 'tijdelijke aansluitkosten' niet alleen kosten voor aggregaten vallen.

<sup>4</sup> [https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/non-road-mobile-machinery\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/non-road-mobile-machinery_en)

<sup>5</sup> Stichting Research Rationalisatie Bouw (2010), *Algemene Bouwplaatskosten (ABK) van B&U-projecten 2010*

<sup>6</sup> <https://www.bouwendnederland.nl/feitenencijfers>

## 4.2 Businessmodellen

Deze use-case hebben we doorgerekend op basis van 3 verschillende businessmodellen:

### 1. Verhuur brandstofcelaggregaten

Activiteiten zijn beperkt tot de verhuur van aggregaten. Waterstof wordt ingekocht bij gasleverancier, die ook de leveringen en retourritten van de opslagcontainers verzorgt.



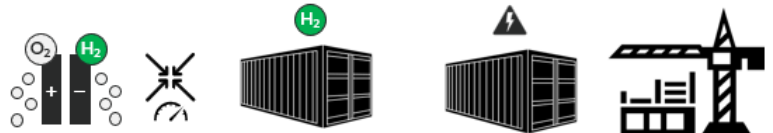
### 2. Verhuur brandstofcelaggregaten incl. distributie

Waterstof wordt af-fabriek ingekocht, de waterstofopslag containers zijn nu in eigendom en de logistiek is in eigen beheer.



### 3. Verticaal geïntegreerd business-model

Productie groene waterstof d.m.v. elektrolyse, compressie & vulstations, distributie van waterstofcontainers en levering van stroom d.m.v. brandstofcelaggregaten.



## 4.3 Analyse omzetpotentieel bouwplaatsen

Na afstemming met JP Van Eesteren gaan we voor het berekenen van deze use case uit van:

- 10 aggregaten van 150 kW;
- Inzet: 10 uur per werkdag (50 uur per week)
- Dagelijkse verbruik van  $10 \times 100 \text{ kW} = 1 \text{ MWh} / \text{dag}$
- Verhuurgraad / bezettingsgraad: 80%

De tariefstructuur in de verhuurmarkt voor aggregaten lijkt erg op de tariefstructuur in de autoverhuur branche. Net als bij autoverhuur wordt vaak een bedrag betaald per dag, plus een vergoeding voor het brandstofverbruik. Bij langere huurcontracten nemen de dagvergoedingen af. Deze structuur is op het oog eenvoudig, maar in de praktijk behoorlijk complex omdat er allerlei portfolio optimalisaties worden uitgevoerd. Dit is niet eenvoudig te modelleren. Bovendien wil Bredenoord dergelijke kengetallen niet delen i.v.m. de concurrentiegevoeligheid. Op advies van Bredenoord berekenen we de potentiële omzet met de volgende vuistregel:

- Netto omzet = volume te leveren elektriciteit \* € 0,30/kWh

In dit tarief zijn alle omzetstromen inbegrepen (verhuur aggregaat, verkoop geleverde elektriciteit). Hiermee kan het omzetspotentieel worden berekend voor alle drie de businessmodellen:  
 € 624.000/jaar

#### 4.4 Businessmodel 1 - Verhuur brandstofcelaggregaten

In dit businessmodel zijn de activiteiten beperkt tot het op de bouwplaats leveren van brandstofcelaggregaten. De waterstof wordt ingekocht bij een gasleverancier (bijv. Airliquide) en op de verschillende bouwplaatsen geleverd. De lege containers worden opgehaald, gevuld en opnieuw geleverd. De brandstofcelaggregaten worden door het bouwbedrijf of de verhuurder zelf op locatie afgeleverd.

##### 4.4.1 Belangrijkste aannames

*Inkooprijks waterstof* € 3,50/kg geleverd in gemodificeerde 20ft zeecontainers met cilinders op 300 bar en capaciteit van 800 kg. De waterstof heeft een fossiele oorsprong, maar is d.m.v. certificaten vergoend

##### *Waterstofaggregaat*

Nominaal vermogen	150 kW
CAPEX	€ 2400/kW
Systeem efficiency	52%
Technische levensduur	70.000 uur of 10 jaar (wat eerder komt). Door de vele en soms ruwe handling van verhuuraggregaten verwacht Bredenoord dat de levensduur maximaal 10 jaar is.
Stack revisie (maximaal 2x) na	23.000 uur
Kosten stack revisie (vanaf 2022)	€ 600/kW
Kosten stack revisie (vanaf 2025)	€ 300/kW
O&M kosten	2% van CAPEX
Restwaarde (vnl. waardevolle metalen)	5%

##### *Transportkosten*

Aangezien dit type aggregaat kleiner is en een bouwbedrijf veel materieel moet vervoeren naar een bouwplaats zijn de transportkosten van het brandstofcelaggregaat verwaarloosbaar.

##### *Totaal benodigde investeringen:*

10 x 150 kW PEM brandstofcelaggregaat	€ 3,6 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 3,6 miljoen</b>

## 4.4.2 Economische analyse

Exploitatierkening Use Case Bouwplaatsen										
Business model 1: verhuur waterstofaggregaten										
	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
Netto omzet	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624
Kostprijs van de omzet	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Bruto marge	204	204	204	204	204	204	204	204	204	204
Personeelskosten & overhead	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
Onderhoudskosten	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
OPEX	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
EBITDA	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
Afschrijvingen op materiele vaste activa	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360
Bedrijfsresultaat (EBIT)	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228

Berekening NPV & IRR											
Alle bedragen in €1.000											
	Jaar 0	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
EBIT		-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228
Vpb (@22,5%)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOPLAT		-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228	-228
+ Afschrijvingen op materiele vaste activa		360	360	360	360	360	360	360	360	360	360
+/- Mutaties in netto werkkapitaal		P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
Free Cash Flow (FCF)	-3.600	132	132	132	132	132	132	132	132	132	132
IRR		-15,0%									
WACC		10%									
NPV of explicit period		-2.536									
NPV of terminal value		69									
Net Present Value		-2.466									

De NPV van de totale investering van 3,6 miljoen euro is negatief. Hoewel de brutomarge en cashflows positief zijn, kan de investering niet worden terugverdiend. Het relatief lage aantal draaiuren (50 uur/week) in combinatie met de noodzaak om piekvermogen te kunnen leveren, waardoor het brandstofcelaggregaat vaak in deellast draait, zorgt ervoor dat er te weinig omzet gegenereerd kan worden om de investering terug te verdienen.

## 4.4.3 Sensitiviteitsanalyse

In de onderstaande tabellen is weergegeven in welke mate de NPV gevoelig is voor wijzigingen in de belangrijkste aannames. Hieruit blijkt dat de NPV positief wordt, en daarmee een interessante business case ontstaat, wanneer de verkoopprijs van de stroom stijgt naar tussen € 0,50/kWh en € 0,60/kWh. Het verlagen van de inkooprijs van de waterstof leidt niet tot een positieve NPV.

Sensitiviteitsanalyse van de NPV - TBI use case 1						
Alle bedragen in duizenden euro's						
Verkoopprijs per kWh						
Capex / MW waterstofaggregaten	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
1.600.000	-3.588	-2.426	-1.264	-258	642	1.543
1.700.000	-3.738	-2.576	-1.415	-386	515	1.415
1.800.000	-3.889	-2.727	-1.565	-514	387	1.287
1.900.000	-4.039	-2.877	-1.715	-641	259	1.160
2.000.000	-4.189	-3.027	-1.865	-769	132	1.032
2.100.000	-4.339	-3.177	-2.016	-896	4	905
2.200.000	-4.490	-3.328	-2.166	-1.024	-123	777
2.300.000	-4.640	-3.478	-2.316	-1.154	-251	649
2.400.000	-4.790	-3.628	-2.466	-1.304	-379	522

Sensitiviteitsanalyse van de NPV - TBI use case 1						
Alle bedragen in duizenden euro's						
Verkoopprijs per kWh						
Inkooprijs waterstof (€/kg)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
1,50	-3.449	-2.287	-1.141	-240	660	1.561
1,75	-3.617	-2.455	-1.293	-370	531	1.431
2,00	-3.784	-2.623	-1.461	-500	401	1.301
2,25	-3.952	-2.790	-1.628	-630	271	1.171
2,50	-4.120	-2.958	-1.796	-760	141	1.041
2,75	-4.287	-3.125	-1.963	-889	11	911
3,00	-4.455	-3.293	-2.131	-1.019	-119	782
3,25	-4.622	-3.461	-2.299	-1.149	-249	652
3,50	-4.790	-3.628	-2.466	-1.304	-379	522

## 4.5 Businessmodel 2: verhuur & distributie

In dit businessmodel wordt de waterstof ingekocht bij een gasleverancier en wordt deze af-fabriek geleverd. Het transport van de volle en lege waterstofcontainers wordt in eigen beheer uitgevoerd.

### 4.5.1 Belangrijkste aannames

*Inkooprij waterstof:* € 2,50/kg op 300bar in 20ft zeecontainers. De waterstof heeft een fossiele oorsprong, maar is d.m.v. certificaten vergoend.

*Afstand bouwplaatsen tot vulpunt:* Gemiddelde afstand 100 kilometer (enkele reis)

#### *Euro6 truck inclusief trailer met kraan:*

Aantal	1x
CAPEX	€ 160.000
Levensduur	10 jaar
Dieserverbruik	32 liter per 100km
AdBlue verbruik	0,92 liter per 100km
Prijs diesel	1,50/liter
Prijs AdBlue	0,52/liter
O&M kosten	5% van CAPEX

#### *Inhuur chauffeurs:*

Uurtarief ZZP-chauffeurs	€ 30/uur
Uren per jaar	600 uur (2 uur per enkele reis x 300 ritten per jaar)

#### *Storage containers:*

Aantal	20ft zeecontainer met cilinders op 300 bar 11 x (op elke bouwplaats 1 en 1 'in transit')
Levensduur	25 jaar
O&M kosten	4% van CAPEX
Energieopslag voor	19,4 dagen per volle container

#### *Totaal benodigde investeringen:*

10 x 150 kW PEM brandstofcelaggregaat	€ 3,6 miljoen
11 x 20ft zeecontainer @300 bar (800 kg)	€ 3,3 miljoen
1 x truck met trailer en lift voor 2x20ft containers	€ 0,2 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 7,1 miljoen</b>



#### 4.5.2 Economische analyse

Exploitatierkening Use Case Bouwplaatsen										
Business model 2: verhuur en distributie										
	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
<b>Netto omzet</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>	<b>624</b>
Kostprijs waterstof	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Transportkosten opslagcontainers	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Kostprijs van de omzet	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332
<b>Bruto marge</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>	<b>292</b>
Personeelskosten & overhead	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
Onderhoudskosten	212	212	212	212	212	212	212	212	212	212
<b>OPEX</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>	<b>212</b>
<b>EBITDA</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
Afschrijvingen op materiele vaste activa	508	508	508	508	508	508	508	508	508	508
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>

Berekening NPV & IRR											
Alle bedragen in €1.000											
	Jaar 0	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
<b>EBIT</b>		<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>
Vpb (@22,5%)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NOPLAT</b>		<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>	<b>-428</b>
+ Afschrijvingen op materiele vaste activa		508	508	508	508	508	508	508	508	508	508
+/- Mutaties in netto werkkapitaal		P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	<b>-7.060</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
IRR		-27,7%									
WACC		10%									
Eeuwigdurende groeivoet (g)		0%									
Net Present Value		-5.141									

De lagere inkoopprijs voor de waterstof (2,50 i.p.v. 3,50 per kilogram) levert geen hogere NPV op, omdat de het rendement op de extra investeringen te laag is. Het belangrijkste probleem blijft het lage aantal draaiuren, waardoor de aggregaten onvoldoende omzet kunnen genereren.

## 4.6 Businessmodel 3: Verticale integratie

In tegenstelling tot businessmodel 1 en 2, wordt de waterstof in dit businessmodel zelf geproduceerd met een Alkaline elektrolyser. De productiefaciliteit beschikt daarnaast over een compressor & diverse vulstations.

### 4.6.1 Belangrijkste aannames

#### *Elektrolyser:*

In deze use-case is er jaarlijks een vaste hoeveelheid waterstof die geproduceerd moet worden. Het minimale nominale vermogen dat de elektrolyser nodig heeft om deze hoeveelheid waterstof te produceren is 0,9 MW. Dit betekent echter wel dat de elektrolyser het hele jaar op vollast moet draaien en er daardoor geen energieflexibiliteit is. De gemiddelde elektriciteitsprijs die de eigenaar van de elektrolyser zal moeten betalen, is dan gelijk aan de gemiddelde day-ahead prijs. Het overdimensioneren van de elektrolyser creëert energieflexibiliteit, waardoor momenten met hoge elektriciteitsprijzen vermeden kunnen worden.

Uit ons optimalisatiemodel blijkt dat – onder de onderstaande assumpties - het vergroten van het nominale vermogen tot 1,0 MW leidt tot een betere NPV. Ten opzichte van de walstroom use-case, wordt de elektrolyser (relatief) minder over-gedimensioneerd. De reden hiervoor is dat op 1-MW schaal de CAPEX voor een alkaline elektrolyser € 800/kW bedraagt en op 20-MW schaal € 520/kW. De hogere prijs voor overdimensionering beperkt de waarde die kan worden gecreëerd met energieflexibiliteit.

Voor de keuze van de elektrolyser zijn we uitgegaan van een Alkaline elektrolyser met de volgende specificaties:

Nominaal vermogen:	1,0 MW
Minimaal vermogen:	15%
Uitgaande druk:	30 bar
Energieverbruik @nominaal vermogen:	62 kWh/kg waterstof
Waterverbruik:	10 liter/kg
Technische levensduur (systeem):	25 jaar
Technische levensduur stack:	60.000 uur
Beschikbaarheid:	98%
CAPEX – totale systeem:	€ 800/kW
OPEX - elektrolyser systeem:	4%
CAPEX - Stack revisie:	€ 280/kW

Degradatie van het systeem is verwaarloosd.

#### *Compressor en vulstations:*

Druk in:	30 bar
Druk uit:	300 bar
Capaciteit:	16 kg/uur
Technische levensduur:	25 jaar

Energieverbruik: 1,5 kWh/kg waterstof  
CAPEX: € 431k<sup>7</sup>

#### *Facility CAPEX & OPEX (overig)*

Onder deze categorie vallen alle overige investeringen die gerelateerd zijn aan het realiseren van een waterstoffabriek, zoals kosten voor civiele werkzaamheden, engineering, Distributed Control System, Energy Management Unit, netaansluiting, commissioning en opstart kosten. Deze kosten worden geschat op 20% van de CAPEX voor het elektrolyser systeem plus de CAPEX voor de compressor en vulstations. De operation & maintenance kosten van de faciliteit bedragen 4% van de Facility CAPEX.

#### *Waterstofopslag:*

Ten opzichte van business model 2 is er 1 waterstofopslag container extra nodig, aangezien er altijd waterstof geproduceerd moet kunnen worden, ook als er 1 container onderweg is.

#### *Brandstofcelaggregaat:*

De brandstofcelaggregaten worden na 10 jaar afgeschreven en vervangen. We nemen aan dat de prijs voor nieuwe PEM brandstofcelaggregaten daalt tot € 600k/MW.

#### *Totaal benodigde investeringen:*

10 x 150 kW PEM Brandstofcelaggregaat	€ 3,6 miljoen
12 x waterstofopslag in 20ft container voor 800kg H <sub>2</sub> @300bar	€ 3,6 miljoen
1 x truck met trailer en kraan voor 2x20ft containers	€ 0,16 miljoen
CAPEX Elektrolyser incl balance of plant	€ 0,79 miljoen
CAPEX Compressoren en vulstations	€ 0,43 miljoen
CAPEX Faciliteit/overig	€ 0,24 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 8,8 miljoen</b>

*N.B.: indien niet anders vermeld zijn de aannames gelijk aan businessmodel 2*

---

<sup>7</sup> De CAPEX en OPEX van de compressor en de vulstations is bepaald op basis van een model gepubliceerd door FCH-JU (2017), *Early business cases for H<sub>2</sub> in energy storage and more broadly power to H<sub>2</sub> applications*, p. 51

## 4.6.2 Economische analyse

Exploatierekening Use Case Bouwplaatsen																										
Business model 3: verticaal geïntegreerd	Yr 1	Yr 2	Yr 3	Yr 4	Yr 5	Yr 6	Yr 7	Yr 8	Yr 9	Yr 10	Yr 11	Yr 12	Yr 13	Yr 14	Yr 15	Yr 16	Yr 17	Yr 18	Yr 19	Yr 20	Yr 21	Yr 22	Yr 23	Yr 24	Yr 25	
<b>Netto omzet</b>	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	624	
Kostprijs van de omzet	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	569	
<b>Bruto marge</b>	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	
Personeelskosten & overhead	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	
Onderhoudskosten	276	276	276	276	276	276	276	552	276	276	1.176	276	276	276	276	552	276	276	276	276	276	276	276	276	276	
<b>OPEX</b>	276	276	276	276	276	276	276	552	276	276	1.176	276	276	276	276	552	276	276	276	276	276	276	276	276	276	
<b>EBITDA</b>	-221	-221	-221	-221	-221	-221	-221	-497	-221	-221	-1.121	-221	-221	-221	-221	-497	-221	-221	-221	-221	-221	-221	-1.121	-221	-497	
Afschrijvingen op mat. vaste activa	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-1.075	-800	-800	-1.700	-800	-800	-800	-800	-1.075	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-1.700	-800	-1.075	
<b>Berekening NPV &amp; IRR</b>																										
Alle bedragen in €1.000	Yr 0	Yr 1	Yr 2	Yr 3	Yr 4	Yr 5	Yr 6	Yr 7	Yr 8	Yr 9	Yr 10	Yr 11	Yr 12	Yr 13	Yr 14	Yr 15	Yr 16	Yr 17	Yr 18	Yr 19	Yr 20	Yr 21	Yr 22	Yr 23	Yr 24	Yr 25
<b>EBIT</b>	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-1.075	-800	-800	-1.700	-800	-800	-800	-800	-1.075	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-1.700	-800	-1.075	-800
Vpb (@22,5%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>NOPLAT</b>	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-1.075	-800	-800	-1.700	-800	-800	-800	-800	-1.075	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-1.700	-800	-1.075	-800
+ Afschrijvingen op mat. vaste activa	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	
+/- Mutaties in netto werkkapitaal	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	-8.822	-221	-221	-221	-221	-221	-221	-497	-221	-221	-1.121	-221	-221	-221	-221	-497	-221	-221	-221	-221	-221	-221	-1.121	-221	-497	
IRR	n/a																									
WACC	10%																									
NPV of explicit period	-10.431																									
NPV of terminal value	69																									
Net Present Value	-10.362																									

Uit deze analyse blijkt dat de te realiseren brutomarge te laag is om een positieve cashflow te kunnen genereren. Door de beperkte omvang van de elektrolyser (1,0 MW) zijn er weinig schaalvoordelen en zijn de benodigde investeringen relatief hoog.

## 4.6.3 Sensitiviteitsanalyse

In de onderstaande tabellen is weergegeven in welke mate de NPV gevoelig is voor wijzigingen in de belangrijkste aannames. Hieruit blijkt dat noch een daling van de kosten van de elektrolyser, noch een daling van de elektriciteitsprijzen zorgen voor een positieve business case. De verklaring hiervoor is dat de aggregaten onvoldoende vollast uren maken, waardoor het verdienpotentieel beperkt blijft. Met een omzet van € 624k per jaar is er te weinig ruimte verdienpotentieel om de investering van 8,8 miljoen terug te verdienen en de rendementseis (WACC) van 10% per jaar te halen.

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Bouwplaatsen business model 3**  
Alle bedragen in duizenden euro's

		Gemiddelde elektriciteitsprijs (€ / MWh)					
		5	10	20	30	40	50
Capex / kW elektrolyzer	200	-7.276	-7.590	-8.216	-8.842	-9.469	-10.095
	300	-7.419	-7.732	-8.358	-8.985	-9.611	-10.237
	400	-7.561	-7.874	-8.500	-9.127	-9.753	-10.379
	600	-7.845	-8.158	-8.785	-9.411	-10.038	-10.664
	800	-8.130	-8.443	-9.069	-9.696	-10.322	-10.948

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Bouwplaatsen business model 3**  
Alle bedragen in duizenden euro's

		Verkoopprijs elektriciteit in € per kWh					
		0,30	0,40	0,50	0,60	0,50	0,60
Inkoopprijs per kWh	0,010	-8.443	-7.585	-6.726	-5.868	-5.010	-4.152
	0,020	-9.069	-8.211	-7.353	-6.495	-5.636	-4.778
	0,030	-9.696	-8.837	-7.979	-7.121	-6.263	-5.405
	0,040	-10.322	-9.464	-8.606	-7.747	-6.889	-6.031
	0,050	-10.948	-10.090	-9.232	-8.374	-7.516	-6.657

## 5. Brandstofcelaggregaten op festivalterreinen & evenementlocaties

### 5.1 Introductie

In 2017 werden er volgens Bureau Respons in Nederland 954 festivals georganiseerd, die zo'n 26,6 miljoen bezoekers trokken<sup>8</sup>. Op veel festivallocaties worden dieselaggregaten ingezet, omdat er geen, of een te kleine, netaansluiting beschikbaar is. Het geschatte dieselverbruik van deze aggregaten op festivalterreinen bedraagt volgens Ecovolt circa 15 miljoen liter per jaar. Voor kermissen schat Ecovolt het dieselverbruik op dezelfde hoeveelheid.

De inzet van brandstofcelaggregaten kan de luchtkwaliteit verbeteren, vermindert geluidsoverlast en voorkomt CO<sub>2</sub> emissies als gebruik wordt gemaakt van groene of blauwe waterstof.



### 5.2 Businessmodellen

Deze use-case hebben we doorgerekend op basis van 3 verschillende businessmodellen:

#### 1. **Verhuur brandstofcelaggregaten**

Activiteiten zijn beperkt tot de verhuur van aggregaten. Waterstof wordt ingekocht bij gasleverancier, die ook de leveringen en retourritten van de opslagcontainers verzorgt.

#### 2. **Verhuur brandstofcelaggregaten incl. distributie**

Waterstof wordt af-fabriek ingekocht, de waterstofopslag containers zijn nu in eigendom en de logistiek is in eigen beheer.

#### 3. **Verticaal geïntegreerd business model**

Productie groene waterstof d.m.v. elektrolyse, compressie & vulstations, distributie van waterstofcontainers en levering van stroom d.m.v. brandstofcelaggregaten.

### 5.3 Analyse omzetspotentieel festivalterreinen, kermissen en evenementen

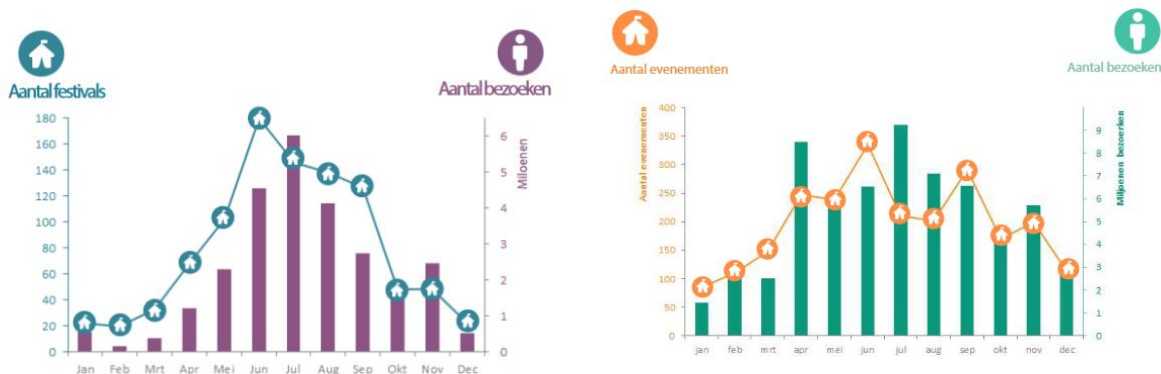
Na afstemming met Bredenoord gaan we voor het berekenen van deze use case uit van:

- 10 PEM brandstofcelaggregaten met een nominaal vermogen van 150 kW;
- Gemiddeld verhuurpercentage van 70%;
- Gemiddelde capacity factor tijdens verhuur van 30% (d.w.z.: het geleverd vermogen tijdens verhuur bedraagt gemiddeld  $30\% * 150 \text{ kW} = 45 \text{ kW}$ ).

<sup>8</sup> <https://respons.nl/wp-content/uploads/2018/11/Factsheet-Festival-Monitor-2018.pdf>

Net als bij de use-case voor bouwterreinen berekenen we de potentiële omzet op basis van een prijs voor de geleverde stroom van € 0,30/kWh. In dit tarief zijn alle omzetstromen inbegrepen (verhuur aggregaat, verkoop geleverde elektriciteit). Hiermee kan het omzetspotentieel worden berekend voor alle drie de businessmodellen: € 828k/jaar.

Een moeilijk in te schatten parameter is de verhuurgraad, met name door het sterke seizoenspatroon, zie de onderstaande grafieken voor 2017 die afkomstig zijn van Bureau Respons<sup>9</sup>. Deze verhuurgraad wordt als concurrentiegevoelig beschouwd en het is ons daardoor niet gelukt hier betrouwbare cijfers over te vinden. Wij denken dat een verhuurpercentage van 70% met een relatief kleine vloot en de voordelen van brandstofcelaggregaten haalbaar is.



## 5.4 Businessmodel 1 - Verhuur brandstofcelaggregaten

In dit businessmodel zijn de activiteiten beperkt tot het op de festivals, kermis en evenementen leveren van brandstofcelaggregaten. De waterstof wordt ingekocht bij een gasleverancier, die verantwoordelijk is voor het bezorgen en ophalen van de waterstofopslag containers. Het transport van de aggregaten naar de verhuurlocaties wordt uitbesteed aan een transporteur.

### 5.4.1 Belangrijkste aannames

*Inkoopprijs waterstof*

*€ 3,50/kg geleverd in gemodificeerde 10ft zeecontainers met cilinders op 300 bar en capaciteit van 400 kg. De waterstof heeft een fossiele oorsprong, maar is d.m.v. certificaten vergoend*

*Waterstofaggregaat*

Nominaal vermogen

150 kW

CAPEX

€ 2400/kW

<sup>9</sup> <https://respons.nl/wp-content/uploads/2019/01/Factsheet-G50-Monitor-2018.pdf>  
<https://respons.nl/wp-content/uploads/2018/11/Factsheet-Festival-Monitor-2018.pdf>

Stelsysteem efficiëntie	52%
Technische levensduur	70.000 uur of 10 jaar (wat eerder komt). Door de vele en soms ruwe handling van verhuuraggregaten verwacht Bredenoord dat de levensduur maximaal 10 jaar is.
Stack revisie (maximaal 2x) na	23.000 uur
Kosten stack revisie (vanaf 2022)	€ 600/kW
Kosten stack revisie (vanaf 2025)	€ 300/kW
O&M kosten	2% van CAPEX
Restwaarde (vnl. waardevolle metalen)	5%
<i>Transport aggregaten:</i>	
Transportkosten	Stelpost € 80k/jaar
<i>Totaal benodigde investeringen:</i>	
10 x 150 kW PEM brandstofcelaggregaat	€ 3,6 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 3,6 miljoen</b>

## 5.4.2. Economische analyse

Exploitatierkening Use Case Festivals & Evenementen										
Business model 1: verhuur waterstofaggregaten	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
<b>Netto omzet</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>
Kostprijs waterstof	557	557	557	557	557	557	557	557	557	557
Transportkosten	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Kostprijs van de omzet	637	637	637	637	637	637	637	637	637	637
<b>Bruto marge</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>	<b>271</b>
Personeelkosten & overhead	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
Onderhoudskosten	72	72	72	72	72	522	72	72	72	72
<b>OPEX</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>522</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>
<b>EBITDA</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>-251</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>
Afschrijvingen waterstofaggregaat	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360
Afschrijvingen op materiele vaste activa	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-611</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>

Berekening NPV & IRR											
Alle bedragen in €1.000											
	Jaar 0	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
<b>EBIT</b>		<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-611</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>
Vpb (@22,5%)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NOPLAT</b>		<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-611</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>	<b>-161</b>
+ Afschrijvingen op materiele vaste activa		360	360	360	360	360	360	360	360	360	360
+/- Mutaties in netto werkkapitaal		P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	<b>-3.600</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>-251</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>	<b>199</b>
IRR		-13,1%									
WACC		10%									
NPV of explicit period		-2.394									
NPV of terminal value		69									
Net Present Value		-2.325									

Uit deze analyse blijkt dat, ondanks de positieve vrije kasstromen, de investering niet kan worden terugverdiend binnen 10 jaar (de technische levensduur van de aggregaten).

## 5.4.3 Sensitiviteitsanalyse

Uit de onderstaande sensitiviteitsanalyse blijkt dat de business case 'in the money' raakt vanaf een verkoopprijs van € 0,50/kWh. Dit is fors hoger dan de € 0,30/kWh, die volgens Bredenoord marktconform is. Van het bedrijf Green Events hebben wij vernomen dat bepaalde festivals, die zich profileren op het thema duurzaamheid bereid zijn € 0,50/kWh te betalen. Het is onduidelijk of deze markt groot genoeg is, maar dit verdient nader onderzoek.

Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Festival- en evenementen business model 1  
Alle bedragen in duizenden euro's

Capex / MW aggregaat	Verkoopprijs per kWh					
	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
1.600.000	-1.123	-490	123	736	1.340	1.937
1.800.000	-1.424	-749	-136	477	1.085	1.682
2.000.000	-1.724	-1.009	-396	218	829	1.427
2.200.000	-2.025	-1.268	-655	-42	571	1.172
2.400.000	-2.325	-1.554	-914	-301	312	916

Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Festival- en evenementen business model 1  
Alle bedragen in duizenden euro's

Inkooprijs waterstof (€/kg)	Verkoopprijs per kWh					
	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
1,50	-725	-112	501	1.100	1.697	2.295
2,00	-1.079	-466	147	756	1.353	1.950
2,50	-1.436	-820	-207	407	1.008	1.606
3,00	-1.880	-1.174	-561	53	664	1.261
3,50	-2.325	-1.554	-914	-301	312	916



## 5.5 Businessmodel 2 - Verhuur & distributie

In dit businessmodel wordt de waterstof ingekocht bij een gasleverancier en wordt deze af-fabriek geleverd. Het transport van de volle en lege waterstofcontainers wordt in eigen beheer uitgevoerd.

### 5.5.1 Belangrijkste aannames

*Inkooprij waterstof:* € 2,50/kg op 300bar in 20ft zeecontainers. De waterstof heeft een fossiele oorsprong, maar is d.m.v. certificaten vergoend.

#### *Transportmiddelen:*

Type:	Euro6 truck inclusief trailer voor zeecontainers met kraan:
Aantal	1x
CAPEX	€ 160.000
Maximum lading:	4x10ft opslagcontainers
Levensduur	10 jaar
Dieserverbruik	32 liter per 100km
AdBlue verbruik	0,92 liter per 100km
Prijs diesel	1,50/liter
Prijs AdBlue	0,52/liter
O&M kosten	5% van CAPEX

*Gemiddelde afstand tot vulpunt:* 100 kilometer (enkele reis)  
*Aantal ritten per jaar:* 100 (met 4 containers per rit)

#### *Inhuur chauffeurs:*

Uurtarief ZZP-chauffeurs	€ 30/uur
Uren per jaar	400 uur (2 uur per enkele reis x 200 ritten per jaar)

#### *Storage containers:*

Capaciteit	10ft zeecontainer met cilinders op 300 bar
CAPEX	400 kg
Aantal	€175k/stuk
Levensduur	10
O&M kosten	25 jaar
Energieopslag voor	4% van CAPEX
	6,4 dagen per volle container

#### *Totaal benodigde investeringen:*

10 x 150 kW PEM brandstofcelaggregaat	€ 3,6 miljoen
10 x 10ft zeecontainer @300 bar (400 kg)	€ 1,75 miljoen
1 x truck met trailer en lift voor 2x20ft containers	€ 0,16 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 5,51 miljoen</b>



### 5.5.3 Economische analyse

Exploitatierekening Use Case Festivals & Evenementen										
Business model 2: verhuur en distributie										
	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
<b>Netto omzet</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>	<b>828</b>
Kostprijs waterstof	398	398	398	398	398	398	398	398	398	398
Transportkosten	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102
Kostprijs van de omzet	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
<b>Bruto marge</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>	<b>408</b>
Personeelkosten & overhead	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
Onderhoudskosten	150	72	72	72	72	522	72	72	72	72
<b>OPEX</b>	<b>150</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>522</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>72</b>
<b>EBITDA</b>	<b>258</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>-114</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>
Afschrijvingen op materiele vaste activa	446	446	446	446	446	446	446	446	446	446
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	<b>-188</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-560</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>

Berekening NPV & IRR											
Alle bedragen in €1.000											
	Jaar 0	Jaar 1	Jaar 2	Jaar 3	Jaar 4	Jaar 5	Jaar 6	Jaar 7	Jaar 8	Jaar 9	Jaar 10
<b>EBIT</b>		<b>-188</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-560</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>
Vpb (@22,5%)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NOPLAT</b>		<b>-188</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-560</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>	<b>-110</b>
+ Afschrijvingen op materiele vaste activa		446	446	446	446	446	446	446	446	446	446
+/- Mutaties in netto werkkapitaal		P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	<b>-5.510</b>	<b>258</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>-114</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>	<b>336</b>
IRR		-10,4%									
WACC		10%									
NPV of explicit period		-3.426									
NPV of terminal value		474									
<b>Net Present Value</b>		<b>-2.952</b>									

Uit deze analyse blijkt dat er te weinig rendement wordt gemaakt om de investeringen binnen 10 jaar terug te verdienen (de technische levensduur van de aggregaten).

### 5.5.4 Sensitiviteitsanalyse

Uit de sensitiviteitsanalyse blijkt dat een positieve business case binnen bereik ligt, als de waterstof goedkoper ingekocht kan worden en de verkoopprijs per kWh stijgt naar tussen €0,50 en €0,55/kWh. Een positieve business case lijkt niet mogelijk met een verkoopprijs van € 0,30/kWh

Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Festival- en evenementen business model 2  
Alle bedragen in duizenden euro's

Capex / MW aggregaat	Verkoopprijs per kWh					
	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
1.600.000	-1.783	-1.161	-548	65	663	1.260
1.800.000	-2.050	-1.421	-808	-194	407	1.005
2.000.000	-2.351	-1.680	-1.067	-454	152	749
2.200.000	-2.651	-1.942	-1.326	-713	-103	494
2.400.000	-2.952	-2.208	-1.586	-972	-359	239

Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Festival- en evenementen business model 2  
Alle bedragen in duizenden euro's

Inkooprijs waterstof (€/kg)	Verkoopprijs per kWh					
	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
1,00	-1.751	-1.137	-524	78	676	1.273
1,25	-1.928	-1.314	-701	-94	503	1.101
1,50	-2.110	-1.491	-878	-266	331	928
2,00	-2.507	-1.845	-1.232	-619	-14	584
2,50	-2.952	-2.208	-1.586	-972	-359	239

## 5.6 Business model 3 – Verticale integratie

In tegenstelling tot businessmodel 1 en 2, wordt de waterstof in dit businessmodel zelf geproduceerd met een Alkaline elektrolyser. De productiefaciliteit beschikt daarnaast over een compressor & diverse vulstations.

### 5.6.1 Belangrijkste aannames

#### *Elektrolyser:*

In deze use-case is er jaarlijks een vaste hoeveelheid waterstof die geproduceerd moet worden. Het minimale nominale vermogen dat de elektrolyser nodig heeft om deze hoeveelheid waterstof te produceren is 1,1 MW. Uit ons optimalisatiemodel blijkt dat – onder de onderstaande assumpties - het vergroten van het nominale vermogen tot 1,4 MW leidt tot een betere NPV.

Voor de keuze van de elektrolyser zijn we uitgegaan van een Alkaline elektrolyser met de volgende specificaties:

Nominaal vermogen:	1,4 MW
Minimaal vermogen:	15%
Uitgaande druk:	30 bar
Energieverbruik @nominaal vermogen:	62 kWh/kg waterstof
Waterverbruik:	10 liter/kg
Technische levensduur (systeem):	25 jaar
Technische levensduur stack:	60.000 uur
Beschikbaarheid:	98%
CAPEX – totale systeem:	€ 800/kW
OPEX - elektrolyser systeem:	4%
CAPEX - Stack revisie:	€ 280/kW

Degradatie van het systeem is verwaarloosd.

#### *Compressor en vulstations:*

Druk in:	30 bar
Druk uit:	300 bar
Capaciteit:	23 kg/uur
Technische levensduur:	25 jaar
Energieverbruik:	1,5 kWh/kg waterstof
CAPEX:	€ 545k <sup>10</sup>

#### *Facility CAPEX & OPEX (overig)*

---

<sup>10</sup> De CAPEX en OPEX van de compressor en de vulstations is bepaald op basis van een model gepubliceerd door FCH-JU (2017), *Early business cases for H<sub>2</sub> in energy storage and more broadly power to H<sub>2</sub> applications*, p. 51

Onder deze categorie vallen alle overige investeringen die gerelateerd zijn aan het realiseren van een waterstoffabriek, zoals kosten voor civiele werkzaamheden, engineering, Distributed Control System, Energy Management Unit, netaansluiting, commissioning en opstart kosten. Deze kosten worden geschat op 20% van de CAPEX voor het elektrolyser systeem plus de CAPEX voor de compressor en vulstations. De operation & maintenance kosten van de faciliteit bedragen 4% van de Facility CAPEX.

*Waterstofopslag:*

Ten opzichte van businessmodel 2 is er 1 waterstofopslag container extra nodig, aangezien er altijd waterstof geproduceerd moet kunnen worden, ook als er 1 container onderweg is.

*Brandstofcelaggregaat:*

De brandstofcelaggregaten worden na 10 jaar afgeschreven en vervangen. We nemen aan dat de prijs voor nieuwe PEM brandstofcelaggregaten daalt tot € 600k/MW.

*Totaal benodigde investeringen:*

10 x 150 kW PEM Brandstofcelaggregaat	€ 3,6 miljoen
11 x waterstofopslag in 10ft container voor 400kg H <sub>2</sub> @300bar	€ 1,9 miljoen
1 x truck met trailer en kraan voor 2x20ft containers	€ 0,16 miljoen
CAPEX Elektrolyser incl balance of plant	€ 1,12 miljoen
CAPEX Compressoren en vulstations	€ 0,55 miljoen
CAPEX Faciliteit/overig	€ 0,33 miljoen
Werkkapitaal	€ P.M.
<b>Totaal</b>	<b>€ 7,69 miljoen</b>

*N.B.: indien niet anders vermeld zijn de aannames gelijk aan businessmodel 2*

## 5.6.2 Economische analyse

Exploitierekening Use Case Festivals & Evenementen																									
Business model 3: verticaal geïntegreerd																									
	Yr 1	Yr 2	Yr 3	Yr 4	Yr 5	Yr 6	Yr 7	Yr 8	Yr 9	Yr 10	Yr 11	Yr 12	Yr 13	Yr 14	Yr 15	Yr 16	Yr 17	Yr 18	Yr 19	Yr 20	Yr 21	Yr 22	Yr 23	Yr 24	Yr 25
<b>Netto omzet</b>	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828
Kostprijs van de omzet	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626	626
<b>Bruto marge</b>	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201
Personeelskosten & overhead	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
Onderhoudskosten	229	229	229	229	229	679	229	229	621	229	1.579	229	229	229	229	229	1.071	229	229	229	1.579	229	229	229	229
<b>OPEX</b>	229	229	229	229	229	679	229	229	621	229	1.579	229	229	229	229	229	1.071	229	229	229	1.579	229	229	229	229
<b>EBITDA</b>	-27	-27	-27	-27	-27	-477	-27	-27	-420	-27	-1.377	-27	-27	-27	-27	-27	-870	-27	-27	-27	-1.377	-27	-27	-27	-27
Afschrijvingen op mat. vaste activa	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533
<b>Bedrijfsresultaat (EBIT)</b>	-560	-560	-560	-560	-560	-1.010	-560	-560	-953	-560	-1.910	-560	-560	-560	-560	-560	-1.403	-560	-560	-560	-1.910	-560	-560	-560	-560
<b>Berekening NPV &amp; IRR</b>																									
Alle bedragen in €1.000																									
<b>EBIT</b>	-560	-560	-560	-560	-560	-1.010	-560	-560	-953	-560	-1.910	-560	-560	-560	-560	-560	-1.403	-560	-560	-560	-1.910	-560	-560	-560	-560
Vennootschapsbelasting (@22,5%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NOPLAT</b>	-560	-560	-560	-560	-560	-1.010	-560	-560	-953	-560	-1.910	-560	-560	-560	-560	-560	-1.403	-560	-560	-560	-1.910	-560	-560	-560	-560
+ Afschrijvingen op mat. vaste activa	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533
+/- Mutaties in netto werkkapitaal	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.	P.M.
<b>Free Cash Flow (FCF)</b>	-7.686	-27	-27	-27	-27	-477	-27	-27	-420	-27	-1.377	-27	-27	-27	-27	-27	-870	-27	-27	-27	-1.377	-27	-27	-27	-27
IRR	n/a																								
WACC	10%																								
NPV of explicit period	-8.342																								
NPV of terminal value	62																								
<b>Net Present Value</b>	-8.280																								

Uit deze analyse blijkt dat deze business case niet haalbaar is. De brutomarge is te laag om de operation & maintenance kosten te dekken, waardoor er structureel een negatieve kasstroom is.

## 5.6.3 Sensitiviteitsanalyse

In de tabel linksonder is weergegeven hoe de NPV verandert bij wijziging van de CAPEX/kW van de elektrolyser en de gemiddelde inkooprij van de elektriciteit. Hieruit blijkt hoe moeilijk de business case voor waterstof elektrolyse is. Zelfs als de stroomprijs daalt tot gemiddeld (!) 5 euro per MWh en de kostprijs van de elektrolyser daalt met een factor 4 is er nog geen positieve NPV. Hiervoor zal in elk geval de prijs die voor de geleverde elektriciteit wordt ontvangen substantieel hoger moeten worden dan €0,30 /kWh.

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Festival- en evenementen business model 3**  
Alle bedragen in duizenden euro's

		Gemiddelde elektriciteitsprijs (€ / MWh)					
		5	10	20	30	40	50
Capex / kW electrolyzer	200	-4.982	-5.398	-6.229	-7.060	-7.891	-8.722
	300	-5.185	-5.601	-6.432	-7.262	-8.093	-8.924
	400	-5.388	-5.803	-6.634	-7.465	-8.296	-9.127
	600	-5.794	-6.209	-7.040	-7.871	-8.702	-9.533
	800	-6.199	-6.615	-7.446	-8.277	-9.108	-9.938

**Sensitiviteitsanalyse van de NPV - Festival- en evenementen business model 3**  
Alle bedragen in duizenden euro's

		Verkoopprijs elektriciteit in € per kWh					
		0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
Inkooprij per kWh	0,010	-6.615	-5.476	-4.338	-3.283	-2.353	-1.424
	0,020	-7.446	-6.307	-5.169	-4.030	-3.032	-2.102
	0,030	-8.277	-7.138	-6.000	-4.861	-3.723	-2.781
	0,040	-9.108	-7.969	-6.831	-5.692	-4.553	-3.459
	0,050	-9.938	-8.800	-7.661	-6.523	-5.384	-4.246
	0,060	-10.769	-9.631	-8.493	-7.354	-6.215	-5.097

## 6. Discussie

### **Business case**

De berekende NPV voor alle drie de businessmodellen is negatief. Zonder wijziging in wet- of regelgeving of subsidie om de onrendabele top te compenseren, lijkt er geen positieve business case mogelijk.

We zien 2 mogelijkheden waardoor dit kan veranderen:

1. als de onrendabele top gesubsidieerd kan worden, bijvoorbeeld via de SDE++ of DEI++ regelingen.
2. wanneer er wet- en regelgeving komt die de lokale uitstoot (emissies, geluid) van diesel aggregaten verbieden. Dit kan op nationaal, regio of gemeentelijk niveau. Een voorbeeld is als de gemeente Amsterdam de emissieregels voor zee cruiseschepen aanscherpt waardoor er kansen voor walstroom uit waterstof kunnen ontstaan.

Een andere mogelijke drijfveer voor waterstof-toepassingen is als er hoge eisen worden gesteld door de eindgebruiker, bijvoorbeeld emissie-eisen (geluid, roet, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>) voor bouwplaatsen. Hoewel een aantal eindgebruikers dit belangrijk (zeggen te) vinden, is het onzeker of er een bereidheid is bij deze partijen om een aanzienlijk hogere prijs hiervoor te betalen.

### **Use cases**

De meest aantrekkelijke use case is die van walstroom, gevolgd door de use case voor festivalterreinen. Voor bouwlocaties is de use case voorsnog het minst aantrekkelijk, met name door de lage benutting van aggregaten (50 uur per week). Een belangrijke uitdaging bij het samenstellen van een multi-inzetbare vloot van brandstofcelaggregaten is de grote verscheidenheid aan gevraagde vermogens.

### **Business model**

Wij schatten in dat businessmodel 1 het meeste kans maakt, waarbij de investeerder alleen investeert in de waterstofaggregaat en waterstof inkoop van een derde partij. De NPV heeft ongeveer dezelfde orde grootte als van businessmodel 2 waarbij de investeerder zowel investeert in de waterstofaggregaat als ook de waterstoflevering verzorgt. Het voordeel van businessmodel 1 is dat er meer focus mogelijk is (geen distributieactiviteiten) en de investeringsbehoefte lager is, waardoor het geheel eenvoudiger is om te financieren. Dit betekent wel dat de keten zich moet organiseren om het totale project mogelijk te maken. Businessmodel 3, waarbij de gehele keten inclusief waterstofproductie via elektrolyse moet worden gemanaged is voorsnog niet haalbaar vanwege de hoge kosten van de elektrolyser.

### **Substituerisico**

De totale investeringen die nodig zijn voor de use case "walstroom" (€15 miljoen) zijn substantieel hoger dan de kosten voor het realiseren van een walstroominstallatie en netaansluiting op de

passenger terminal (circa € 1,8 miljoen)<sup>11</sup>. Dit vormt een risico voor de investeerder, indien toch besloten zou worden tot netverzwaring waardoor de aanvankelijk off-grid locatie toch uiteindelijk een on-grid locatie wordt. Dit risico is enigszins te mitigeren door een portfolio van projecten te ontwikkelen.

### **Hogere kosten**

Walstroom verhoogt de kosten van rederijen. Op dit moment wekken zeecruiseschepen hun eigen stroom op met diesel en heavy fuel oil tegen een kostprijs van minder dan 0,05 €/kWh. Deze brandstoffen zijn bovendien niet fiscaal belast. Verplichten van walstroom kan ertoe leiden dat cruiseschepen uitwijken naar andere havens. De recente verhoging van de toeristenbelasting in Amsterdam met 8 euro heeft ertoe geleid dat diverse cruiseschepen voortaan op Rotterdam varen. Het verdient daarom aanbeveling om regelgeving in te voeren die voor alle havens in Nederland en omliggende landen geldt, zodat een gelijk speelveld behouden blijft.

### **Overige aandachtspunten**

De energieconsumptie van cruiseschepen is onzeker. Wij hebben gerekend met 6 MW vanaf het moment van aankomst tot en met het moment van vertrek. Het piekvermogen dat geleverd kan worden is 7,5 MW.

Het aanleggen van een walstroom aansluiting in een cruiseschip kost naar schatting tussen 0,75 en 1,25 miljoen euro. Het is onduidelijk hoeveel schepen die Amsterdam aandoen hier al over beschikken. Deze kosten zijn niet meegenomen.

Het is aan te raden om te onderzoeken in hoeverre zeecruiseschepen die Amsterdam aandoen al over een walstroomaansluiting beschikken en welke rederijen van plan zijn een walstroomaansluiting bij hun zeecruiseschepen te realiseren.

### **Wet- en regelgeving**

Uit gesprekken die wij hebben gevoerd met de milieu en omgevingsdienst Haaglanden en met de omgevingsdienst in Amsterdam concluderen wij dat er nog weinig bekend is over welke normen en regels van toepassing zijn op brandstofcelaggregaten en waterstofopslag binnen de gebouwde omgeving. Er zijn diverse normen<sup>12</sup> opgesteld met betrekking tot waterstoftankstations, maar het is niet duidelijk in hoeverre die ook van toepassing zijn op aggregaten en mobiele opslag.

Bredenoord en het bedrijf Green Events hebben beide praktijkervaring opgedaan met kleinschalige brandstofcelaggregaten. Zij wijzen erop dat onduidelijkheid in wet- en regelgeving een belangrijk risico oplevert.

---

<sup>11</sup> <https://docplayer.nl/1152606-Haalbaarheidsonderzoek-walstroom-amsterdam-elektrotechnisch-en-financieel-haalbaarheidsonderzoek-voor-de-riviercruise-en-zeecruise-terminals.html>

<sup>12</sup> Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen 35: versie 1.0 (april 2015), RIVM de memo Risico- en effectafstanden waterstof-tankstations d.d. 3 oktober 2016, kenmerk 20160149 VLH HAS/Sta/sij,,





## 7. Conclusie en aanbevelingen

Het beoogde resultaat van het project was “het verkrijgen van een verbeterd inzicht in de haalbaarheid van het gebruik van waterstof in off-grid toepassingen”. Dit resultaat is behaald: de drie meest veelbelovende use cases zijn grondig geanalyseerd en we hebben conclusies kunnen trekken met betrekking tot de haalbaarheid, waarbij de toepassing voor walstroom door ons als meest veelbelovend wordt gezien.

Op dit moment kan nog geen solide business case gemaakt worden, waardoor deelnemers van het consortium vooralsnog niet over kunnen gaan tot het bouwen van een installatie die op rental basis beschikbaar kan worden gesteld aan klanten. Er is nog een aanzienlijke onrendabele top zolang de kosten van waterstof en de brandstofcel-aggregaat nog hoog zijn. Toepassing in deze sectoren kan alleen plaats vinden als de onrendabele top wordt afgedekt, bijvoorbeeld via de SDE++ en DEI++ regelingen.

### **Knelpunten**

Het belangrijkste knelpunt dat we hebben geconstateerd is moeilijk op te lossen: de inzet van waterstof voor het leveren van elektriciteit is duur en de huidige marktprijzen bij voor offgrid toepassingen zijn weliswaar substantieel hoger dan de on-grid elektriciteitsprijs, maar niet hoog genoeg om inzet van waterstofaggregaten rendabel te krijgen.

De conclusie is dat van alle onderzochte use cases voor het gebruik van waterstof in off-grid toepassingen, de use case “walstroom” het meest aantrekkelijk is. Echter, de investeringskosten van €15 mln zijn substantieel hoger dan het realiseren van een walstroominstallatie en netaansluiting op de passenger terminal (circa € 1,8 miljoen). Derhalve zal deze toepassing alleen kunnen slagen indien er voldoende zekerheid kan worden geboden aan de investeerder dat er op middellange termijn geen netaansluiting zal komen. Een andere voorwaarde is dat er regelgeving komt vanuit de gemeente Amsterdam die het niet langer mogelijk maken voor cruiseschepen om hun eigen scheepsmotoren te gebruiken.

### **Aanbevelingen**

Onze aanbeveling is om de mogelijkheid voor walstroomtoepassingen op basis van waterstof concreet te onderzoeken met de havenbedrijven Amsterdam, Rotterdam en Groningen (samen met de andere WaddenzeeHavens). Het doel zou dan moeten zijn om een project te definiëren om ook daadwerkelijk een mobiele brandstofcelaggregaat te gaan bouwen. Het is duidelijk dat hier sprake zal zijn van een significante onrendabele top, waardoor er aanspraak gemaakt zal worden op subsidie-mogelijkheden zoals de SDE++ en DEI++.

## 8. Bijdrage aan doelstellingen van regeling

Dit project heeft bij gedragen aan de doelstellingen van de Topsector Energiestudies met name de programmalijnen waterstof (onderdeel van de TKI Nieuw Gas) doordat er gekeken is naar nieuwe toepassingen en processen gebaseerd op waterstof.

Ook was voorzien om een bijdrage te leveren aan het programma systeemintegratie door via de flexibele inzet van elektrolyzers op momenten dat er veel aanbod is van wind- en zonne-energie waterstof te produceren. Deze bijdrage is minder goed uit de verf gekomen in dit project omdat de kostprijs van groene waterstof gemaakt via elektrolyse veel hoger ligt, waardoor al vroeg in het project bleek dat dit niet tot een economisch rendabele business case zou leiden. De kosten van elektrolyser technologie dient fors te worden verlaagd om groene waterstof te kunnen gebruiken voor deze toepassingen.

Als spin-off zien we met name mogelijkheden voor walstroomtoepassingen op basis van waterstof. We willen concreet onderzoeken met de havenbedrijven Amsterdam, Rotterdam en Groningen (samen met de andere WaddenzeeHavens). Het doel zou dan moeten zijn om een project te definiëren om ook daadwerkelijk een mobiele brandstofcelaggregaat te gaan bouwen.