

# Emissieneutraal varen in de Rotterdamse haven voor 2050

Een kijk op de brandstofcel als mogelijke oplossing

## Onderzoeksrapport



Auteur: D.E. Blajic-Kik

Studiejaar/ semester: 4 afstudeerstage

Opleiding/ groep: Scheepswerktuigkundige

Onderwijsinstelling: HZ University of applied sciences

Course: CU12197V8-2019

Begeleidend docent: J.A. Ooms-de Waal; Drs. D. Heertjes

Plaats van uitgave: Vlissingen

Datum: 1 Juni 2020

Versie nummer: 1.0

# Emissieneutraal varen in de Rotterdamse haven voor 2050

Een kijk op de brandstofcel als mogelijke oplossing

ONDERZOEKSRAPPORT

Auteur: D.E Blajic-Kik

Studentnummer: 73035

Studiejaar: 4

Semester: afstudeerstage

Studieonderdeel: Onderzoeksrapport

Begeleidend docent: J.A. Ooms-de Waal; Drs. D. Heertjes

Plaats van uitgave: Vlissingen

Datum: 1 Juni 2020

Versie: 1.0

Afbeelding voorpagina: <https://rotterdam.info/locaties/rdm/>

## Samenvatting

Volgens een nieuw akkoord dient de Rotterdamse haven een emissievrije haven te zijn in het jaar 2050. Dit betekent dat alle scheepvaart die zich binnen het havengebied bevindt hieraan moet voldoen. Om aan deze nieuwe wetgeving te voldoen worden brandstofcellen door de opdrachtgever gezien als een mogelijk geschikt energiesysteem. In dit onderzoek is de brandstofcel vergeleken met twee andere energiesystemen, namelijk het gebruik van diesel en energievoorziening door middel van accu's. Het onderzoek heeft als doel het achterhalen of de huidige ontwikkelingen van de brandstofcel genoeg zijn om deze in te voeren als energiesysteem voor bestaande kleine schepen met als vaargebied de Rotterdamse haven.

De hoofdvraag die voor dit onderzoek centraal stond: In hoeverre is het zinvol om een brandstofcel in te zetten in het energiesysteem voor een klein vaartuig dat opereert binnen een havengebied?

De aanleiding voor dit onderzoek was voornamelijk gericht op het implementeren van een energiesysteem op de zogeheten Aquabots. Om een antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag is een Multi Criteria Analyse (MCA) opgesteld. Door een beoordelingsschaal te ontwikkelen van verschillende belangrijke criteria bij het gebruik van energiesystemen, is inzichtelijk gemaakt welk systeem het beste scenario kan hebben. De wegingscriteria zijn tot stand gekomen aan de hand van interviews en enquêtes met diverse experts. De uitkomst is met de Regisseur Next Port Industrie van het Centre of Expertise besproken. Uit de resultaten van de MCA is gebleken dat de brandstofcel de hoogste score heeft behaald. Hiermee is in dit onderzoek aangetoond dat de brandstofcel gezien kan worden als geschikt energiesysteem om emissieloos te varen in het Rotterdamse.

Op basis hiervan wordt aanbevolen om een dergelijk brandstofcelsysteem in te voeren en deze in de praktijk te testen. Er zijn echter meerdere energiedragers in ontwikkeling. Er wordt aangeraden dit te monitoren en een vervolgonderzoek uit te voeren naar mogelijke andere alternatieve energiedragers, of om een nader onderzoek in te stellen naar de prestaties van een hybride systeem. Gezien de scope en de doorlooptijd van dit onderzoek is dit in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

## Abstract

According to a new agreement, the port of Rotterdam must be an emission-free port in the year 2050. This means that all shipping within the port area must comply with this. In order to comply with this new legislation, fuel cells are seen by the client as a possible suitable energy system. In this study, the fuel cell has been compared to two other energy systems, namely the use of diesel and energy supply by means of batteries. The aim of the research is to find out whether the current developments of the fuel cell are enough to introduce them as an energy system for existing small ships with the Rotterdam port as sailing area.

The main question that was central to this research: To what extent does it make sense to use a fuel cell in the energy system for a small vessel operating within a port area?

The reason for this research was mainly aimed at implementing an energy system on the so-called Aquabots. A Multi Criteria Analysis (MCA) has been drawn up to answer the main question. By developing an assessment scale of several important criteria when using energy systems, it has been made clear which system can have the best scenario. The weighting criteria were established based on interviews and surveys with various experts. The outcome was discussed with the Director Next Port Industry of the Center of Expertise. The results of the MCA showed that the fuel cell achieved the highest score. This has shown in this study that the fuel cell can be seen as a suitable energy system for sailing without emissions in Rotterdam.

Based on this, it is recommended to introduce such a fuel cell system and test it in practice. However, several energy carriers are under development. It is recommended to monitor this to conduct a follow-up study of possible other alternative energy carriers or to conduct a further study into the performance of a hybrid system. Given the scope and lead time of this study, this has not been considered in this study.

## Voorwoord

Dit is mijn onderzoeksrapport over “Emissieneutraal varen in de Rotterdamse haven voor 2050”. Dit onderzoek is voor een deel uitgevoerd in het Innovation Dock van RDM en van Centre of Expertise te Rotterdam. Gedurende het schrijven van dit onderzoek hebben we te maken gekregen met een epidemie die de hele samenleving heeft beïnvloed. Door de covid-19 was ik verplicht om een groot deel van mijn onderzoek thuis uit te voeren. Dit heeft voor een paar uitdagingen gezorgd omtrent de uitvoerende fase van mijn onderzoek. Een paar geplande interviews gingen niet door, het overleggen met school en met stagebedrijf kon alleen maar online gebeuren. Dat heeft ertoe geleid dat mijn hele onderzoek toch wel wat anders is gelopen dan het initieel de bedoeling was. Het deel waar ik wel bij het bedrijf te werk kon was voor mij een heel mooie ervaring om met een thema bezig te zijn dat zeer relevant is voor de transitie naar een duurzame brandstofeconomie. Ik ben Peter Verheijen zeer dankbaar voor de geboden kans om aan dit onderzoek te mogen werken. Ik zou ook het team, werkzaam bij RDM, willen bedanken voor alle steun en vrijheid die zij mij continu geboden hebben. Bedankt aan de hele groep werkzaam in het aqualab, want zonder jullie was het niet geworden wat het nu is. Het was voor mij een hele ervaring om zo nauw samen te mogen werken met een groep professionals die hun vak echt leuk vinden en beheersen. Ik heb heel veel over mezelf geleerd en ben een stuk meer geïnformeerd over waterstof als energiedrager. Ik hoop echt dat ik met dit verslag een bijdrage kan leveren aan de transitie naar een emissieloze toekomst.

*Daniel Elias Blajic-Kik*

*Vlissingen, 1 Juni 2020*

## Inhoudsopgave

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 1. Inleiding.....                                         | 1  |
| 2. Theoretisch kader .....                                | 3  |
| 2.1 Autoriteiten.....                                     | 4  |
| 2.2 Energietoeleveranciers .....                          | 5  |
| 2.3 Veiligheid.....                                       | 6  |
| 2.4 Energiesysteem .....                                  | 7  |
| 2.5 Beweging.....                                         | 8  |
| 2.6 Payload.....                                          | 9  |
| 2.7 Ondersteunende systemen.....                          | 10 |
| 2.8 Hoe ziet het financiële aspect er mogelijk uit? ..... | 13 |
| 2.9 Conceptueel model .....                               | 16 |
| 3. Methode.....                                           | 17 |
| 4. Resultaten .....                                       | 19 |
| 5. Discussie .....                                        | 23 |
| 6. Conclusie & aanbevelingen .....                        | 25 |
| Bronnenlijst.....                                         | 27 |
| Bijlage 1: Interviewhulp .....                            | 32 |
| Bijlage 2: Extra informatie.....                          | 37 |
| Energiedragers .....                                      | 37 |
| Werking principe van een brandstofcel .....               | 38 |
| De onderlinge voor- en nadelen van brandstofcellen .....  | 40 |
| Hoe is waterstof duurzaam als energiedrager? .....        | 42 |
| Opslag .....                                              | 46 |
| Externe factoren die van invloed kunnen zijn?.....        | 50 |
| Energiesystemen .....                                     | 52 |
| Ontwerp aspecten.....                                     | 54 |

## Begrippen en definities

Binnen dit onderzoek is een klein vaartuig gedefinieerd als schepen die kleiner zijn dan 10 meter.

Binnen dit onderzoek zullen diesel en benzine onder fossiele brandstoffen worden geclassificeerd.

Binnen dit onderzoek zullen kengetallen beschreven worden als combinaties van fysische grootheden om bepaalde vergelijkingen mogelijk te maken.

|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arbeid               | : Arbeid wordt tegenwoordig meestal 'energie' genoemd                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Aquabot              | : Aquabots zijn autonoom varende, multifunctionele drones voor op en onder water                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| CESNI                | : Europees Comité voor de opstelling van standaarden voor de binnenvaart                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Composiet            | : Een composiet is een materiaal dat is opgebouwd uit verschillende componenten. Vaak worden hiermee vezelversterkte kunststoffen bedoeld.                                                                                                                                                                                                                     |
| CO2-neutraal         | : CO2-neutraal betekent dat er per saldo geen sprake is van CO2-uitstoot. CO2 oftewel koolstofdioxide is een gas dat vrijkomt bij de verbranding van fossiele brandstoffen zoals benzine, aardgas en kolen.                                                                                                                                                    |
| Demineraliseren      | : Het verwijderen van mineralen, meestal uit water.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Desorptietemperatuur | : De temperatuur waarbij gas vrijkomt uit het opslagmedium.                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Dieptemeting         | : Meting tot het bepalen van de diepte van het (vaar)water.                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Efficiënt            | : Efficiënt betekent ook wel doelmatig. Het betekent dat er met zo min mogelijk inspanning zo veel mogelijk resultaat behaald wordt.                                                                                                                                                                                                                           |
| Elektrolyse          | : Een chemische reactie die teweeg wordt gebracht door een elektrische stroom.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Emissie              | : Uitstoot van uitlaatgassen uit de motoren van vliegtuigen, auto's etc. en de schoorstenen van huishoudens, fabrieken en elektriciteitscentrales.                                                                                                                                                                                                             |
| Energy as service    | : In zijn basisvorm is "energie als een service" het idee dat een extern servicebedrijf de toekomstige energiekosten van een gebouw garandeert. Als het gebouw meer energie verbruikt dan voorspeld, is het servicebedrijf verantwoordelijk voor het verschil. Maar als het gebouw minder energie verbruikt dan gecontracteerd, profiteert het servicebedrijf. |
| ES-TRIN              | : Europese standaard tot vaststelling van de technische voorschriften voor binnenschepen                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Fysisch-chemische    | : De studie van de relatie tussen de fysische en chemische eigenschappen van stoffen.                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Gepatenteerd         | : Door middel van een octrooi of patent beschermd zijn van een uitvinding.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Halfgeleidende materialen | : Speciale materialen die elektronen geleiden wanneer licht wordt geabsorbeerd.                                                                                                                                                                                                                      |
| Innovatie                 | : Het toepassen van nieuwe technologieën in producten, diensten en processen, of het ontwikkelen van nieuwe producten, diensten en processen.                                                                                                                                                        |
| Koppel                    | : Een maat voor het rotatie-effect van een kracht. De SI-eenheid voor koppel is de newtonmeter (Nm).                                                                                                                                                                                                 |
| Molecuul                  | : Ook wel molecule is het kleinste deeltje van een moleculaire stof dat nog de chemische eigenschappen van die stof bezit. Wanneer een molecuul opgedeeld zou worden in nog kleinere deeltjes zouden de chemische eigenschappen veranderen.                                                          |
| Rendement                 | : De verhouding van het nuttig vermogen en het toegevoegd vermogen. Je kunt ook het rendement met behulp van de nuttige energie en de toegevoerde energie bepalen.                                                                                                                                   |
| Restricties               | : Beperkingen.                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Statische belasting       | : Zijn belastingen die continu op het motorblok werken als deze niet in beweging is. Hierbij kan gedacht worden aan een waterkolom dat op elk gegeven ogenblik beïnvloed wordt door de zwaartekracht.                                                                                                |
| Thermo-mechanische        | : Betrekking hebbend op de verandering van mechanische eigenschappen door de temperatuur.                                                                                                                                                                                                            |
| Vaartuig                  | : Een voorwerp, dat bestemd of ingericht is, voor het vervoer over water, van personen en/of goederen, danwel een drijvend werktuig of woonschip.                                                                                                                                                    |
| Varen                     | : Met een vaartuig over het water voortbewegen.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Voortstuwing              | : Het voortbewegen van een vaartuig door mechanische energie om te zetten in arbeid.                                                                                                                                                                                                                 |
| Waterkwaliteitsmeting     | : De kwaliteit van het oppervlaktewater wordt zowel bepaald door de samenstelling van het water (fysisch en chemisch) als door welke planten en dieren in het water leven (biologie). Om te kunnen bepalen wat de waterkwaliteit is, laat het hoogheemraadschap hier regelmatig onderzoek naar doen. |
| Vermogen                  | : Het vermogen van een apparaat is de energie die dat apparaat per seconde omzet.<br>Het symbool van vermogen is P (van Power). De eenheid van vermogen is Watt afkorting W.                                                                                                                         |

## 1. Inleiding

“RDM Centre of Expertise (RDM CoE) faciliteert samenwerkingsprojecten tussen onderwijs, onderzoek en bedrijven; creëert op RDM Rotterdam een moderne leerwerkomgeving en organiseert techniekpromotie-events. De RDM monitort de innovatieontwikkelingen in onder andere de scheepvaart en levert hierin mede een bijdrage door middel van praktijkgericht onderzoek. De energietransitie in de Rotterdamse haven is een werkthema bij RDM. De doelstelling is dat de haven zoveel mogelijk CO<sub>2</sub>-neutraal is in 2050 in overeenstemming met het klimaatakkoord in Parijs. Voor de scheepvaart geldt dat, om deze normen te halen, onderzoek nodig is naar alternatieve vormen van de energievoorziening om de emissie te verminderen” (Rotterdam H. , Innovatie voor haven en stad, 2020).

Tijdens het vooronderzoek bleek dat een groep studenten parallel aan dit onderzoek een experiment doet naar een op waterstof aangedreven Aquabot (klein zelfstandig varende vaartuigje op schaal). Er is eerder een experiment uitgevoerd waarbij een kleine modelboot van een Aquabot met een brandstofcelaandrijving is gebouwd. Beide onderzoeken worden onafhankelijk van elkaar gedaan en hierbij worden verschillende aspecten van de Aquabot met een brandstofcel bekeken.

De doelstelling van het reeds verrichte onderzoek was om aan te tonen of de huidige ontwikkelingen van brandstofcellen toe te passen zijn op een bestaand model (klein) vaartuig met een vaargebied in de Rotterdamse haven. Er is in dit onderzoek een vergelijking gemaakt tussen waterstof, dieselolie en batterijvoeding als energiedrager; toepassing van windenergie is buiten beschouwing gelaten. De energievoorziening van batterijvoeding is op een brandstofcel gebaseerd; dit heeft de mogelijkheid geboden om (deels) conventionele oplossingen toe te passen. Hierdoor is een vergelijking gemaakt tussen één of meer (nog te kiezen) bestaande vaartuigen.

De onderzoeksvraag luidt: In hoeverre is het zinvol om een brandstofcel in te zetten in het energiesysteem voor een klein vaartuig dat opereert binnen een havengebied?

Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn de volgende deelvragen opgesteld:

- Welke van de verschillende energiedragers (energiesystemen) die momenteel beschikbaar zijn voor een brandstofcel zijn geschikt voor toepassing op een klein vaartuig?
- Wat zijn de gevolgen van toepassing van een brandstofcel op een klein vaartuig voorzien van een elektrische aandrijving ten opzichte van toepassing van accu's?
- Welke effecten heeft elektrische voortstuwing op het scheepsontwerp van een klein vaartuig (werkende in het havengebied) met brandstofcel als belangrijkste energieopwekker?

Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van de mixed method, dit betekent dat zowel kwalitatieve als kwantitatieve aspecten bekeken zijn. Doordat de toepassingsmogelijkheden van de verbrandingsmotor en de elektrische motor al eerder onderzocht zijn, zijn deze weliswaar deels meegenomen in het onderzoek, maar zonder te diep in te gaan op de achterliggende theorie.



Om erachter te komen wat de mogelijkheden zijn voor brandstofcellen, zijn er interviews gehouden met een producent van brandstofcellen, en met professionals in het beroepsveld die hun inzichten hebben gedeeld over brandstofcellen in de praktijk. Gedurende het verloop van het project zijn er berekeningen gedaan om de benodigde parameters te kunnen vergelijken, hierbij zijn de eventuele relevante gegevens van de verschillende onderdelen geanalyseerd en meegenomen. Literatuuronderzoek is uitgevoerd met behulp van de HZ-databank, beschikbare onderzoekdocumenten en internet. De beschikbare data van de interviews en enquêtes zijn als betrouwbaar beschouwd.

Om een overzicht te geven van de te behandelen stof wordt, in hoofdstuk 2, achtergrondinformatie verschaft die relevant is bij het beantwoorden van de hoofd- en deelvragen, gevolgd door het conceptueel model. Hoofdstuk 3 bespreekt de onderzoeksmethode die voor het veldonderzoek is gebruikt. Aandacht wordt besteed aan bijvoorbeeld de methode voor datacollectie, de steekproef, de populatie en de methode voor dataverwerking. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van het onderzoek besproken door gebruik te maken van een schematische weergave en een MCA-tabel. De discussie, waarin er op kritische wijze naar het hele onderzoek gekeken wordt, komt in hoofdstuk 5 aan de orde. Tot slot bevat hoofdstuk 6 de conclusies van het onderzoek met aanbevelingen van de onderzoeker.

## 2. Theoretisch kader

De belangrijkste theorieën die verder uitgewerkt worden in dit kader zijn terug te zien in de functionele decompositie (figuur 1). De functionele decompositie dient om de samenhang tussen de verschillende onderdelen te benadrukken, terwijl het systeem geanalyseerd wordt. Hiermee wordt relevante informatie vergeleken om uiteindelijk tot gestructureerde conclusies te komen. Om de overzichtelijkheid van dit hoofdstuk te bewaren wordt de decompositie verder in blokken verdeeld over de paragrafen. Dit begint met een Aquabot en de interacties met zijn gebruiker, en de operationele condities hiervoor. Die operationele condities vallen uiteen in autoriteiten, energietoeleveranciers en de veiligheid. De Aquabot kan verder opgedeeld worden in energiesystemen, beweging, payload en ondersteunende systemen. Tot slot worden de mogelijke financiële aspecten bekeken. In dit onderzoek zijn echter enkele blokken die niet meegenomen zijn, omdat deze zich buiten de scope van het onderzoek bevinden. Dit zijn monitoring and control, ICT, sensor array, distributie en besturing. Alle informatie die niet meteen betrekking heeft op het beantwoorden van de hoofdvraag maar wel relevant is, zal meegeleverd worden in bijlage 2.

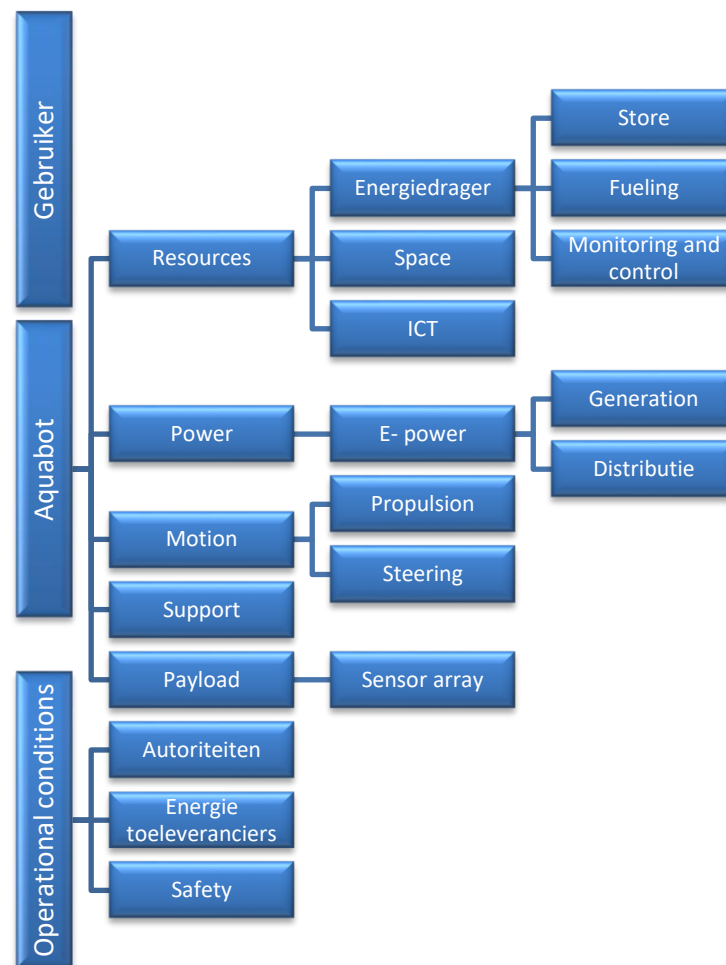


Fig. 1. Functionele decompositie

## 2.1 Autoriteiten

Voor de afkadering van het onderzoek is het van belang geweest allereerst te kijken naar de veranderende wetgeving omtrent luchtverontreiniging, omdat deze de relevantie van waterstof als energiedrager verder benadrukt. Verder is tabel 1 opgesteld om zodoende een vergelijking te kunnen maken tussen de veiligheidsaspecten van dieselolie en waterstof.

Het International Maritime Organization (IMO) is het onderdeel van de Verenigde Naties dat zich bezighoudt met de verantwoordelijkheid voor wet- en regelgeving met betrekking tot de scheepvaart. De wetgeving omtrent uitlaatgassen is sinds 1 januari 2020 aangescherpt naar een maximaal zwavelgehalte van 0,5% naar 3,5%. De reden dat de IMO hiervoor heeft gekozen is om de luchtverontreiniging veroorzaakt door schepen terug te dringen en hierdoor het milieu te beschermen (Ilent, Eisen aan scheepsbrandstof, 2020).

Voor dit onderdeel is gebruik gemaakt van bronnen die refereren aan de Europese overeenkomst voor het internationaal vervoer van gevaarlijke goederen over de binnenwateren (ADN), en voor vervoer over de weg (ADR) (Oliecentrale, 2009) (Jewa-gas, 2020) (Leren van de ADR gevarenklassen, 2020). Om de vergelijking van dieselolie met waterstof overzichtelijk te maken is ervoor gekozen om deze twee stoffen met enkele onderdelen in tabel 1 weer te geven. Het ADR bevat onder andere informatie van waterstof in gasvorm. Voor de onderdelen die hierna benoemd worden zijn de definities gehaald uit (Encyclopedie, 2020). Van belang is om te melden dat volgens (Ilent, Vrijstellingen ADR, 2017) veelal een vrijstelling verleend wordt aan de opgelegde eisen als het gaat om kleine hoeveelheden. Er is contact via de telefoon en e-mail opgenomen met Inspectie Leefomgeving en Transport (IlenT) om erachter te komen welke hoeveelheden hiervoor vrijgesteld worden. Het is gebleken dat het meenemen van waterstof als brandstof vrijgesteld is van de wet- en regelgeving zolang het vaartuig een lengte heeft van minder dan 20 meter en hierdoor niet valt onder de certificatieplicht. De voorschriften van het ADN zijn niet van toepassing op stoffen die aan boord worden meegevoerd in de verpakking, houder of tanks voor de aandrijving van schepen of vervoerde voertuigen, wagens of niet voor de weg bestemde mobiele machines.

Tabel 1 Vergelijking Waterstof en Dieselolie

| Onderdeel               | Waterstof                                                                           | Dieselolie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VN Nummer               | 1049                                                                                | 1202                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Chemische Samenstelling | H <sub>2</sub>                                                                      | C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Gevarenklasse           | 2                                                                                   | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Gevaren aanduiding      | -Zeer licht ontvlambaar gas<br>-Bevat gas onder druk; kan ontploffen bij verwarming | - Ontvlambare vloeistof en damp<br>- Kan dodelijk zijn bij inslikken<br>- Veroorzaakt huidirritatie<br>- Schadelijk bij inademing<br>- Verdacht van het veroorzaken van kanker<br>- Kan schade aan organen (lever) veroorzaken bij langdurige of herhaalde blootstelling<br>- Giftig voor in het water levende organismen, met langdurige gevolgen |

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Veiligheidsaanbevelingen</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwijderd houden van warmte, hete oppervlakken, vonken, open vuur en andere ontstekingsbronnen.</li> <li>- Niet roken</li> <li>- Brand door lekkend gas: niet blussen, tenzij het lek veilig gedicht kan worden</li> <li>- In geval van lekkage alle ontstekingsbronnen wegnemen</li> <li>- Tegen zonlicht beschermen.</li> <li>- Op een goed geventileerde plaats bewaren</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwijderd houden van warmte, hete oppervlakken, vonken, open vuur en andere ontstekingsbronnen</li> <li>- Niet roken</li> <li>- Voorkom inademen van stof/rook/gas/nevel/dampen/sproeinevel</li> <li>- Voorkom lozing in het milieu</li> <li>- Beschermende handschoenen/ beschermende kleding/ oogbescherming/ gelaatsbescherming dragen</li> </ul> |
| <b>Geschikte blusmiddelen</b>      | Waterstraal; Waternevel; Droog bluspoeder                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Alcoholbestendig schuim; Koolstofdioxide (CO <sub>2</sub> ); Droogpoeder                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Milieu voorzorgsmaatregelen</b> | Probeer de uitstroom te stoppen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Voorkom dat product in riolering komt. Voorkom verder lekken en morsen als dit veilig is. Als het product rivieren, meren of riolen vervuult de respectievelijke autoriteiten op de hoogte stellen                                                                                                                                                                                             |
| <b>Kleur/ Geur</b>                 | Kleurloos en geurloos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Bleekgeel/ mild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Vlampunt</b>                    | Niet van toepassing voor gassen en gasmengsels                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Typische waarde is 70°C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Kookpunt</b>                    | -253°C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 170 - 390 °C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Kritische temperatuur</b>       | -240°C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | geen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Dichtheid</b>                   | 0,7 gram/cm <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,8 gram/cm <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

## 2.2 Energietoeleveranciers

In deze paragraaf wordt gekeken naar de beschikbare mogelijkheden om waterstof te kunnen tanken die nu en in de nabije toekomst bestaan. Voor de afkadering van het onderzoek is er alleen gekeken naar duurzaam geproduceerde waterstof. Duurzaam geproduceerde waterstof is waterstof die geproduceerd is door middel van milieuvriendelijke bronnen, zoals bijvoorbeeld zonnecellen en windmolens. De consequentie voor het kiezen van deze methode is dat er op het ogenblik alleen beperkte tankmogelijkheden beschikbaar zijn, en dat het een tijd zal duren voordat dit verbetert.

De mogelijkheden voor waterstof tanken in Nederland zijn vooralsnog beperkt. Zo geeft (Keunen, 2020) aan dat er op het moment van dit onderzoek maar één tankstation bestaat waar het mogelijk is om waterstof te tanken in de regio Rotterdam, namelijk in Rhon. Om het tanken van waterstof een aantrekkelijke keuze te maken is het echter wel nodig om een (drijvend) bunkerstation in de haven te bouwen.

Er zijn volgens (Showcase, 2019) echter wel plannen om in de komende drie jaar voorbereidingen te treffen om Europa's grootste groene waterstoffabriek neer te zetten in de Rotterdamse haven. Deze fabriek zal waterstof produceren door middel van elektrolyse, dit wordt verder uitgelegd in

hoofdstuk 2.7. Het is de bedoeling om met deze fabriek jaarlijks 45.000 ton aan groene waterstof te produceren.

## 2.3 Veiligheid

Het veiligheidsaspect en de risicoperceptie van waterstof kunnen gezien worden als onderwerpen die van groot belang zijn. Volgens een onderzoek geschreven door (Hoogenraad, 2004) moet de veiligheidsstandaard van waterstof voor transporttoepassingen gelijkwaardig zijn aan die van huidige brandstoffen. Het voornaamste gevaar bij energiedragers zoals waterstof blijkt brand- en explosiegevaar te zijn. Waterstof beschikt over meerdere eigenschappen die andere risico's met zich meebrengen ten opzichte van conventionele energiedragers, echter kunnen deze risico's tot een minimum beperkt worden door het invoeren van effectieve veiligheidsmaatregelen en voorschriften. Waterstof blijkt een licht gas te zijn dat zich snel verspreid en hierdoor een aantal consequenties met zich meebrengt ten aanzien van de veiligheid. Doordat het gas zich snel verspreidt zal het percentage waterstof in lucht waarbij explosie mogelijk is in buitenluchtsituaties minder snel bereikt worden dan bij andere gassen, het genoemde risico is dus vooral van toepassing in gesloten ruimtes. Hier kan enigszins rekening mee gehouden worden tijdens het plaatsen van de opslagtank voor de waterstof aan boord van het vaartuig. Gassen vatten vlam door een vonk of door het te verhitten tot de ontvlamtemperatuur. Waterstof heeft relatief weinig energie nodig om te ontsteken, zo is een statische vonk van de mens genoeg om voor een reactie te zorgen (dit is wel bij droge lucht, en binnen het ontstekingsbereik). Hierbij moet wel verteld worden dat het ook mogelijk is om aardgas aan te steken door middel van een statische vonk in de correcte omstandigheden. In tabel 2 is een overzicht van de eigenschappen van waterstof in vergelijking met twee andere gassen met betrekking tot veiligheid te zien. Deze zijn twee vaak voorkomende gassen die voor een voorstelbare vergelijking kunnen zorgen.

Tabel 2 eigenschappen van waterstof met betrekking tot veiligheid (Hoogenraad, 2004)

| Eigenschap                      | Eenheid            | Waterstof | Aardgas | Benzinedamp |
|---------------------------------|--------------------|-----------|---------|-------------|
| Dichtheid gerelateerd aan lucht |                    | 0,07      | 0,55    | 4,0         |
| Moleculair gewicht              | u                  | 2         | 16      | 107         |
| Diffusie coëfficiënt            | cm <sup>2</sup> /s | 0,61      | 0,16    | 0,05        |
| Explosie energie                | MJ/m <sup>3</sup>  | 9         | 32      | 407         |
| Ontvlammingsbereik              | vol%               | 4 - 75    | 5 - 15  | 1 - 8       |
| Ontstekingsbereik               | vol%               | 18 - 59   | 6 - 14  | 1 - 3       |
| Minimum ontstekingsenergie      | mJ                 | 0,02      | 0,29    | 0,24        |
| Vlamsnelheid                    | cm/s               | 346       | 43      | 42          |

Op dit moment zijn een aantal organisaties bezig om standaarden te ontwikkelen die betrekking hebben op waterstof. Deze standaardisering van waterstofgerelateerde producten en diensten kan leiden tot een vermindering van risico's. Voorwaarde is wel dat deze standaarden strikt worden nageleefd.

Uit verschillende studies blijkt dat waterstof vaak zelfs kleinere risico's met zich meebrengt in vergelijking met het gebruik van conventionele energiedragers. Deze studies benadrukken het belang van verdere onderzoeksinspanning wegens het ontbreken van specifieke, relevante gegevens



en praktijkervaring. Experts zijn het echter niet eens over de veiligheidsaspecten van een transportsysteem voor consumenten. Verder onderzoek en praktijkervaring zullen de risico's moeten verwijderen, zodat hiervoor geschikte maatregelen kunnen worden genomen.

## 2.4 Energiesysteem

Om een beeld te schetsen van de eventuele toepassing van een brandstofcel dient er een vergelijking gemaakt te worden tussen de brandstofcel en enkele alternatieve energiesystemen. In deze paragraaf zal er een nadere blik geworpen worden op drie alternatieven voor de brandstofcel om uiteindelijk te bepalen welke beschouwd kan worden als het beste alternatief om een vergelijking mee te maken. Deze alternatieven zijn namelijk: lokaal energie opwekken; accu's met elektromotor; dieselmotor. Om de voor- en nadelen per onderdeel te kunnen vergelijken zijn deze in tabel 3 weergegeven aan het einde van deze paragraaf. Voor verdere uitleg van de voor- en nadelen wordt er verwezen naar bijlage 2.

De mogelijkheid bestaat om de benodigde energie lokaal (aan de wal) te produceren door gebruik te maken van zonnepanelen. De toepassing van dergelijke panelen kan echter op verschillende manieren uitgevoerd worden. De zonnepanelen zouden als voorbeeld stationair geïnstalleerd kunnen worden, zodat deze ter plekke energie kunnen produceren om vervolgens eventueel via accu's of een opslagtank overgedragen te worden aan het vaartuig. Als ervoor gekozen wordt om door middel van accu's de energie over te dragen zal het gaan over zonne-energie omzetten naar elektrische energie. In het andere geval zal de zonne-energie omgezet worden naar waterstof in gas- of vloeibare vorm dat via een opslagtank meegenomen kan worden aan boord. Zonnepanelen hebben over het algemeen volgens (Zonnepanelen-info, 2020) enkele voor- en nadelen die in tabel 3 besproken worden.

In een vorige paragraaf is er gekeken naar accu's als mogelijke alternatieve energiedrager. Doordat accu's net zoals bij de brandstofcel niet zorgen voor schadelijke uitlaatgassen kunnen deze gezien worden als het beste alternatief om een vergelijking mee te maken.

De dieselloortstuwing wordt niet gezien als de meeste geschikte variant om een vergelijking mee te maken, doordat deze motor juist giftige gassen uitstoot. Dit motortype wordt echter wel meegenomen in de vergelijking om een beter beeld te schetsen tussen de verschillen van de drie voorstuwingtypen.

Tabel 3 Vergelijking tussen drie alternatieven

| Alternatief             | Voordelen                                                                                                                                                                                                                                      | Nadelen                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lokaal energie opwekken | <ul style="list-style-type: none"> <li>-De geproduceerde stroom is gratis</li> <li>-Milieubewust</li> <li>-Veiligheid</li> <li>-Weinig onderhoud</li> <li>-Lange levensduur</li> </ul>                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Correcte plaatsing</li> <li>-Controle en schoonmaken</li> <li>-Rendement afname</li> </ul>                                                                                                                                                          |
| Accu's met elektromotor | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Efficiënt</li> <li>-Geen giftige uitstoot</li> <li>-Werken nominale snelheid</li> <li>-Minder onderhoud</li> <li>-Minder geproduceerd geluid tijdens bedrijf</li> <li>-Hoge beschikbaarheid</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement verlies</li> <li>-Last van cavitatie</li> <li>-Bij een verschil in spanning of frequentie kans op falen systeem</li> </ul>                                                                                                                |
| Dieselmotor             | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Dieselmotoren zijn het meest efficiënt bij ontwerpsnelheid</li> <li>-Heeft lage omzettingverliezen</li> <li>-Lage inkoopkosten</li> </ul>                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Beperkte manoeuvreerbaarheid</li> <li>-Veel gebruik leidt tot veel onderhoud</li> <li>-Hoog brandstofverbruik en uitlaatgassen als onder 70% vermogen gevaren wordt</li> <li>-Lage beschikbaarheid</li> <li>-Veel geluid tijdens bedrijf</li> </ul> |

## 2.5 Beweging

In een vorige paragraaf is er gekeken naar verschillende manieren om de benodigde stroom op te wekken. Hier zal gekeken worden naar de verschillende aandrijvingen die gekoppeld kunnen worden aan de benoemde energievoorzieningen. Om een vergelijking te kunnen maken tussen verschillende mogelijke keuzes zijn twee systemen meegenomen in dit onderzoek. Het gaat hier namelijk om een dieselmotor en een elektrische aandrijving.

Om optimaal gebruik te maken van de brandstofcel zal er een combinatie gemaakt moeten worden met een elektrische aandrijving. Een elektrische aandrijving, ook wel elektromotor genoemd, kan zowel aan een batterijvoeding als aan een brandstofcel gekoppeld worden. Hierbij wordt een overzichtelijk beeld gemaakt welke elektrische aandrijving bij welke werkzaamheden past. (Kuijt, 2016) geeft aan dat elektrisch varen stil is, het stoot geen uitlaatgassen uit tijdens het varen en is hierdoor dus beter voor het milieu. Het is prettig om dus gewoon te praten met de mensen om u heen zonder uw stem te moeten verheffen. Elektrisch varen heeft minder onderhoud nodig dan een verbrandingsmotor. Een groot voordeel bij het manoeuvreren is dat de elektromotor direct koppel heeft. Tegenwoordig komen er steeds meer elektrische motoren met een groter vermogen. Voorheen was er alleen een klein vermogen van 0-4kW beschikbaar. Op het ogenblik zijn er ook grotere elektrische motoren op de markt die oplopen tot enkele MegaWatts.



De elektrische aandrijving kan onderverdeeld worden in verschillende type elektromotoren met hun eigen voor- en nadelen. In bijlage 2 zullen de verschillende elektromotoren beschreven worden volgens (Kuijt, 2016).

Een alternatieve mogelijkheid ten opzichte van de elektrische motoren is om een al dan niet stuurbare POD-motor te monteren. De POD-motor komt onder het vaartuig te hangen waardoor er ruimte bespaard kan worden om bijvoorbeeld meer sensoren te plaatsen. Waarmee wel rekening gehouden dient te worden is dat de POD de diepgang vergroot, waardoor het minder geschikt is in ondiepe wateren. Het kiezen van welke aandrijving voor het vaartuig geschikt is hangt heel erg af van het ontwerp, de technische mogelijkheden in het vaartuig en de wensen van de gebruiker af. Verder is de vraag hoeveel energie / vermogen er nodig is voor een missie van een Aquabot. Pas als dat duidelijk is, gaan de getallen die genoemd worden bij ‘Ondersteunende systemen’ waarde krijgen. Dit onderzoek gaat hier niet verder op in.

## 2.6 Payload

Voor een klein vaartuig met als vaargebied de Rotterdamse haven zijn verschillende operationele voorwaarden waar dit vaartuig aan moet kunnen voldoen. In dit onderdeel wordt gekeken naar de operationele aspecten die aan bod komen bij de Aquabots. Om de benodigde voorwaarden te onderhouden is een interview gehouden met Peter Verheijen, Regisseur next port industries. Dit interview wordt als bijlage 1 toegevoegd aan het onderzoek. Hieronder wordt gekeken naar een paar van de mogelijke voorwaarden:

De geplande werkzaamheden voor de Aquabots bestaan uit onder andere handhavings- en toezichtstaken. Hierbij moet gedacht worden aan kleine vaartuigen die ingezet worden om het vaargedrag en de snelheid van schepen in de haven te monitoren. Het wordt dan ook mogelijk om door middel van de geïnstalleerde sensoren de waterkwaliteit te meten.

Het streven is om de Aquabots zo langdurig mogelijk in te zetten. Op het moment van schrijven zijn de Aquabots voorzien van loodaccu's als energiedrager. Deze leveren een actieduur van 8 uur als er niet op vol vermogen gevaren wordt. De capaciteit daalt zodra er op vol vermogen gevaren wordt. Het streven is om voor een 24-uurs inzet te zorgen. Het idee van Peter is dat uiteindelijk de Aquabots in “swarms”, oftewel zwermen, ingezet worden en zodra de energiec capaciteit van een Aquabot onder een bepaalde grens komt dat deze automatisch naar een docking station vaart om weer bij te laden, en vervangen wordt door een andere. Dit kan ook gebeuren als een Aquabot verloren of defect raakt als deze in bulk geproduceerd worden op den duur.

Voor dit onderzoek dient de afstand beperkt te blijven tot en met het bereik van de op afstand bestuurbare handbediening. Het gaat dus over een radius van enkele honderd meters. De wetgeving is vergelijkbaar met die van vliegende drones. Die stelt namelijk dat de bestuurder op de grond ten alle tijden zicht moet hebben op de drone. In de toekomst dient dit proces losgelaten te worden opdat de Aquabots zelfstandig ingezet kunnen worden op grotere afstanden afhankelijk van het tij en de wind. Dit zal ervoor zorgen dat de Aquabots niet beperkt zijn tot de inzet op lokaal niveau.

Het gewicht van de Aquabots speelt ook een belangrijke rol, doordat de verschillende sensoren die benodigd zijn voor de werkzaamheden meegenomen dienen te worden zonder dat het vaartuig belemmerd wordt. Om alleen een blik te werpen op de brandstofcel systeem en benodigde onderdelen als voorbeeld, is aangenomen dat het gewicht van de waterstofopslag tank 62 kg bedraagt voor een afstand van 500 km. Bij een brandstofcel van 1000 Watt wordt het gewicht van de elektromotor inbegrepen, de brandstofcelstack weegt 5,7 kg volgens (technologies, 2013) en daarbij wordt een gewicht van 60 kg aangenomen voor de elektromotor (Electronics, 2018). Het totaalgewicht waar rekening mee gehouden dient te worden voor een klein vaartuig met een op een brandstofcel gebaseerde voorstuwing bedraagt volgens de aangenomen waardes:  $62 + 5,7 + 60 = 128 \text{ kg}$ . Ter vergelijking is het gewicht van een alleen dieselmotor al 98 kg volgens (marine, 2020).

Deze gewicht aannames zijn nog zonder het gewicht van de sensoren en besturing inbegrepen. Echter dienen deze gewichten op een latere fase bepaald te worden en inbegrepen worden om de stabiliteit van het vaartuig te beproeven op de wensen van de gebruiker.

## 2.7 Ondersteunende systemen

In deze paragraaf worden verschillende methodes om waterstof als energiedrager te produceren behandeld. Door de verschillende besproken voordelen en beperkingen te bekijken kan er een keuze gemaakt worden voor de meest geschikte methode om waterstof aan boord te krijgen. Schepen worden tegenwoordig bijvoorbeeld indien mogelijk in de haven van brandstof voorzien door middel van bunkerschepen, lichters of vrachtauto's.

Binnen dit onderzoek wordt het zonnepaneel meegenomen als mogelijke bron van lokaal geproduceerde waterstof. Om een beter beeld te vormen over hoe een zonnecel energie produceert, wordt eerst gekeken naar hoe een zonnecel werkt. Een onderzoek gedaan door (Gerritsen, 2018) beschrijft het zonnepaneel als het onderdeel in het Fotovoltaïsch (FV)-systeem waar elektriciteit gewonnen wordt. De werking van het zonnepaneel en een paar verschillende typen worden beschreven in bijlage 2.

Een voorbeeld van een schip dat deze technologie toegepast heeft, is door (perspectief, 2018) beschreven als het eerste schip ter wereld met een brandstofcel voor groene waterstof. Deze brandstofcel heeft een vermogen van 22 kW. Het schip genaamd “De Energy Observer” ligt vol met zonnepanelen die bijna de hele oppervlakte bedekken, en twee windturbines. De zonnepanelen kunnen een stroom opwekken van 21kWp. kWp staat voor ‘kiloWatt piek’. Verder wordt twee maal 1 kW opgewekt via de windturbines. De opgewekte elektrische energie wordt vervolgens opgeslagen in een batterij van 106 kWh. Als die vol zit wordt daar waterstof van gemaakt. Daarvoor demineraliseert het schip zeewater, dat vervolgens door elektrolyse gescheiden wordt in zuurstof en waterstof. Een maximum van 62 kg geproduceerde waterstof wordt onder een druk van 350 tot 700 bar opgeslagen in tanks om te gebruiken als er geen wind of zon is om nieuwe waterstof te produceren. Deze opslag is nodig omdat er anders bij gebrek aan nieuwe productie geen energiedrager is om aan de energievraag te voldoen.



(Solar, 2020) beschrijft het Watt-piekvermogen als het vermogen dat een zonnepaneel onder laboratoriumomstandigheden afgeeft. Dit is bij een instraling van 1000 Watt per m<sup>2</sup> en een temperatuur van 25° Celsius.

Aanvullend daarop stelt (Legius, Nieuwe zonnepanelen produceren direct groene waterstof, 2020) dat na 10 jaar onderzoek en ontwikkelingen, onderzoekers van de Belgische universiteit KU Leuven met een speciaal zonnepaneel waterstofgas uit vocht in de lucht kunnen maken. Het is gebleken dat één zonnepaneel tot 250 liter waterstofgas uit waterdamp kan produceren per dag. Dat betekent dat er met twintig van deze panelen een gezin gedurende een jaar van voldoende stroom en warmte voorzien kan zijn. Een standaard voor de omzetting van zonne-energie naar elektrische energie ligt tussen de 18 en 20 procent, en als er nog water gesplitst moet worden zal er nog meer energie verloren gaan in de omzetting. De oplossing die de onderzoekers bedacht hebben is een zonnepaneel dat via een chemisch proces direct waterstof maakt. Met het Leuvense zonnepaneel (1,65 m<sup>2</sup>) zou 15 procent van het zonlicht rechtstreeks worden omgezet in waterstofgas. “Het is eigenlijk een unieke combinatie van fysica en chemie. In het begin hadden we 0,1 procent opbrengst en moesten we echt zoeken naar die waterstofmoleculen,” zo vertelt professor Martens aan de redactie van VRT Nieuws, “Vandaag zie je de waterstofmoleculen in bellen naar boven komen. Dus dat is tien jaar werken, altijd maar verbeteren, de problemen zoeken. Zo kom je uiteindelijk tot iets dat effectief kan werken.”

Daarentegen verteld (Brinck, 2019) dat het lastig te zeggen is of de productie van waterstof direct uit zonlicht kansrijk is. Het idee is dat deze directe methode efficiënter en/of goedkoper moet zijn dan eerst elektriciteit op te wekken via een normaal zonnepaneel en dan via elektrolyse waterstof te produceren. Dit is voornamelijk vooral een theoretisch idee volgens het artikel. Met een hoogwaardig maar standaard zonnepaneel met een rendement van 20% en elektrolyser met een rendement van 75% is het totaalrendement van 15% ook te behalen. Met het belangrijke verschil dat die technologie al beschikbaar is op de markt. Vervolgens wordt er gesproken over de geproduceerde hoeveelheid waterstof. De dagproductie van het Vlaamse prototype van 250 liter blijkt gelijk te zijn aan ongeveer 22 gram waterstof per dag.

(Berg, 2018) stelt dat bij het opwekken van stroom die afkomstig is uit een schone bron, zoals in dit onderzoek de zon, dat het belangrijk is om de energie tijdelijk op te slaan. In deze paragraaf zal er gekeken worden naar de voor- en nadelen van het opslaan van de opgewekte energie in waterstof. Er zijn een paar stappen nodig bij het bewaren en later gebruiken van het opgewekte overschot aan groene stroom door middel van waterstof. Ten eerste wordt de opgewekte stroom gebruikt voor de elektrolyse van water. Hierbij wordt H<sub>2</sub>O omgezet in zuurstof (O<sub>2</sub>) en waterstof (H<sub>2</sub>). De geproduceerde waterstof zal dan opgeslagen worden in tanks. Wanneer deze weer nodig is, wordt de waterstof in de brandstofcel weer omgezet in stroom. Het enige afvalproduct dat bij deze omzetting vrijkomt is schoon water.

Tegenover de voordelen zal er bij elke omzetting een gedeelte van de energie verloren gaan. Het blijkt dat dit bij elektrolyse gaat over meer dan 20%. Vervolgens moet het waterstofgas vervoerd worden en dit gebeurt onder druk. Om de benodigde druk te creëren is er energie nodig. Bij het



omzetten van waterstofgas naar stroom gaat ook een grote hoeveelheid energie verloren dit kan wel tot 50% oplopen.

Daarentegen geeft (Jansen, 2018) aan dat de opslagcyclus van waterstof drie stappen kent, namelijk: elektrolyse van water; compressie en opslag van waterstof; en de omzetting van waterstof in elektriciteit. Alle drie de stappen leveren verlies op waardoor er niet meer dan 34% rendement overblijft van de oorspronkelijke hoeveelheid stroom. De verliezen in de cyclus zijn dus:

Elektrolyse van water: Rendement 75%

Compressie en opslag: Rendement 90%

Omzetting naar stroom: Rendement 50%

Er blijft dus  $0,75 \times 0,90 \times 0,50 = 34\%$  over van het oorspronkelijke vermogen. Dit is dus een stuk minder dan volgens de vorige bron. Alhoewel deze berekeningen lijken te kloppen zal er verder onderzoek gedaan moeten worden om te valideren welke bron juist is.

Een reformer is een onderdeel dat vanuit de bestaande brandstof gelijk ter plekke  $H_2$  kan maken. Doordat dit systeem een dynamische oplossing biedt wordt deze meegenomen in dit onderzoek als mogelijke optie. Volgens (Ent, 2019) is de focus van HyGear al sinds 2002 op het lokaal produceren van waterstof. HyGear heeft in de aanloop naar de groeiverwachting rond waterstofmobiliteit reformers ontwikkeld om waterstof uit aardgas te produceren.

De (Proton Exchange Membrane) PEM-brandstofcel-reformercombinatie blijkt volgens (Paul-Hoek & Molenbroek, 2006) een complex systeem te zijn. Om hier een idee van te geven is in figuur 2 een schematische weergave te zien van dit systeem. De verschillende brandstofceltypen worden verder uitgelegd in bijlage 2.

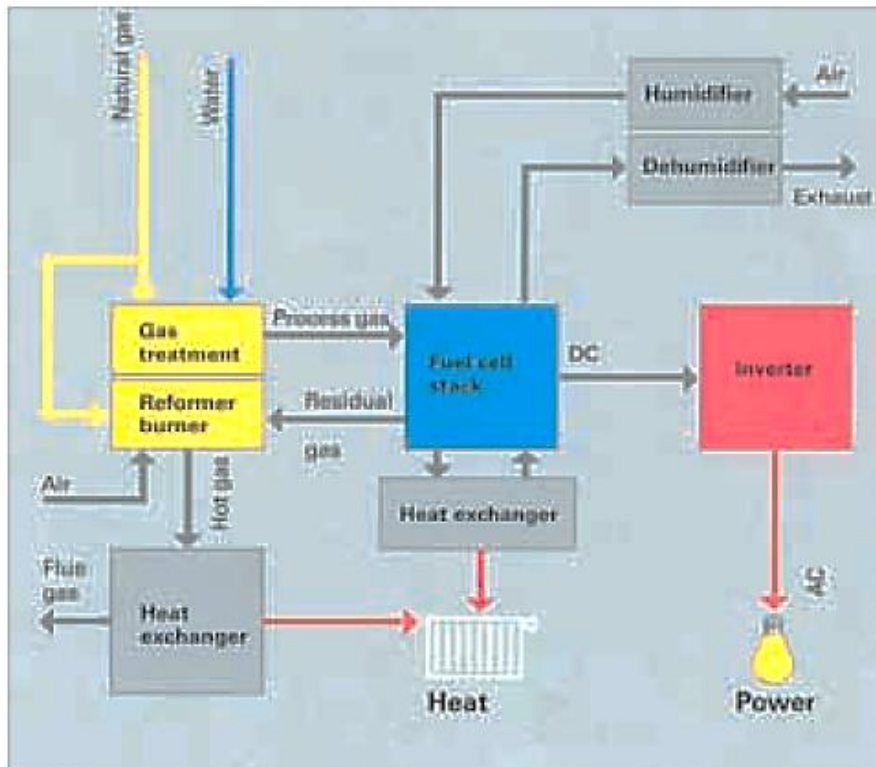


Fig. 2. Schematisch overzicht (Paul-Hoek & Molenbroek, 2006)

Er kan globaal worden gezegd dat de PEM-brandstofcel-reformercombinatie momenteel een elektrisch rendement van 30% heeft, en dat er gestreefd wordt naar een rendement van 35-40%. Er dient nog veel onderzoek en ontwikkeling plaats te vinden om tot een robuust en betaalbaar systeem te komen.

## 2.8 Hoe ziet het financiële aspect er mogelijk uit?

Een op waterstof gebaseerde aandrijving wordt gezien als een milieubewuste keuze. Maar wat kost het allemaal? In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen de aanschafkosten van een op dieselolie gebaseerd systeem, een systeem gebaseerd op batterijen en een systeem gebaseerd op een brandstofcel. Aan het eind van deze paragraaf worden de verschillende onderdelen en systemen in tabel 5 naast elkaar gelegd ter verduidelijking.

In het eerste hoofdstuk is gekeken naar de verschillende beschikbare brandstofcellen op de markt. In dit paragraaf zal een nadere blik geworpen worden op de mogelijke kosten die gebonden zijn aan het aanschaffen van een dergelijk systeem. Volgens (Paul-Hoek & Molenbroek, 2006) is er een groot aantal fabrikanten bezig met het ontwikkelen van de PEM-brandstofcellen in de vorm van brandstofcelstacks. Veelal wordt er gewerkt aan een mogelijkheid om tot een geïntegreerd systeem te komen. Voor de vergelijking in deze paragraaf is er gekeken naar de prijs van een 1kW brandstofcel van (technologies, 2013). De aanschafprijs voor dit onderdeel is € 7500,-. Dit is een opvallend groot verschil met de prijzen van de andere twee systemen.

Voor de kosten van de zonnepanelen is gekeken naar de website van (Zonnepanelen prijs historisch laag, 2020). Deze website heeft de kosten van de meest voorkomende zonnepanelen benoemd. Het

blijkt dat de kosten van een zonnepaneel afhankelijk zijn van het vermogen en het rendement. De prijs van een zonnepaneel van 250 Wp kost tussen de € 260,- en € 290,-. De kosten voor een paneel met een hoger vermogen en rendement van bijvoorbeeld 290 Wp, kan tussen de € 290,- en € 350,- zijn. Hieronder wordt in tabel 4 de prijs per zonnepaneel per m<sup>2</sup> weergegeven. In tabel 5 zal er verder gebruik gemaakt worden van de prijs voor 1,63 m<sup>2</sup>.

*Tabel 4 prijs per zonnepaneel per oppervlakte (Zonnepanelen prijs historisch laag, 2020)*

| Aantal zonnepanelen | Oppervlakte in m <sup>2</sup> | Kosten |
|---------------------|-------------------------------|--------|
| 1                   | 1,63 m <sup>2</sup>           | € 341  |
| 2                   | 3,26 m <sup>2</sup>           | € 682  |
| 3                   | 4,89 m <sup>2</sup>           | € 1023 |
| 4                   | 6,52 m <sup>2</sup>           | € 1364 |
| 5                   | 8,15 m <sup>2</sup>           | € 1705 |
| 6                   | 9,78 m <sup>2</sup>           | € 2046 |
| 7                   | 11,41 m <sup>2</sup>          | € 2387 |

Bij dit onderdeel wordt er gekeken naar de prijs van waterstof tijdens het schrijven van dit onderzoek. (Groenhuijsen, sd) noemt waterstof voorlopig kostbaar. Er dient gerekend te worden met € 15,- per kg en een verbruik van ongeveer 1,25 kg per 100 km. Dit is omgerekend ongeveer € 0,18 per km. In de toekomst wordt er wel verwacht dat de prijs zal dalen tot € 5, -per kg. De prijs per kilo kan aanzienlijk verschillen afhankelijk van de manier waarop de waterstof wordt gegenereerd. Bij dit onderzoek blijft dit buiten beschouwing.

(Wouter van der Geest, 2019) vertelt dat tanks waarin waterstof opgeslagen kan worden eveneens behoorlijk kostbaar zijn. Hierbij wordt gesproken over tanks die een hogedruk aankunnen, danwel zeer koude temperaturen aankunnen. Voor tanks met hoge druk, kan uitgegaan worden van opslagkosten in de ordegrootte van € 600,- per kg waterstof. De kosten in 2018 voor opslag bij 350 bar liggen daarbij lager dan bij 700 bar; \$11 per kWh voor 350 bar en \$15 voor 700 bar. De verwachting is niet dat deze kosten nog veel zullen gaan zakken, ook omdat gebruik gemaakt wordt van dezelfde technieken zoals gangbaar zijn bij de toepassing van LNG en CNG. Dat maakt dat de opslag van waterstof al als een sterk ontwikkelde techniek beschouwd kan worden. Door de hoge kosten voor opslag, wordt ook bij waterstof ‘Energy-as-a-service’ verondersteld. Wel moet het gebruik van waterstof juridisch nog verankerd worden in CESNI/ ES-Trin.

In een ander artikel geschreven door (Legius, Waterstof als brandstof: over de energiedichtheid en kostprijs, 2019) staat dat er eerder geconstateerd is dat er driemaal meer volume nodig is aan waterstofgas in verhouding tot aardgas voor dezelfde hoeveelheid energie. Als ervan uitgegaan wordt dat de prijs van aardgas op € 0,85 per m<sup>3</sup> is. Dan betekent het dat de waterstofgasprijs inclusief alle belastingen en toeslagen op ongeveer 0,85/3= 28,3 eurocent per m<sup>3</sup> zou mogen kosten. Enplus onderzocht in samenwerking met TNO en DNVGL of de productie van groene waterstof

economisch haalbaar is en heeft in een rapport voor verschillende productiemethoden de prijs per kg berekend in 2018. Volgens dat rapport zou in 2025 een productieprijs tussen € 2,40 en € 2,70 per kg mogelijk moeten zijn. Het gewicht van een kuub waterstofgas is 90 gram, dus 11,1 kuub weegt 1 kg. Als hiermee de kale productieprijs van waterstofgas berekend wordt is dat:  $2,70 / 11,1 = 24,3$  eurocent. Deze prijs is nog zonder aflevering bij de consument en geen belastingen en overige kosten. Om de vergelijking zo eerlijk mogelijk te maken zal er verder gerekend worden met een opslagtank van 4 kg die ongeveer gelijk is aan de inhoud van de dieseltank dat later besproken wordt. Tijdens het schrijven van dit onderzoek ligt de huidige prijs voor waterstof op € 15,- per kg.

Bij het installeren van een schip gebaseerd op een dieselmotor zijn er verschillende componenten benodigd om deze installatie correct te laten werken. In dit onderdeel wordt er alleen gekeken naar de aanschafkosten voor een dieselmotor. Het betreft in dit geval de Mitsubishi L2E dieselmotor met een vermogen van 1 kW, met een aanschafprijs van rond € 5000 (marine, 2020).

Voor het rekengemak is in dit onderzoek aangenomen dat een liter diesel gelijk is aan een kg diesel. Voor een dieselopslag zijn er veel mogelijkheden te vinden op het internet, in verschillende materialen en maten. Om een vergelijking te maken is er gekozen voor een 43 liter-inbouwbrandstoftank van (Boottotaal, sd). Deze tank kost € 115,-. Tijdens het schrijven van dit onderzoek is de adviesprijs van dieselolie op € 1,40 per liter.

Om een vergelijking te maken tussen de verschillende typen componenten is ervoor gekozen om een nadere blik te werpen op een elektromotor die overeenkomt met de hiervoor benoemde dieselmotor. Het gaat dan om de Waterworld 7.5i met een vermogen van 15 pk die geprijsd is op ongeveer € 5000,- (Waterworld, Inboord motoren 2019, 2019).

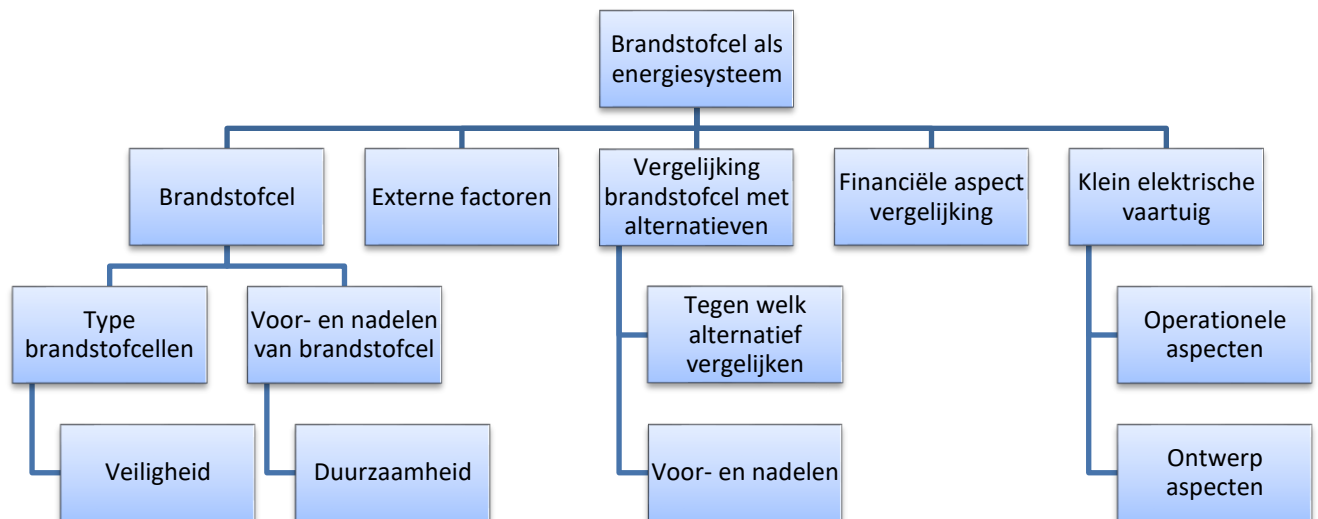
Er is gekozen om gebruik te maken van 4x 270 Ah/ 12 V-batterijen. Deze kosten samen 3500 euro (Waterworld, Inboord motoren 2019, 2019).

*Tabel 5 Vergelijking aanschafkosten*

| Onderdelen                    | Brandstofcel     | Accu's        | Dieselolie     |
|-------------------------------|------------------|---------------|----------------|
| Voortstuwing                  | 5000,-           | 5000,-        | 5000,-         |
| Energieomzetting              | 7500,-           |               |                |
| Opslag                        | 2400,-           | 3500          | 115,-          |
| Opwekking (+ zelf produceren) | 341,-            | 341,-         |                |
| Prijs per liter/kg            | 15,-             |               | 1,40           |
| <b>Totaal</b>                 | <b>15.256, -</b> | <b>8841,-</b> | <b>5116,40</b> |

## 2.9 Conceptueel model

Onderstaand conceptueel model geeft een visueel overzicht van de onderzoekvariabelen met hun kenmerken welke in ogenschouw zijn genomen voor het praktijkonderzoek.



De onderzoeksvraag is: In hoeverre is het zinvol om een brandstofcel in te zetten in het energiesysteem voor een klein vaartuig dat opereert binnen een havengebied?

- Deelvraag 1: Welke zijn de verschillende energiedragers (energiesystemen) die momenteel beschikbaar zijn voor een brandstofcel geschikt voor een klein vaartuig?
- Deelvraag 2: Wat zijn de gevolgen van een brandstofcel op een klein vaartuig ten opzichte van een elektrische aandrijving met accu's?
- Deelvraag 3: Welke effecten heeft de voortstuwing op het scheepsontwerp van een klein vaartuig (werkende in het havengebied)?



### 3. Methode

In dit onderzoek is een combinatie van kwantitatief- en kwalitatief onderzoek uitgevoerd om antwoord te geven op de vraag: In hoeverre is het zinvol om een brandstofcel in te zetten in het energiesysteem voor een klein vaartuig dat opereert binnen een havengebied?

Hiervoor is literatuuronderzoek gedaan en zijn interviews afgenomen met een producent van brandstofcellen, een vertegenwoordiger van team Oceanco en met de Regisseur next port industry.

#### Gegevensverzameling

Voor het literatuuronderzoek zijn de kwantitatieve gegevens voor de energiedichtheid en de actuele kosten afkomstig uit analyses van verschillende wetenschappelijke artikelen en gepubliceerde papers. Dieselolie, accu's en brandstofcellen zijn als beschikbare energiesystemen meegenomen. Deze zijn als bronnen toegevoegd aan de hand van de APA-documentatie.

Op basis van het literatuuronderzoek zijn de interviews opgesteld. De interviews waren gestructureerd opgesteld doordat deze via de email afgenomen zijn. In sommige gevallen zijn deze antwoorden telefonisch toegelicht. De antwoorden op de vragen zijn verwerkt in het document. De interviews zijn als bijlage 1 toegevoegd aan dit onderzoeksrapport.

#### Inclusie- en exclusiecriteria

Voor het literatuuronderzoek is ervoor gekozen om alleen te kijken naar waterstof als energiedrager en niet naar andere alternatieven voor de brandstofcel. Daarnaast is slechts één brandstofcelproducent geïnterviewd doordat de andere benaderde producenten niet gereageerd hebben. Voor de andere interviews is de Regisseur Next Port Industry benaderd, omdat deze persoon zowel de opdrachtgever van het onderzoek is, als de contactpersoon voor het uitvoeren van de overgang van het huidige energiesysteem naar brandstofcellen. De andere geïnterviewde persoon is een vertegenwoordiger van team Oceanco, dit is een raceteam dat van de zomer in Monaco met behulp van een hybride brandstofcelvaartuig een wedstrijd gaat houden.

#### Onderzoekverloop

De opzet was om meerdere brandstofcel producenten te benaderen voor een interview. Uiteindelijk is het alleen mogelijk geweest om contact te krijgen met één producent. Doordat het niet mogelijk was om meer producenten te raadplegen kon alleen dit interview meegenomen worden in het onderzoek, en wordt deze beschouwd als voldoende door de tijdsdruk en de huidige epidemie.

Voor de expertise betreffende de accu's en dieselolie is het internet en de vergaarde kennis van de onderzoeker geraadpleegd als bronnen. Om een vergelijking te maken tussen deze drie energiesystemen is besloten om een zogeheten MCA op te stellen.

#### Validiteit en betrouwbaarheid

Ten behoeve van de validiteit zijn de interviewvragen opgesteld op basis van de literatuur. Het gaat hierbij om literatuur die geselecteerd is op relevantie voor de onderzoeksvraag. Daarnaast is zoveel mogelijk de meest recente literatuur voor het onderzoek geraadpleegd.



De MCA is daarna bekeken en gekeurd door vier verschillende experts op het relevante gebied, waaronder ook de opdrachtgever. Daarbij is met name gekeken naar de wegingsfactoren en de genomen beoordelingscriteria, en door middel van een vergelijking gebaseerd op de accu's als normering is er een afstemming en een kwantificatie ontstaan. Om de herhaalbaarheid te verhogen zijn beoordelingscriteria genomen die van belang zijn bij het vergelijken van de drie verschillende energiesystemen. Hiermee is het onderzoek valide, en is de betrouwbaarheid van het onderzoek gewaarborgd.

### **Ethische aspecten**

Er wordt in dit onderzoek rekening gehouden met de privacy van de personen die geïnterviewd zijn. De gestelde vragen en antwoorden daarop zijn via de e-mail gegaan en worden zonder namen toegevoegd aan het onderzoek. De interviews zijn gehouden door een student die in het vierde jaar zit van de opleiding scheepswerktuigkundige, die verder geen relatie heeft met de geïnterviewde personen.

## 4. Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek besproken. Voor de ondersteuning van de resultaten is er gebruik gemaakt van een schematische weergave en de MCA-resultaten in een tabel, zoals besproken in hoofdstuk 3. De resultaten hebben meteen betrekking op het beantwoorden van de hoofdvraag: “In hoeverre is het verstandig om een brandstofcel in te zetten in het energiesysteem voor een klein vaartuig dat opereert binnen een havengebied?” Bij elk beoordelingscriterium is gebruik gemaakt van de stof behandeld in het theoretisch kader mits er geen andere bronnen benoemd zijn.

Er is gekozen voor de onderstaande variabelen omdat deze door de onderzoeker en de experts als belangrijkste zaken die aan bod komen bij het overwegen van een energiedrager voor een Aquabot worden beschouwd. Bij het kiezen van de variabelen is er gekeken naar de relevantie van elk onderdeel ten opzichte van het geheel. Deze worden verder op in dit hoofdstuk toegelicht. Of een energiedrager voldoet aan een bepaalde variabele wordt aangegeven door middel van onderstaande puntenclassificatie. De norm waartegen een vergelijking gemaakt wordt is in dit onderzoek de waardes van een accu pakket. Dit is omdat er op het moment gebruik gemaakt wordt van accu's in de aquabots. Bij de resultaten is voor de brandstofcel waterstof genomen als energiedrager.

| Punten | Classificatie |
|--------|---------------|
| 1      | Slecht        |
| 2      | Voldoende     |
| 3      | Boven norm    |

Voor het totale aantal punten is uitgegaan van het maximum te behalen punten (165) te delen door de cijferschaal van 10. Dit levert een factor op van  $\frac{165}{10} = 16,5$ . Door de behaalde punten te delen door dit berekende factor is een uiteindelijk cijfer van tussen de 0 en 10 per onderdeel berekend. Een hogere score is beter. De wegingsfactor van elk beoordelingscriterium genomen in deze tabel is besproken met de opdrachtgever, en is aan verandering onderhevig indien er andere waardes gegeven dienen te worden aan de criteria. Hierdoor blijft de tabel bruikbaar, ook wanneer er omstandigheden veranderen.

*Onderbouwing van de beoordelingscriteria met aandacht voor de norm:*

### Aanschafkosten

De aanschafkosten hangen mede af van de overige aspecten en is daarom een bijzaak, alleen van belang als iets aangeschaft wordt voor het onderzoeksdoel en niet voor het uiteindelijke doel. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om bewust voor een kleine actieradius kiezen om een nieuw type oplossing uit te kunnen proberen. Voor een vergelijking van de aanschafprijzen wordt verwezen naar paragraaf 2.8 tabel 5.



### Actieradius

Onder de actieradius wordt er gekeken naar de behaalbare afstand op een volle lading van de energiedrager. De belangrijkste reden om te zoeken naar een alternatief voor de accu's die nu in gebruik zijn, als het bekeken wordt vanuit een standpunt voor de productfase. Voor de onderzoeksfase is deze echter minder belangrijk. Voor accu's wordt een afstand aangenomen van 400 km, en voor de brandstofcel wordt een afstand aangenomen van 500 km, terwijl er voor diesel een aanname gemaakt is van rond de 1000.

### Eenvoud

Eigenlijk kan dit beschouwd worden als een overkoepelende term die zowel van belang is in de onderzoeksfase als in de eindfase, alhoewel om verschillende redenen. Het slaat op ontwerp, onderhoud en op gebruik. Eenvoud in de onderzoeksfase betekent dat studenten kunnen worden ingezet; in de eindfase helpt het om de kosten laag te houden. Accu's krijgen bij dit onderdeel een hoge resultaat. Dit is omdat het ontwerp voor veel flexibiliteit zorgt, er geen onderhoud nodig is en het gebruik hiervan als gemakkelijk ervaren wordt.

### Emissie

Het onderzoek heeft als randvoorwaarde 0- vervuilende emissie. Voor dit onderzoek wordt deze variabele gezien als de belangrijkste op de veiligheid na.

### Formaat

Voor de onderzoeksfase wordt het formaat als belangrijk beschouwd doordat de gekozen Aquabot een beperkende factor vormt. Voor de eindfase is formaat afhankelijk van het operationele doel. Dan is er ook een relatie met de actieradius en kan er bewust gekozen worden tussen een grotere Aquabot met hogere actieradius of een kleinere variant met kleinere actieradius.

### Gewicht

Het gewicht van de systeemcomponenten en opslag beïnvloedt de karakteristieken van het vaartuig. Voor de gewichten die van toepassing zijn bij het brandstofcelsysteem wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Voor de norm geldt dat een accupakket een totaalgewicht van 284 kg bedraagt. Hierbij is de gewicht van de voortstuwingsmethode als de energievoorziening bij elkaar opgeteld.

### Levensduur

Over de levensduur van brandstofcellen blijken verschillende bronnen van mening te verschillen, waardoor de echte levensduur van de brandstofcel nog niet te voorspellen valt. Het wordt ingeschat tussen de 10 en 20 jaar. Voor de norm wordt de gemiddelde levensduur van een accu tussen de 5 en 6 jaar genomen, alhoewel dit sterk afhankelijk is van het verbruik. Levensduur is in de onderzoeksfase minder relevant, echter in de eindfase is dit wel belangrijk doordat die mede de operationele kosten bepaalt.

### Ontwikkelingsmogelijkheden in de toekomst

Voor de onderzoeksfase zijn ontwikkelingsmogelijkheden cruciaal. In de eindfase werk je naar een product toe en is er minder tijd voor een nader onderzoek, maar er moet wel geld verdiend worden. De ontwikkelingen voor accu's worden ook nog steeds bevorderd. Hier wordt een aanname gemaakt dat de brandstofcel nog in de beginfase is van zijn ontwikkeling en dat er in de toekomst nog veel zal gebeuren om deze goedkoper, efficiënter, krachtiger te maken. Terwijl de dieselmotoren langzaam maar zeker ingehaald worden door deze twee systemen krijgt deze een lage beoordeling.

### Opslag

De opslag verwijst naar de capaciteit van de tanks en de benodigde ruimte. Doordat er in dit geval de beschikbare ruimte bekend en beperkt is krijgt dit criterium de minst zware weging. Als de brandstoftank niet past kan eenvoudig een andere formaat aangeschaft worden die wel erin past. Om het volume van accu's met opslagtanks te vergelijken wordt gebruik gemaakt van de volumetrische energiedichtheid. Volgens tabel 11 in bijlage 2 bedraagt de volumetrische energiedichtheid van accu's 0,05 kWh/L.

### Veiligheid

Gaat boven alles, in alle fases mogen er geen risico's worden genomen waarvan je de consequenties niet kan dragen. Vandaar dat er hier wordt er gekeken of het veilig is om de benodigde energiedrager te transporteren. Zoals uit bijlage 3 blijkt is waterstof niet van zichzelf explosief. Het is net zoals aardgas wel brandbaar, en het zal pas branden als het in de juiste verhouding met zuurstof wordt gemengd. Vervolgens moet er nog een vlam bij gehouden worden. Als er een vlam bij de kapotte waterstoftank komt dan is de kans het grootst dat deze als een kaars wordt uitgeblazen. Waterstof is het lichtste element waardoor het meteen opstijgt (Wijk, 2018). Door de verschillende veiligheidsmaatregelen die getroffen worden bij waterstofopslag en bunkeren, kan waterstof gezien worden als een heel erg veilige energiedrager indien er volgens de aanbevelingen gehandeld wordt. Uit eigen werkervaring is gebleken dat de veiligheid omtrent dieselolie net acceptabel is. De oorzaken hiervoor is verouderde systemen en leidingen, het laks omgaan met de voorschriften, en de soms voorkomende bijzondere weersomstandigheden wanneer er toch gebunkerd moet worden. Het blijkt dat accu's veilig zijn zolang er op een verantwoorde wijze mee gehandeld worden volgens de aanwijzingen, en deze niet overladen worden. Echter is het wel voorgekomen dat lithiumbatterijen spontaan in brand vliegen, of zelfs ontploffen. Vandaar dat deze ook net zoals bij dieselolie nog net acceptabel zijn.

Tabel 6 Resultaten Multicriteria Analyse

| Beoordelingscriteria                      | Wegingsfactor | Brandstofcel | Dieselolie | Accu's |
|-------------------------------------------|---------------|--------------|------------|--------|
| Aanschaffkosten                           | 3             | 1            | 3          | 2      |
| Actieradius                               | 4             | 2            | 3          | 2      |
| Emissie                                   | 9             | 3            | 1          | 3      |
| Eenvoud                                   | 8             | 3            | 2          | 3      |
| Formaat                                   | 6             | 1            | 2          | 3      |
| Gewicht                                   | 5             | 3            | 1          | 2      |
| Levensduur                                | 2             | 3            | 2          | 2      |
| Ontwikkelingsmogelijkheden in de toekomst | 7             | 3            | 1          | 2      |
| Opslag                                    | 1             | 2            | 3          | 1      |
| Veiligheid                                | 10            | 3            | 2          | 2      |
| Totaal                                    |               | 142          | 96         | 128    |
| Gewogen resultaat                         |               | 8,6          | 5,9        | 8      |

Uit het resultaat van de MCA is gebleken dat de dieselolie het minste heeft gescoord met een 5,9 (zie tabel 6 gewogen resultaat). Dit resultaat is onder andere ten gevolge van het gebrek aan schone emissies, en doordat de dieselmotor over relatief weinig ontwikkelingsmogelijkheden voor de toekomst beschikt. Op de tweede plaats zijn de accu's met een 8. Deze score was wel verwacht doordat accu's steeds verder ontwikkeld worden. De hogere score die behaald wordt in de tabel reflecteert dit. De brandstofcel komt uit op een 8,6, dit wordt verder besproken in hoofdstuk 6.

## 5. Discussie

Tijdens dit onderzoek is gebruik gemaakt van het internet om verschillende bronnen te vinden en met elkaar te vergelijken. De gevonden informatie bleek niet altijd te kloppen dus moest er vaak verder gezocht worden naar betrouwbare bronnen. Tijdens het schrijven van dit onderzoek zijn er enige uitdagingen opgetreden die ertoe hebben geleid dat er minder interviews waren afgenomen dan gepland. Dit heeft ervoor gezorgd dat de onderzoeker voor de conclusie meer moest vertrouwen op de gevonden internetbronnen.

Doordat de brandstofcellen vooralsnog als een vrij nieuwe technologie beschouwd worden, is het voor de hand liggend dat er niet veel betrouwbare informatie te vinden is over de verschillende aspecten die hierbij komen kijken, zoals de levensduur van een brandstofcel. Voor de komende jaren vallen er dus nog diverse ontwikkelingen te verwachten. Hierdoor is het aan te raden om een dergelijk onderzoek weer te houden over 5 á 10 jaar, wanneer de brandstofceltechnologie beter onderzocht en gedocumenteerd is, en onder andere de aanschafkosten gestabiliseerd zijn door meer concurrentie.

Tevens blijkt tijdens de productie van windmolens en zonnecellen milieuvervuiling te ontstaan. Dit is in strijd met de milieuvriendelijke uitgangspunt van deze energiesystemen, zolang de huidige productiemethode niet geïnnoveerd is.

Het gedane onderzoek heeft met name betrekking op kleine vaartuigen, het is echter wel mogelijk om de resultaten toe te passen op grotere vaartuigen mits, er rekening gehouden wordt met de schaal en andere apparatuur die erbij komt kijken. De resultaten van tabel 6 kunnen in dat geval aangepast worden om voor de verschillende toepassingen te beoordelen of het verstandig is om op brandstofcellen over te stappen.

Tijdens de onderzoeksfase is een interview gehouden met de heer Ronald Dingemanse. Ronald is onderdeel van een team dat bezig is met een project voor Oceanco om een hybride schip te ontwerpen voor een wedstrijd in Monaco. Een hybride systeem wordt gedefinieerd als een systeem met een accu die groot genoeg is om gedurende enige tijd als hoofdleverancier van stroom te fungeren. Het doel van het project is om de innovatie van energieopwekking en gebruik te benadrukken. De wijze waarop de opwekking van de benodigde energie berust is voor een deel afkomstig uit accu's en voor een deel via een brandstofcel, een zogeheten hybride systeem. Doordat de gekozen Lithium-ion batterijen erg goed presteren in dit verband, maar niet meer gezien worden als innovatief, is er voor de hybride oplossing gekozen. In dit project zijn ruimte en gewicht als belangrijke parameters benoemd. Om de benodigde elektrische energie te produceren worden maximaal 2,5 m<sup>2</sup> aan zonnecellen geïnstalleerd aan boord. De opgewekte energie wordt tijdelijk opgeslagen in de accu's en zal tijdens de wedstrijd zoveel mogelijk verbruikt worden. Waterstof wordt onder hoge druk in een opslagtank meegenomen. Het is gebleken dat in het bijzonder de brandstofcellen en de benodigde opslag hiervoor voor flinke kosten hebben gezorgd.

Dit onderzoek heeft zich niet gericht op de mogelijkheid om een hybride systeem in te voeren, maar doordat een hybride systeem wel een schoon alternatief is voor in de strijd voor emissieloze voortstuwing, is ervoor gekozen om deze wel mee te nemen in dit hoofdstuk als discussiemateriaal.



Een reden voor het kiezen van een dergelijk systeem is omdat een batterij zeer goed werkt met het opvangen van een variërend vermogen, terwijl een brandstofcel juist beter presteert bij een constant vermogen. Er zou dus gebruik gemaakt kunnen worden van een accu om het systeem op te starten en de vaartsnelheid te variëren waardoor er pieken ontstaan in het vermogen, totdat de gewenste snelheid behaald wordt en het systeem omschakelt naar de brandstofcel om deze snelheid te behouden met een constant vermogen. Zoals ook bij sommige hybride auto's terug te zien valt.

De uiteindelijke keuze voor een voorstuwingsysteem en toebehorende zal gekoppeld moeten worden aan de belangen van de opdrachtgever/ eigenaar, dus welke parameters worden beschouwd als essentieel voor de werkzaamheden waar het schip voor bedoeld is. Is het bijvoorbeeld belangrijk dat het schip licht van gewicht is doordat het snel van punt naar punt moet kunnen varen, of speelt het volume een belangrijke rol omdat het schip lading of mensen moet kunnen vervoeren? Het kan ook zijn dat de kosten een belangrijke rol spelen omdat er een beperkt budget beschikbaar is gesteld voor het schip. Hiervoor kan dit onderzoek een oplossing aanbieden, middels een Excel file waarin de gebruiker criteria kan aanpassen en die vervolgens voor de gebruiker de 'beste' oplossing berekent.

## 6. Conclusie & aanbevelingen

Als afsluiting van het onderzoek wordt in dit hoofdstuk de conclusie en wat aanbevelingen besproken. Hier zullen eerst de conclusies van de deelvragen en daarna die van de hoofdvraag benoemd worden.

Deelvraag 1: Welke zijn de verschillende energiedragers (energiesystemen) die momenteel beschikbaar zijn voor een brandstofcel geschikt voor een klein vaartuig?

Gedurende het onderzoek is er gebleken dat accu's, dieselolie en waterstof als mogelijke energiedragers gebruikt kunnen worden op kleine vaartuigen. Hierbij is er een keuze gemaakt om een nadere blik te werpen op waterstof als de gewenste energiedrager, voornamelijk omdat waterstof geen schadelijke stoffen produceert tijdens het energieopwekkingsproces.

Deelvraag 2: Wat zijn de gevolgen van een brandstofcel op een klein vaartuig ten opzichte van een elektrische aandrijving met accu's?

Uit het onderzoek is gebleken dat het totaalgewicht van de brandstofcel lichter is, waardoor de actieradius een stuk groter wordt. Als gekeken wordt naar de energiedichtheid beschikt de brandstofcel over een aanzienlijk hoger getal. Het is opvallend dat de brandstofcellen duurder zijn dan de andere opties met de beschikbare vooruitgangen.

Deelvraag 3: Welke effecten heeft de voortstuwing op het scheepsontwerp van een klein vaartuig (werkende in het havengebied)?

Door een analyse van de theorie kan worden gesteld dat een elektrische motor minder volume inneemt dan een dieselmotor. Daarentegen nemen de opslagtanks voor waterstof relatief veel ruimte in. Verder als ervoor gekozen wordt om gebruik te maken van zonnepanelen zal er goed over nagedacht moeten worden over de beschikbare ruimte hiervoor op de scheepsromp. Een ander effect is dat de combinatie van brandstofcel en elektrische motor voor aanzienlijk minder gewicht zorgt dan een dieselmotor. Dus als opsomming:

- Minder volume zorgt voor een andere opdeling van de apparatuur aanboord.
- Minder gewicht zorgt voor een betere manoeuvreerbaarheid en eventueel meer draagvermogen om meer apparatuur mee te nemen.

De conclusie op de onderzoeksvraag: In hoeverre is het verstandig om een brandstofcel in te zetten in het energiesysteem voor een klein vaartuig dat opereert binnen een havengebied?

Het uitgangspunt van dit onderzoek was om te onderzoeken of het haalbaar is om waterstof als energiedrager te implementeren aan boord van kleine vaartuigen. Om een antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag is een MCA opgesteld in hoofdstuk 4. Door een beoordelingsschaal te ontwikkelen van verschillende belangrijke criteria bij het gebruik van energiesystemen, is inzichtelijk gemaakt welk systeem het beste scenario kan hebben. Daarbij is met name gekeken naar de wegingsfactoren en de genomen beoordelingscriteria, en door middel van een vergelijking gebaseerd op de accu's als normering is er een afstemming en een kwantificatie ontstaan. Uit de resultaten van de MCA is gebleken dat de brandstofcel de hoogste score heeft behaald. Hiermee is in dit onderzoek aangetoond dat de brandstofcel gezien kan worden als geschikt energiesysteem om emissieloos te varen in het Rotterdamse havengebied. Op basis hiervan wordt aanbevolen om een dergelijk brandstofsysteem in te voeren en deze in de praktijk te testen.



Het wordt verder aanbevolen om een vervolgonderzoek op te stellen met als doel de overgebleven onderdelen van de functionele decompositie te laten onderzoeken om hierdoor een compleet overzicht te vormen van alle aspecten betreffende het onderwerp.

Op het ogenblik zijn er meerdere energiedragers in ontwikkeling. Het is aangeraden om deze te monitoren en een vervolgonderzoek uit te voeren naar mogelijke andere alternatieve energiedragers. Een andere mogelijkheid is om een nader onderzoek in te stellen naar de prestaties van een hybride systeem zoals als besproken in de discussie.



## Bronnenlijst

Aljevragen. (sd). *Hoe is een accu opgebouwd*. Opgehaald van Aljevragen.nl:

<https://www.aljevragen.nl/sk/redox/RED178.html>

Alles over accu's . (2020). Opgehaald van Dekker watersport:

<https://www.dekkerwatersport.nl/page/423/welke-accu-moet-ik-kiezen/>

Andrijanovitš, A., Egorov, M., Lehtla, M., & Vinnikov, D. (2010, januari 11). *A hydrogen technology as buffer for stabilization of wind power generation*. Opgehaald van Researchgate:

[https://www.researchgate.net/publication/229017404\\_A\\_hydrogen\\_technology\\_as\\_buffer\\_for\\_stabilization\\_of\\_wind\\_power\\_generation](https://www.researchgate.net/publication/229017404_A_hydrogen_technology_as_buffer_for_stabilization_of_wind_power_generation)

Arbocatalogus. (2020). *Dieselolie*. Opgehaald van Arbocatalogusmobiel:

<https://www.arbocatalogusmobiel.nl/content/files/brandstof/dieselolie.pdf>

Baert, P. R. (1999). *Toekomst van de verbrandingsmotor Motor van de*. Technische universiteit

Eindhoven. Opgehaald van <http://alexandria.tue.nl/extra2/redes/baert1999.pdf>

Berg, H. v. (2018, mei 31). *Hoe zit het met waterstof?* Opgehaald van zonnefabriek:

<https://www.zonnefabriek.nl/nieuws/hoe-zit-het-met-waterstof/>

Boottotaal. (sd). *allpa Kunststof inbouw brandstoftank 43l 650x350x230mm met flensplaat*.

Opgehaald van Boottotaal: [https://www.boottotaal.nl/allpa-kunststof-inbouw-brandstoftank-43l-650x350x230mm-met-flensplaat?cectid=1-523-1&gclid=CjwKCAjwvZv0BRA8EiwAD9T2VUT9QDaBeqmZS8zLHAViGvfNl-SOKx2y54QWaYu30JYGsCfrrUeM4RoC1ScQAvD\\_BwE](https://www.boottotaal.nl/allpa-kunststof-inbouw-brandstoftank-43l-650x350x230mm-met-flensplaat?cectid=1-523-1&gclid=CjwKCAjwvZv0BRA8EiwAD9T2VUT9QDaBeqmZS8zLHAViGvfNl-SOKx2y54QWaYu30JYGsCfrrUeM4RoC1ScQAvD_BwE)

Brinck, T. t. (2019, februari 26). *Waterstof uit Vlaamse lucht is prachtig, maar meer ook (nog) niet*.

Opgehaald van wattisduurzaam.nl: <https://www.wattisduurzaam.nl/17870/energie-opslaan/waterstof/waterstof-uit-vlaamse-lucht-is-prachtig-maar-meer-ook-niet/>

Contany. (2014, mei 27). *De verschillende soorten zonnepanelen*. Opgehaald van de groene bron:

<https://degroenebron.nl/blog/soorten-zonnepanelen/>

EG&G technical services, i. (2004). *Fuel Cell Handbook* (7de ed.). Moran town, West virginia,

Verenigde staten: U.S. Department of Energy. Opgehaald van Wikipedia: <http://www.brennstoffzellen.rwth-aachen.de/Links/FCHandbook7.pdf>

Electronics, W. W. (2018). *Handleiding*. Opgehaald van destilleboot: <https://destilleboot.nl/wp-content/uploads/2018/09/Handleiding-WaterWorld.pdf>

Encyclopedie. (2020). Opgehaald van encyclo.nl: <https://www.encyclo.nl/begrip>

Ent, L. v. (2019, april 15). *Lokale waterstofproductie is enorme groeimarkt*. Opgehaald van

ptindustrieelmanagement: <https://www.ptindustrieelmanagement.nl/manufacturing/artikel/2019/04/lokale->



waterstofproductie-is-enorme-groeimarkt-

1012275?\_ga=2.173778019.198369004.1583757653-1445627214.1573141779

Feenstra. (2019, juni 6). *Brandstofcel: wat kan er niet en wat kan er wel?* Opgehaald van Zorglooswonen: <https://www.feenstra.com/zorgelooswonen/brandstofcel/>

Geertsma, P. (2016, augustus 15). *Wat is diesel of dieselolie?* Opgehaald van Technisch werken: <http://www.technischwerken.nl/kennisbank/materialen-kennisbank/wat-is-diesel-of-dieselolie/>

Gerritsen, T. (2018, januari 17). *Zonne-energie aan boord.* Opgehaald van HBO kennisbank: [https://hbo-kennisbank.nl/details/sharekit\\_hz:oai:surfsharekit.nl:b301955d-f3f6-4eea-b012-9aa857456ea0?q=zonnepanelen+schip&has-link=yes&c=0](https://hbo-kennisbank.nl/details/sharekit_hz:oai:surfsharekit.nl:b301955d-f3f6-4eea-b012-9aa857456ea0?q=zonnepanelen+schip&has-link=yes&c=0)

Groenhuijsen, H. (sd). *Batterij of waterstof: wat kost dat, wat levert het op?* Opgehaald van Hansgroenhuijsen.nl: <https://www.hansgroenhuijsen.nl/4-fields/batterij-of-waterstof-wat-kost-dat-wat-levert-het-op/>

Hoogenraad, W. (. (2004, juni 1). *op weg met waterstof.* Opgehaald van CE delft: <https://www.ce.nl/publicaties/23/op-weg-met-waterstof>

Hoor, H. W. (2004, juli). *Toepassing van brandstofcel binnen de installatie techniek.* Opgehaald van HBO kennisbank: [https://hbo-kennisbank.nl/details/sharekit\\_hu:oai:surfsharekit.nl:9baab9da-496a-434b-a7ac-d5a856fdf7d3?q=brandstofcel&has-link=yes&c=0](https://hbo-kennisbank.nl/details/sharekit_hu:oai:surfsharekit.nl:9baab9da-496a-434b-a7ac-d5a856fdf7d3?q=brandstofcel&has-link=yes&c=0)

Huizen, E. v. (2018, mei 4). *Varen op waterstof is nog een hele uitdaging.* Opgehaald van Maritiem Nederland: <https://www.maritiemnederland.com/artikelen/techniek-innovatie/varen-op-waterstof-is-nog-een-hele-uitdaging>

Ilent. (2017, maart 17). *Vrijstellingen ADR.* Opgehaald van Inspectie leefomgeving en transport: <https://www.ilent.nl/onderwerpen/gevaarlijke-stoffen-weg/voorbereiden-vervoer-gevaarlijke-stoffen-over-de-weg/vrijstellingen-adr>

Ilent. (2020). *Eisen aan scheepsbrandstof.* Opgehaald van Ilent: <https://www.ilent.nl/onderwerpen/wet--en-regelgeving-zeevervaart/eisen-aan-scheepsbrandstof>

Jansen, F. (2018, september 19). *Waterstofopslag: inefficiënt, te duur.* Opgehaald van Nationaal Kritisch Platform Windenergie: <https://www.nkpw.nl/2018/09/19/waterstofopslag-is-inefficient-en-te-duur/>

Jewa-gas. (2020). *Waterstof.* Opgehaald van Jewagas: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1940554/VIB/SDS-Waterstof-NL-nl-07\\_09\\_2017.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1940554/VIB/SDS-Waterstof-NL-nl-07_09_2017.pdf)



- Keunen, Y. (2020, februari 5). *Primeur voor Rotterdam: Watertaxi vaart straks op waterstof*. Opgehaald van PZC: <https://www.pzc.nl/rotterdam/primeur-voor-rotterdam-watertaxi-vaart-straks-op-waterstof~aae39a3d/>
- Kleinschaligheidsinvesteringsaftrek*. (2020). Opgehaald van Belastingdienst: <https://www.belastingdienst.nl/wps/wcm/connect/bldcontentnl/belastingdienst/zakelijk/winst/inkomstenbelasting/veranderingen-actueel-jaar/investeringsaftrek-2020/kleinschaligheidsinvesteringsaftrek-2020>
- Kruse, B., Grinna, S., & Buch, C. (2002, februari 13). *Hydrogen Status og muligheter*. Opgehaald van Bellona: [https://bellona.org/content/uploads/sites/3/Hydrogen\\_6-2002.pdf](https://bellona.org/content/uploads/sites/3/Hydrogen_6-2002.pdf)
- Kuijt, A. (2016, mei 7). *Alles wat u wilt weten over elektrisch varen*. Opgehaald van akmaritimeservice: <https://akmaritimeservice.nl/alles-wat-u-wilt-weten-over-elektrisch-varen/>
- Legius, M. (2019, juli 4). *Waterstof als brandstof: over de energiedichtheid en kostprijs*. Opgehaald van gawalo: [https://www.gawalo.nl/energie/artikel/2018/12/waterstof-als-brandstof-over-de-energiesdichtheid-en-kostprijs-1016909?\\_ga=2.54176175.622727835.1582028149-1445627214.1573141779](https://www.gawalo.nl/energie/artikel/2018/12/waterstof-als-brandstof-over-de-energiesdichtheid-en-kostprijs-1016909?_ga=2.54176175.622727835.1582028149-1445627214.1573141779)
- Legius, M. (2020, februari 13). *Nieuwe zonnepanelen produceren direct groene waterstof*. Opgehaald van installatiejournaal: <https://www.installatiejournaal.nl/energie/nieuws/2019/03/nieuwe-zonnepanelen-produceren-direct-groene-waterstof-1019354>
- Leren van de ADR gevarenklassen*. (2020). Opgehaald van Adr-opleider: <https://www.adr-opleider.nl/alles-over/de-adr-gevarenklassen/leren-van-de-adr-gevarenklassen.html>
- Maanen, P. v. (2000). *Scheepsdieselmotoren*. Harfsen: Uitgeverij Nautech.
- marine, D. (2020). *MITSUBISHI L2E SCHEEPSDIESEL*. Opgehaald van Drinkwaard marine: <https://www.drinkwaard.com/scheepsmotoren/mitsubishi-l2e/>
- Mori, D., & Hirose, K. (2008, oktober 5). *Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles*. Opgehaald van Science direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908009439>
- NAS. (2004). *The Hydrogen Economy*. Opgehaald van National academies of: sciences, engineering, medicine: <https://www.nap.edu/catalog/10922/the-hydrogen-economy-opportunities-costs-barriers-and-rd-needs>
- Oliecentrale. (2009, augustus 18). *Dieselolie*. Opgehaald van Oliecentrale.nl: <https://www.oliecentrale.nl/media/rtf/Oliecentrale%20-%20Brandstoffeninfo/m90.pdf>
- Paul-Hoek, i. K., & Molenbroek, d. E. (2006). *Beschikbaarheid brandstofcellen op de markt*. Opgehaald van TVVL magazine:



[https://www.tvvl.nl/l/library/download/10400/beschikbaarheid+brandstofcellen+op+de+markt+-+tvvl\\_2006\\_1.pdf?format=save\\_to\\_disk&ext=.pdf](https://www.tvvl.nl/l/library/download/10400/beschikbaarheid+brandstofcellen+op+de+markt+-+tvvl_2006_1.pdf?format=save_to_disk&ext=.pdf)

perspectief, R. v. (2018, juli 5). *Eerste schip op groene waterstof is onderweg*. Opgehaald van Techniek en wetenschap in perspectief: <https://www.technischweekblad.nl/nieuws/eerste-schip-op-groene-waterstof-is-onderweg>

Precision, V. (2019, juli 10). *Vier uitdagingen en oplossingsrichtingen voor waterstofproductie*. Opgehaald van INSTALLATIEPROFS.NL: <https://www.installatieprofs.nl/nieuws/duurzame-energie/zonne-en-alternatieve-energie/vier-uitdagingen-en-oplossingsrichtingen-voor-waterstofproductie>

produceren, Z. e. (sd). *Waterstof*. Opgehaald van Kennisbank duurzaam: <https://www.zelfenergieproduceren.nl/kennisbank-duurzaam/opslag-van-energie/waterstof/#1549876124582-81084cd2-0cf4>

Redasolar. (2017, april 10). *Het verschil tussen mono- en polykristallijne en dunne film zonnecellen*. Opgehaald van Reda solar: <https://www.redasolar.nl/verschillende-soorten-zonnepanelen>

Reijers, H., Groot, A. d., & Lako, P. (2001, april). Opgehaald van Publicaties Ecn: <https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--01-019>

Rotterdam, H. (2020). *Innovatie voor haven en stad*. Opgehaald van RDM Centre of Expertise: [https://www.rdmcoe.nl/?utm\\_source=email&utm\\_campaign=autograph](https://www.rdmcoe.nl/?utm_source=email&utm_campaign=autograph)

Rotterdam, H. (2020). *Innovatie voor haven en stad*. Opgehaald van RDM Centre of Expertise: [https://www.rdmcoe.nl/?utm\\_source=email&utm\\_campaign=autograph](https://www.rdmcoe.nl/?utm_source=email&utm_campaign=autograph)

Rotterdam, W. (2020, januari 23). *Over ons*. Opgehaald van Watertaxi Rotterdam: <https://www.watertaxirotterdam.nl/over-ons>

S.A., A. L. (2019, oktober 26). *De beste waterstof aandelen van dit moment*. Opgehaald van Lynx: <https://www.lynx.nl/kennis/artikelen/beste-brandstofcel-waterstof-aandelen/>

Senge, P. (1992). *De vijfde discipline*. Schiedam: Scriptum Books.

Showcase. (2019, september 14). *Energietransitie doet veel waterstof opwaaien*. Opgehaald van Port of rotterdam: <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/energietransitie-doet-veel-waterstof-opwaaien>

Shumm, B. (2006, april 27). *Fuel cells*. Opgehaald van Britannica Academic: <http://ezproxy.zebi.nl:2183/levels/collegiate/article/fuel-cell/106045>

solar, P. (2020). *Wat betekent wat piek*. Opgehaald van Pure solar: <https://www.puresolar.nl/nl/veelgestelde-vragen/wat-betekent-wp-watt-piek-kwp-kwh>



- technologies, H. f. (2013, augustus 14). *H-1000 Fuel Cell Stack*. Opgehaald van Horizon fuell cell technologies: [https://7782216e-8aad-4387-b6a4-b13b0ab6b227.filesusr.com/ugd/047f54\\_86b712599dda8542adcca251d9904ca4.pdf](https://7782216e-8aad-4387-b6a4-b13b0ab6b227.filesusr.com/ugd/047f54_86b712599dda8542adcca251d9904ca4.pdf)
- van der Ent, L. (2019, juli 15). *Waterstof: grijs, blauw of groen – wat is het verschil?* Opgehaald van ptindustrieelmanagement: <https://www.ptindustrieelmanagement.nl/hse/artikel/2019/07/waterstof-grijs-blauw-of-groen-wat-is-het-verschil-1012424>
- Waterworld. (2019). *Inboord motoren 2019*. Opgehaald van Waterworld: <https://media-01.imu.nl/storage/akmaritimeservice.nl/1714/waterworld-2019-ak-maritime-service.pdf>
- Waterworld. (2020). *Het schone en stille alternatief*. Opgehaald van Destilleboot: <https://destilleboot.nl/waterworld/>
- Wijk, A. v. (2018, februari 13). *DE 7 HARDNEKKIGE LABELS OVER WATERSTOF*. Opgehaald van magazine NoordZ: [https://www.noordz.nl/2018/02/13/7-hardnekkige-fabels-waterstof/?harvest\\_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://www.noordz.nl/2018/02/13/7-hardnekkige-fabels-waterstof/?harvest_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F)
- Woonbewust. (2019, mei 8). *Welke soorten zonnepanelen zijn er?* Opgehaald van woonbewust: <https://woonbewust.nl/zonne-energie/soorten-zonnepanelen>
- Wouter van der Geest, M. M. (2019, juli 10). *Op weg naar een klimaatneutrale binnenvaart per 2050*. Opgehaald van Panteia research to progress: <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2019/07/10/op-weg-naar-een-klimaatneutrale-binnenvaart-per-2050/2019+07+10+Rapport+Transitie-en+rekenmodel.pdf>
- Zonnepanelen prijs historisch laag*. (2020). Opgehaald van zonnepanelenkennis.nl: <https://www.zonnepanelenkennis.nl/zonnepanelen-prijs/>
- Zonnepanelen-info. (2020). *11 Voordelen en 9 nadelen zonnepanelen*. Opgehaald van Zonnepanelen-info: <https://www.zonnepanelen-info.be/voordelen-en-nadelen-van-zonnepanelen/>

## Bijlage 1: Interviewhulp

### Interview Team Oceanco

1. Op basis waarvan is de beslissing genomen om een waterstof aandrijving te implementeren in plaats van elektrisch?  
De aandrijving is nog steeds elektrisch. De opwekking van energie is deel via brandstofcellen (waterstof) en deel komt de energie uit batterijen. Gewicht en ruimte zijn belangrijke parameters.
2. In hoeverre heeft de keuze voor een op waterstof gebaseerde voortstuwing het scheepsonwerp beïnvloed ten opzichte van een dieselmotor?  
Niet van toepassing. Het project gaat om innovatie energieopwekking en gebruik.
3. In hoeverre heeft de keuze voor een op waterstof gebaseerde voortstuwing het scheepsonwerp beïnvloed ten opzichte van een elektrische voortstuwing?  
De opwekking van energie is deel via brandstofcellen (waterstof) en deel komt de energie uit batterijen. Gewicht en ruimte zijn belangrijke parameters.  
Li-ion batterijen presteren in dit verband erg goed, maar zijn niet meer innovatief. Vandaar de 'hybride' oplossing.
4. In hoeverre heeft de systeem keuze de prestaties beïnvloed?  
Vooralsnog niet. We streven naar een tijd bij de endurance race van 1:45
5. Er is gekozen om gebruik te maken van zonnepanelen. Op basis waarvan is ervoor gekozen om gebruik te maken van zonnepanelen?  
Zonne-energie is gratis energie en er is ruimte om max 2.5 m2 aan zonnecellen te gebruiken. Geeft dus meer beschikbare energie
6. Welke argumenten hebben geleid tot de keuze voor zonnepanelen? Waren er andere keuzes die ook in aanmerking kwamen?  
Nee, niet echt. Zie vraag 5
7. Het zonnepaneel wordt gebruikt om energie te produceren. Hoe wordt de geproduceerde energie opgeslagen aan boord?  
De energie wordt (tijdelijk) opgeslagen in de accu's, en zoveel mogelijk tijdens de race verbruikt.
8. Op basis waarvan is de beslissing genomen voor de gekozen opslag?  
Puur op gewicht en ruimte en beschikbaarheid van de technologie.
9. In hoeverre is het verbruik verschillend ten opzichte van een systeem gebaseerd op een dieselmotor?  
In het geheel niet. Een diesel motor(tje) is nooit overwogen.



10. In hoeverre is het verbruik verschillend ten opzichte van een systeem gebaseerd op een elektrische voortstuwing?
11. Wat waren de aanschafkosten voor dit systeem ten opzichte van een dieselmotor?  
De aandrijving is nog steeds elektrisch. De opwekking van energie is deel via brandstofcellen (waterstof) en deel komt de energie uit batterijen.
12. Wat waren de aanschafkosten voor dit systeem ten opzichte van een elektrische voortstuwing?  
De aandrijving is nog steeds elektrisch. De opwekking van energie is deel via brandstofcellen (waterstof) en deel komt de energie uit batterijen. In het bijzonder de brandstofcellen en de benodigde opslag van waterstof zijn flinke kosten. Waterstof wordt onder hoge druk in een tankje meegenomen.

#### **Interview Horizon Fuel cel**

1. Wat kost de H-1000W-brandstofcel?  
Momenteel 5000 Euro
2. Wat kunt u zeggen over de tekortkomingen van de brandstofcel die momenteel voor kleine schepen wordt gebruikt?  
Wat bedoel je met een klein schip, geef aan.
3. Wat zijn de verschillende eisen die aan brandstofcellen worden gesteld?  
Hoge energiedichtheid en hoog energievolume, zo efficiënt mogelijk.
4. Hoe zou u het verschil tussen brandstofcellen en elkaar omschrijven?  
Efficiëntie, kwaliteit en betrouwbaarheid.
5. Wat kun je zeggen over de efficiëntie van brandstofcellen bedoeld voor kleine schepen?  
Een verbrandingsmotor is 35% efficiënt, een compleet waterstofsysteem mogelijk vergelijkbaar, maar een groen waterstofsysteem vervuult niet en is zeer goed voor het algehele klimaat, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> etc. ...
6. Mag je de ontwikkelingen beschrijven die gedaan worden om de efficiëntie te verbeteren?  
Mensen proberen allemaal verschillende dingen, zoals pulsatie van elektriciteit, verschillende membranen, coatings, katalysatoren, elektroden enz. ...
7. Wat kunt u mij vertellen over het gebruik van de brandstofcellen?  
Op het moment dat de markt erg langzaam aantrekt, is de prijs nog steeds hoog, we hebben meer markt nodig om de prijs te verlagen.



8. Wat kun je zeggen over het vermogen dat de huidige brandstofcellen kunnen leveren?  
U kunt alle brandstofcellen van verschillende grootte krijgen, onze nieuwe Horizon-stapel zal produceren 370 kW elektrische energie en dezelfde hoeveelheid warmte. Een ideale brandstofcel voor tal van toepassingen.

#### **Interview Regisseur next port industry**

1. Zo een klein vaartuig heeft werkzaamheden die verricht moeten worden in de Rotterdamse haven. Wat kun je vertellen over de duur van de gemiddelde werkzaamheid?  
De werkzaamheden bestaan o.a. uit handhavings-, en toezichttaken. Hierbij moet je denken dat kleine vaartuigen (Aquabots) worden ingezet om gedrag van schepen en snelheid te monitoren. Ook zal doormiddel van het gebruik van verschillende sensors de waterkwaliteit worden gemeten. Een andere mogelijkheid is uit uitvoeren van dieptemetingen (peilingen) en kade inspecties. Vanzelfsprekend willen wij de Aquabots zo langdurig mogelijk inzetten. Op dit moment werken wij voor de energievoorziening met loodaccu's. Als we niet met vol vermogen varen kunne wij circa een kleine 8 uur varen. Zodra er op vol vermogen wordt gevaren wordt de capaciteit minder. Mijn voorstelling is dat Aquabots in "swarms" worden ingezet en zodra de energiec capaciteit van een Aquabot te weinig wordt deze automatisch naar een dokking station vaart om weer bij te laden. Een ander Aquabot neemt automatisch de taken over, zodat een 24 uren inzet in principe mogelijk is.
2. Wat kun je vertellen over de verwachte werkzaamheden van de vaartuigen uitgerust met een brandstofcel? Hoe is de keuze gemaakt voor de verwachte werkzaamheden?  
Zie hierboven. Maar ook hebben wij Aquabots voor onderwater. Het zou mooi zijn als wij deze ook kunnen uitrusten met een brandstofcel. Echter voor jouw onderzoek praten we alleen over kleine oppervlakteschepen die ingezet kunne worden in de Rotterdamse haven. In principe willen wij voor een model Aquabot kijken of een brandstofcel haalbaar is. Hierbij moeten je diverse aspecten meenemen, zoals gewicht, veiligheid en ruimte. Voor dit haalbaarheidsonderzoek hoeven we nog niet naar de functionaliteit te kijken. De Aquabot dient alleen (op afstand aangestuurd) te kunnen varen. De functionaliteit wordt later ingevuld. Het gaat alleen om het vraagstuk of waterstof tot de mogelijkheid behoort om veilig te worden gebruikt voor de voortstuwing.
3. Wat kan je vertellen over de afstanden die gevaren moeten worden voor de verwachte werkzaamheden?  
Voor dit onderzoek moet de afstand beperkt blijven tot en met het bereik van de op afstand bedienbare handbediening. In een radius van enkele honderden meters moet de Aquabot aangestuurd kunne worden. De wetgeving van (vliegende) drones is vergelijkbaar. Een bediener op de grond moet te allen tijde zicht hebben op een drone. Vooralsnog gebruiken wij dit ook als uitgangspunt voor dit onderzoek. Natuurlijk willen wij in de toekomst dat dit proces wordt losgelaten en dat wij de inzet ook op een grotere afstand kunnen haan uitvoeren.



4. Wat wordt er verwacht van de duur van de werkzaamheden voor de vaartuigen die uitgerust worden met een brandstofcel?

Zie hierboven. De duur zo lang mogelijk maar gezien de maatvoering van onze Aquabots zijn hier wel beperkingen. Je moet uitgaan van onze bestaande modellen.

5. Is het uiteindelijk de bedoeling dat de vaartuigen bemand of onbemand rond moeten varen? Kan je dit nader verduidelijken?

Het is de bedoeling dat ze in de toekomst onbemand worden ingezet in een “swarming” techniek, waarbij meerdere Aquabots tegelijk worden ingezet. Rekening houdend met het tij en wind kan je grote afstanden afleggen waardoor je niet beperkt bent aan inzet op lokaal niveau. Indien kleine aquabots worden ingezet en in massa worden geproduceerd is het ook niet erg als een Aquabot een keer verloren (kapot) gaat. Door de “swarming” methode wordt dit opgevangen.

6. Voor het Aquabots project is het de bedoeling dat deze straks verschillende werkzaamheden zullen gaan uitvoeren. Hierbij kan ervan uitgegaan worden dat jullie dit niet allemaal alleen uitvoeren, maar in samenwerking met verschillende partijen. Hoe moet ik de samenwerking tussen jullie en de andere partijen voorstellen? Mag je meer vertellen betreffende welke partijen erbij betrokken zijn? Wat kan je vertellen over de rol van de andere partijen die erbij betrokken zijn?

Partijen die nu interesse hebben getoond zijn o.a. RWS, Havenbedrijf, RH Marine en verschillende MKB-bedrijven. Aquabots blijft een ontwikkelplatform in samenwerking met bedrijven en onderwijsinstellingen. Praktijk gerelateerde vraagstukken worden met de bedrijven besproken en RDM zoekt naar mogelijkheden om samen te werken. De opgedane kennis vloeit zowel terug naar het bedrijfsleven als het onderwijs. Een voorbeeld is bijvoorbeeld het project van RWS waarbij Aquabots werden ingezet om dieptemetingen uit te voeren. Ook bij waterschappen is de Aquabots ingezet om via diverse sensors waterkwaliteit te meten op afstand. Waarbij de Aquabot op een andere locatie kan worden aangestuurd.

7. Wat kun je vertellen over het beschikbare budget voor de Aquabots project? Hoe wordt dit meegenomen in het voorheen besproken samenwerkingsverband tussen de desbetreffende partijen?

Het budget is afhankelijk van het soort project. Als een bedrijf interesse heeft getoond in het Aquabots project spreken we o.a. ook over het te besteden budget, bemensing en materialen. Daarnaast kan er gezocht worden naar subsidies. Als het project wordt toegewezen wordt een projectplan gemaakt met hieraan een projectleider gekoppeld.



8. Bij het werken met waterstof zijn er bepaalde maatregelen die de veiligheid waarborgen. In hoeverre is de veiligheid van belang voor deze project volgens jou? En hoe zit dat bij de andere desbetreffende partijen?

Veiligheid is altijd een onderdeel in de projecten. Indien bijvoorbeeld in de dronehaven wordt gevaren zal er een risico-inventarisatie worden gemaakt. Ook op RDM hebben wij een Risk assessment gehouden om de risico's zoveel mogelijk in kaart te brengen. In het projectplan wordt dit ook apart meegenomen.

9. Het is in het vorige interview ter sprake gekomen dat de Aquabots straks in “swarms” zullen gaan varen. Hiervoor zullen de Aquabots ter zijne tijd nog op aangepast moeten worden. In hoeverre is het van belang dat de voorstuwing ontwikkelingsmogelijkheden heeft voor de toekomst?

“Swarming” is verre toekomst. Eerst willen wij ons focussen op alleen varende Aquabots al dan niet met waterstof als brandstof voor de voorstuwing. Het onderzoek van jou moet ons inzicht geven over de haalbaarheid om waterstof te gebruiken voor onze Aquabots.

10. In het vorige interview is ter sprake gekomen dat het de bedoeling is dat de Aquabots meerdere werkzaamheden uit moet kunnen voeren in de Rotterdamse haven. In hoeverre is het van belang dat de Aquabots over een grote actieradius beschikken?

Hoe groter de actieradius des te beter. Echter er zijn vermoedelijk beperkingen met opslagcapaciteit en volume. De Aquabots moeten nog wel stabiel blijven opereren. Dus stabiliteit is zeker een aspect om in de gaten te houden. Verder zal vooralsnog een operator altijd zicht houden op de Aquabot bij het inzetten.

## Bijlage 2: Extra informatie

### Energiedragers

#### Dieselolie

(Geertsma, 2016) beschrijft dieselolie als een product dat van aardolie gemaakt wordt en als een brandstof voor dieselmotoren dient. De naam dieselolie wordt gebruikt bij het benoemen van laagzwavelige gasolie. Gasolie kan onderverdeeld worden in laagzwavelig en hoogzwavelig. Deze indeling wordt gebruikt als aanduiding voor de *parts per million* (PPM) zwavel die aanwezig is in de gasolie. Dieselolie is meegenomen als onderdeel van dit onderzoek omdat het een veel voorkomende energiedrager is voor schepen van verschillende maten. Door de beschikbare informatie kan er een eerlijke vergelijking gemaakt worden met het brandstofcelsysteem.

#### Accu's

Zo schrijft (Aljevragen, sd) dat een accu opgebouwd is uit een aantal cellen die in serie geschakeld zijn. Iedere cel bevat twee loodplaten waarvan één bedekt is met loodoxide. De accu is gevuld met een elektrolyt. Als energiedrager zorgen accu's ook voor een emissieloze voortstuwing. Een energiedrager wordt binnen dit onderzoek gedefinieerd als een medium dat bruikbare energie bevat. Dit systeem wordt op het moment toegepast bij verschillende Aquabots die bij het RDM in gebruik zijn. Hierdoor worden deze systemen meegenomen als vergelijking met het brandstofcelsysteem. Er bestaan verschillende type accu's afhankelijk van de gewenste toepassing. De verschillende types zijn te vinden op (Alles over accu's, 2020) en worden in bijlage 2 beschreven.

#### Waterstof

Dit element is beter bekend als  $H_2$ , en is het kleinste molecuul wat er op aarde voorkomt. Waterstof is de stof die verbruikt wordt in het proces van energieopwekking dat in de brandstofcel plaatsvindt. Waterstof wordt niet zoals olie uit de grond gepompt, maar moet geproduceerd worden. Daarom is het dus een energiedrager en geen energiebron. De energiedrager waar dit onderzoek zich op richt is waterstof.

Hieronder staan de relevante onderdelen die meegenomen zijn in de tabel 1:

#### VN-nummer

Dit is het nummer dat toegereikt is aan de desbetreffende stof door de Verenigde Naties.

#### Gevarenklasse

Gevarenklassen bundelen een groep stoffen die tijdens het vervoer gelijksoortig gevaar kunnen opleveren. In dit onderzoek worden alleen de hoofdgroepen benoemd namelijk:

1. Ontplofbare stoffen en voorwerpen
2. Samengeperste, vloeibaar gemaakte of onder druk opgeloste gassen
3. Brandbare vloeistoffen
4. Brandbare vaste stoffen
5. Oxiderende stoffen
6. Giftige en infectueuze stoffen



7. Radioactieve stoffen
8. Bijtende stoffen
9. Diverse gevaarlijke stoffen

#### Gevarenaanduiding

Producten met gevaarlijke stoffen hebben gevarensymbolen en andere waarschuwingen op etiketten. Zo weten vervoerders, verwerkers en consumenten welke risico's de producten hebben.

#### Veiligheidsaanbevelingen

Dit zijn aanbevelingen om zo veilig mogelijk om te gaan met de desbetreffende stof.

#### Geschikte blusmiddelen

Dit geeft aan welke brandblussers geschikt zijn om een brand bij een bepaald product zo verantwoord- en veilig mogelijk te kunnen blussen.

#### Milieu voorzorgsmaatregelen

Waar er op gelet moet worden om de gevolgen op het milieu zo beperkt mogelijk te houden.

#### Vlampunt

De temperatuur waarbij een stof voldoende damp afgeeft zodat bij een ontsteking een brand kan ontstaan.

#### Kookpunt

Temperatuur waarbij een gegeven stof van een vloeistof in een gas overgaat; naarmate de druk afneemt, daalt het kookpunt.

#### Kritische temperatuur

De kritische temperatuur van een stof is de temperatuur waarbij deze zich in één fase bevindt.

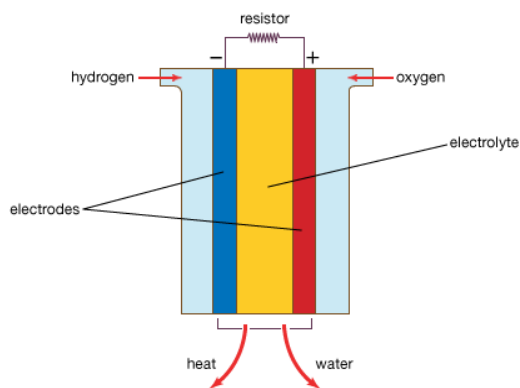
#### Dichtheid

De dichtheid van een stof, oftewel de soortelijke massa van een stof, is de massa van deze stof per volume- eenheid. De dichtheid van water is bijvoorbeeld  $1 \text{ g/cm}^3$ . Dus dit betekent dat 1 kubieke centimeter water 1 gram weegt.

### **Werking principe van een brandstofcel**

Binnen het onderzoek wordt met name gekeken naar de toepassingsmogelijkheid voor emissiereductie door de inzet van een brandstofcel. Om te achterhalen in hoeverre dit een optie is, moet eerst gekeken worden naar de specificaties. Een brandstofcel is volgens (Feenstra, 2019) een apparaat waarin waterstof en zuurstof een chemische reactie met elkaar aangaan. Daarbij komt energie vrij in de vorm van elektriciteit en warmte. Dit betekent dat de brandstofcel dus geen

energiebron is, maar een manier om de energie die is opgeslagen in een energiedrager (bijvoorbeeld waterstof) om te zetten in elektriciteit en warmte. De brandstofcellen lijken in veel opzichten op batterijen, maar kunnen elektrische energie over een veel langere periode blijven leveren. De reden is dat een brandstofcel voortdurend voorzien wordt van brandstof en lucht door een externe bron, terwijl een batterij daarentegen alleen beschikking heeft over een beperkte hoeveelheid brandstof en oxidatiemiddel. Als een batterij of accu ‘op’ is, moet je die weggooien of opnieuw opladen. Dat geldt niet voor de brandstofcel. Aan een brandstofcel kun je namelijk steeds opnieuw een energiedrager toevoegen waarmee deze energie kan produceren. Zo is het keer op keer mogelijk om, bijvoorbeeld met zuurstof en waterstof, warmte en elektriciteit op te wekken. In figuur 3 is de schets van een brandstofcel te zien.



© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figuur 3 Brandstofcel (Shumm, 2006)

Volgens (S.A., 2019) is het grote voordeel van brandstofcelvoertuigen dat waterstof als krachtbron benzine of diesel vervangt. Waterstof heeft een bijna drie keer zo hoge energiedichtheid als benzine. In het artikel is niet duidelijk of het waterstofgas of vloeibare waterstof betreft. Voor het onderzoek is aangenomen dat het hier gaat om waterstof in de vloeibare vorm. Daarom zijn voor lange afstanden van meer dan 600 km, kleinere accu's en tanken binnen 3 minuten mogelijk. Voor een afstand van 100 km is ongeveer 1 kg waterstof nodig, zodat slechts 5-6 kg waterstof als brandstof hoeft te worden opgenomen per tankbeurt.

Aanvullend daarop verteld (Huizen, 2018) dat volgens een van de experts op het gebied van waterstoftechnologie Klaas Visser de waterstof technologie gekwalificeerd wordt als bijna te mooi om waar te zijn. Dit geldt als er zaken zoals veiligheid, regelsnelheid en installatie kosten niet meegenomen worden. Visser: “Bij het gebruik van waterstof komen geen schadelijke emissies als broeikasgassen, zwavel, roet, NOx en fijnstof vrij. En de brandstofcel heeft een hoge efficiency, een laag brandstofverbruik en is stil in het gebruik. Ook heeft de brandstofcel minder, en geen bewegende onderdelen. De brandstofcel is dus in feite solid state en in potentie onderhoudsvrij. Dat betekent minder kosten voor onderhoud. In vergelijking met de huidige brandstofmotoren is voor de brandstofcel minder serieproductie nodig. Hierdoor is het sneller te implementeren. Ook al omdat de PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) brandstofcel al beschikbaar is in auto's.” De emissies die vrijkomen tijdens het produceren van brandstofcellen en windmolens worden niet

verder meegenomen in dit onderzoek. Het potentieel voor onderhoudsvrij brandstofcel heeft belang voor de opkomende autonome vaart, maar valt buiten de scope van dit onderzoek.

Verder daarop ingaand wordt door (EG&G technical services, 2004) aangegeven dat er meerdere brandstofcellen bestaan in verschillende stadia van ontwikkeling. De meest voorkomende indeling van brandstofcellen is in het gebruikte type elektrolyt in de cellen. Grofweg bepaalt de elektrolytkeuze op welk temperatuurbereik de brandstofcel zal werken. Het temperatuurbereik en nuttige levensduur van een brandstofcel bepalen de fysisch-chemische en thermo-mechanische eigenschappen van de gebruikte materialen in de onderdelen van de cel (bijvoorbeeld de elektroden, elektrolyt, etc.) Een lijst van de verschillende type brandstofcellen is te zien in tabel 7.

Tabel 7 Soorten brandstofcellen (EG&G technical services, 2004)

| Lage temperatuur brandstofcellen:                                                                                      | Hoge temperatuur brandstofcellen:                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| AFC: Alkaline Fuel Cell (alkalische brandstofcel)                                                                      | PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell (fosfor zure brandstofcel)          |
| DBFC: Direct Borohydride Fuel Cells                                                                                    | PCFC: Protonic Ceramic Fuel Cell                                    |
| DMFC: Direct Methanol Fuel Cell (direct methanol brandstofcel - genoemd naar de brandstof in plaats van de elektrolyt) | MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell (gesmolten carbonaat brandstofcel) |
| FAFC: Formic Acid Fuel Cell                                                                                            | SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (vaste-oxidebrandstofcel)               |
| PEM FC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell of Polymer Electrolyte Fuel Cell (vaste polymeer brandstofcel)              |                                                                     |
| Omkeerbare brandstofcel                                                                                                |                                                                     |
| Redox Fuel Cell                                                                                                        |                                                                     |
| Zinc Fuel cell                                                                                                         |                                                                     |
| MFC: Microbial Fuel Cell (bio brandstofcel)                                                                            |                                                                     |

### De onderlinge voor- en nadelen van brandstofcellen

Volgens een onderzoek gedaan door (Andrijanovitš, Egorov, Lehtla, & Vinnikov, 2010) hebben brandstofcellen een aantal uitdagingen dat overwonnen dienen te worden door ontwikkelaars om deze te verbeteren. In deze paragraaf worden een paar algemene minpunten van brandstofcellen benoemd namelijk:

- Een lage uitgangstroom: Zoals al eerder in dit paragraaf benoemd, is het benodigd om brandstofcellen in een zogeheten stack aan te bieden anders is er te weinig geleverde stroom beschikbaar.
- Grote spanningsverschillen: Het vermogen of stroom dat door een brandstofcel gaat dient binnen een bepaalde marge gehouden te worden, anders kan de brandstofcel beschadigd raken.
- Trage dynamische reactie: Brandstofcellen hebben een lange opstarttijd door de vertragingen die veroorzaakt worden door elektrochemische reacties. Een batterij heeft daarentegen geen vertraging.
- Laag rendement met hoge piekstroom: Voorkomende piekstromen in de brandstofcel moeten lager gehouden worden dan 5% van de nominale waarde. Dit om zo min mogelijk de conditie van de brandstofcel te beïnvloeden.

Verder worden in tabel 8 de voor- en nadelen van de verschillende brandstofcellen ten opzichte van elkaar weergegeven.

Tabel 8 Voor- en nadelen verschillende brandstofcellen

| Type of Fuel Cell        | Application                                                                              | Advantages                                                                                                                                                 | Limitations                                                                                                     | Status                                                                                  |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Proton Exchange Membrane | Cars, buses, portable power supplies, medium to large-scale stationary power generation. | Compact design; relatively long operating life; adapted by major automakers; offers quick start-up, low temperature operation, operates at 50% efficiency. | High manufacturing costs, needs pure hydrogen; heavy auxiliary equipment and complex heat and water management. | Most widely developed; experimental production.                                         |
| Alkaline                 | Space (NASA), terrestrial transport (German submarines).                                 | Low manufacturing and operation costs; does not need heavy compressor, fast cathode kinetics.                                                              | Large size; needs pure hydrogen and oxygen; use of corrosive liquid electrolyte.                                | First generation technology; gains interest due to low operating cost.                  |
| Molten Carbonate         | Large-scale power generation.                                                            | Highly efficient; utilizes heat for co-generation.                                                                                                         | Electrolyte instability; limited service life.                                                                  | Well developed; semi-commercial.                                                        |
| Phosphoric Acid          | Medium to large-scale power generation.                                                  | Commercially available; lenient to fuels; heat for co-generation.                                                                                          | Low efficiency, limited service life, expensive catalyst.                                                       | Mature but faces competition from PEM.                                                  |
| Solid Oxide              | Medium to large-scale power generation.                                                  | High efficiency, lenient to fuels, takes natural gas directly, no reformer needed. Operates at 60% efficiency; co-generation.                              | High operating temp; exotic metals, high manufacturing costs, oxidation issues; low specific power.             | Least developed. Breakthroughs in cell material and stack design sets off new research. |
| Direct Methanol (DMFC)   | Suitable for portable, mobile and stationary applications.                               | Compact design, no compressor or humidification needed; feeds directly off methanol.                                                                       | Complex stack structure, slow load response, operates at 20% efficiency.                                        | Laboratory prototypes.                                                                  |



Dit onderzoek zal zich richten op de zogenaamde vaste-polymeer-brandstofceltype (PEMFC in het Engels). Volgens (Baert, 1999) wordt het zogenaamde PEMFC op het ogenblik beschouwd als de meest geschikte variant voor transportdoeleinden. Deze brandstofcel is opgebouwd uit twee poreuze elektroden die gescheiden worden van elkaar door een kunststofmembraan dat in vochtige toestand positief geladen waterstofatomen en protonen doorlaat. Waterstofgas wordt aangevoerd naar de negatieve elektrode. Het feit dat de PEMFC-waterstof brandstofcel geen schadelijke gassen uitstoot maakt het een zeer interessante variant. Daarnaast is het hoge theoretische ketenrendement, dat aanzienlijk hoger is dan wat de verbrandingsmotor in de praktijk presteert. Met ketenrendement wordt het rendement van de hele keten bedoeld bijvoorbeeld: vanaf windstroom naar gas naar stroom.

### Hoe is waterstof duurzaam als energiedrager?

Nederland bevindt zich op dit moment midden in een energietransitie. Zo geeft (van der Ent, 2019) aan dat waterstof een veelzijdige energiedrager is en het een belangrijk rol kan spelen hierin. Hoe duurzaam waterstof is, is afhankelijk van de wijze waarop deze wordt geproduceerd. Er bestaan namelijk drie productiemethoden om waterstof te verkrijgen. Hier zal gekeken worden naar het verschil tussen grijze, groene en blauwe waterstof:

- Grijze waterstof

Als de elektriciteit die nodig is voor het maken van waterstof afkomstig is uit fossiele energieproductie, dan spreken we van grijze waterstof. Er komt tijdens deze methode nog steeds (evenveel) Co<sub>2</sub> vrij.

- Blauwe waterstof

Als de vrijgekomen Co<sub>2</sub> echter wordt opgevangen of opgeslagen dan spreken we van blauwe waterstof. Blauwe waterstof wordt op dit moment gebruikt voor vervoer en delen van onze industrie. De vrijgekomen Co<sub>2</sub> wordt opgevangen in lege gasvelden.

- Groene waterstof

De meest duurzame vorm van waterstof produceren is namelijk groene waterstof. De elektriciteit die gebruikt wordt om waterstof te produceren, is dan afkomstig van hernieuwbare energiebronnen, zoals windenergie of zonne-energie. Bij groene waterstof komt geen Co<sub>2</sub> vrij. In dit onderzoek wordt de groene waterstof meegenomen als de meest geschikte variant bij het emissieloos varen.

### Accu's

- Lood calcium (DMA-accu)

Bij deze accu's bestaan de positieve als de negatieve platen uit een lood/calcium legering waardoor de zelfontlading minimaal is. Het herladen van een volle accu is pas nodig na 6 maanden. Deze accu's worden onderhoudsvrij genoemd doordat het niet mogelijk is om ze met vloeistof bij te vullen. Het is bij deze accu's nadelig om ze langdurig leeg te laten, of te diep te ontladen.



- AGM

Absorbent Glass Mat (AGM) accu's zijn meer geschikt voor het leveren van hoge stroom gedurende een korte tijd. Dit kan gebeuren doordat ze beschikken over een zeer lage interne weerstand. In vergelijking met de Lood calcium accu's zijn deze accu's wat duurder in aanschaf, maar ze kunnen er beter tegen als ze wat dieper ontladen worden.

- Lithium

Deze accu's worden gezien als de accu van de toekomst, dit is doordat ze snel te laden zijn en bijna geheel ontladen mogen worden. Doordat het gevaarlijk is om deze accu's te ver te laten ontladen beschikken ze over een Battery Monitor System (BMS). Een voordeel ten opzichte van de andere twee accu's is dat bij deze accu's het zelfs mogelijk is om de levensduur te verlengen door de accu gedeeltelijk in plaats van volledig op te laden. Het enige grote nadeel is de prijs.

### **Zonnepaneel**

Een zonnecel zet licht van een kustmatige lichtbron of van de zon om in elektriciteit. De opbouw van een zonnecel bestaat uit twee lagen met ieder een ander eigenschap. Beide lagen bevatten silicium of een andere halfgeleidende stof. Het deel van de zonnecel dat blootgesteld wordt aan de zon zal gemixt worden met een stof die ervoor zorgt dat dit deel negatief geladen wordt. Het deel dat niet met de zon in aanraking komt zal gemixt worden met een stof die ervoor zorgt dat deze positief geladen wordt. Door deze opstelling zal er op de scheidingslijn van deze twee delen een uitwisseling van moleculen plaatsvinden, namelijk van moleculen met een elektronentekort en elektronen die een molecuul zoeken met een elektronentekort. Door deze uitwisseling zal er een elektrisch veld ontstaan. Wanneer er (zon)licht op de cel valt zal dat deel elektronen losslaan van de halfgeleidende stof. Deze stof wil in evenwicht komen door in aanraking te komen met de stof met te weinig elektronen. Het elektrische veld dat hiertussen ontstaat hindert dit proces echter. Door het plaatsen van een weerstand tussen de twee delen zullen de elektronen van de stof met tekort aan elektronen naar de stof gaan met te veel elektronen waardoor een stroom ontstaat. Deze stroom is vervolgens bruikbaar.

Op de markt en in ontwikkeling zijn er een aantal verschillende zonnepanelen. De fotovoltaïsche cel ook wel PV-cel genoemd is de meest gebruikte zonnecel. De vier meest gebruikte varianten die op de markt beschikbaar zijn zullen hier beschreven worden. In tabel 9 staan de eigenschappen van de verschillende zonnepanelen op een rij.

- Monokristallijnen zonnepanelen

Dit zijn zonnepanelen waar het silicium dat gebruikt wordt uit één groot kristal bestaat. In vergelijking met de andere types zijn deze duur in aanschaf, maar ze hebben het hoogste rendement. Dit kan oplopen tot 17%. (Contany, 2014)

- Polykristallijnen zonnepanelen

Een zonnecel van dit type bestaat uit meerdere Silicium kristalen. Het gevolg hiervan is dat het rendement lager is dan van de monokristallijnencellen omdat er minder elektriciteit opgewekt wordt doordat de gebruikte kristalen van grote verschillen. Een voordeel is wel dat deze zonnecellen

goedkoper zijn om te maken dan de monokristallijnencellen. Overeenkomend met de monokristallijnencellen is dat ze beiden een levensduur hebben van 15 tot 25 jaar. (Redasolar, 2017)

- Dunne film (amorfe zonnecellen) zonnepanelen

Het rendement van deze panelen bedraagt tussen de 6 en de 10% en deze bestaan uit een dunne film van amorf (minder dan een nanometer) Silicium. Door deze eigenschap is het mogelijk bij buigbare toepassingen. Het is gebruikelijk om deze panelen toe te passen voor grotere oppervlakken doordat de kosten voor het maken van deze type zonnecel een stuk minder zijn. Een nadeel is dat ze minder lang meegaan dan de voorheen benoemde typen. Deze type wordt vaak toegepast bij systemen die weinig vermogen nodig hebben. Zoals bijvoorbeeld horloges en eenvoudige rekenmachines. Toch kunnen ze gebruikt worden bij grote PV-installaties. (Contany, 2014)

- Koper Indium Gallium Selinde Zonnepanelen

Deze panelen bestaan uit verschillende soorten metalen. Wordt ook wel aangeduid als Copper Indium Gallium Selenide (ofwel CIGS) in het Engels. Elk type metaal heeft een andere golflengte waar die op reageert. Door deze verschijnsel is de opbrengst van deze panelen in de winter hoger dan bij andere zonnepanelen. Het gevolg hiervan is dat de uiteindelijke jaarlijkse opbrengst hoger kan uitvallen dan andere type zonnepanelen. Momenteel zijn dit type zonnepanelen echter nog duur en zal dit in de toekomst af moeten nemen. (Woonbewust, 2019). In figuur 4 is een vergelijking van 3 van de benoemde types zonnepanelen op een rij.



Figuur 4 Type zonnepanelen (Woonbewust, 2019)

Tabel 9 Zonnepaneel eigenschappen (Woonbewust, 2019)

|                                  | Mono-kristallijn                                | Polykristallijn                       | Amorf / Dunne film                                     | CIGS                                                            |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Rendement</b>                 | 14 – 20 %                                       | 12 – 16 %                             | 6-10 %                                                 | 13 – 15 %                                                       |
| <b>Zwaklicht</b>                 | Verlies bij diffuus licht                       | Verlies bij diffuus licht             | Weinig verlies                                         | Weinig verlies                                                  |
| <b>Thermisch gedrag</b>          | Verlies bij hoge temperaturen                   | Verlies bij hoge temperaturen         | Weinig verlies                                         | Weinig verlies                                                  |
| <b>Kosten</b>                    | Duurder dan polykristallijn en dunne film       | Goedkoper dan monokristallijn en CIGS | Goedkoper dan monokristallijn, polykristallijn en CIGS | Vooralsnog duur                                                 |
| <b>Lange termijn</b>             | Zeer hoge prestaties, stabiel, lange levensduur | Lange levensduur                      | Meer opbrengst, iets kortere levensduur                | Hogere opbrengst in de winter (geen lange termijn tests bekend) |
| <b>Gewicht per m<sup>2</sup></b> | Hoger                                           | Hoger                                 | Lager                                                  | Lager                                                           |
| <b>Gevoeligheid storingen</b>    | Zeer klein                                      | Zeer klein                            | Klein                                                  | Klein                                                           |

### Elektrische aandrijving

- DC permanent magneet motor

Een gelijkstroommotor wordt beschreven als een motor waarin gelijkstroom omgezet wordt in mechanische energie. De werking van deze motoren berust op de lorentzkracht die een stroom voerende geleider ondervindt in een magnetisch veld. De lorentzkracht is de kracht die op een lading wordt uitgeoefend door een elektromagnetisch veld. Elektromotoren hebben een wisselend veld nodig om te kunnen werken. Daarom wordt er bij een gelijkstroommotor mechanisch met behulp van een commutator de richting van het magnetisch veld veranderd. De belangrijkste eigenschap van deze type motor is dat de draaisnelheid op een eenvoudige manier geregeld kan worden. Door dit verschijnsel zijn deze motoren met name geschikt voor regelbare elektrische aandrijvingen. De DC permanent magneet motor heeft een redelijk rendement dat bij vollast zelfs tot 90% op kan lopen. Bij lagere toerentallen zal dit duidelijk dalen.

De motor heeft koolborstels die voor slijtage zorgen.

Heeft een hoog toerental die oploopt vanaf 2000 tot 5500 rotatie per minuut (rpm).

Een laag koppel waardoor het vaak hoogtoerig is in combinatie met een reductie kast.

De motor is niet dicht waardoor het gevoelig is voor vocht inwerking.

- DC permanent magneet disc motor

De DC permanent magneet disc motor heeft een hoger rendement in vergelijking met de vorige motor die bij vollast tot wel 91% op kan lopen, maar bij een lager toerental zal dit net zoals de vorige motor type duidelijk dalen. De motor heeft koolborstels die na ongeveer 3000 uur vervangen dienen te worden.

De grote motordiameter zorgt ervoor dat er een hoog koppel ontstaat.

De motor maakt bij een toevoer spanning van 24 volt 1120 rpm en bij 36 volt 1700 rpm, het is laagtoerig en geschikt voor elektrisch varen.

De motor is open en is zonder extra bescherming dus hierdoor kwetsbaar voor vocht.

- A-synchroon motor

De A-synchrone motor is een borstelloze asynchrone elektromotor, gevoed door een 3-fasenwisselspanningssysteem. De motor wordt ook wel draaistroommotor of omgekeerde synchrone motor genoemd. Een groot voordeel van dit type elektromotor is de onderhoudsvrije (geen koolborstels en commutator) en compacte constructie. Asynchrone motoren worden overal toegepast in de aandrijftechniek en ook bij zware machines en tractie-installaties van treinen, trams, metro's en trolleybussen maar ook voor het elektrisch varen is het een goede motor. Door hun aanloopgedrag moeten hier dan wel speciale aanloopschakelingen worden toegepast. Bij het elektrisch varen worden hiervoor frequentieregelaars gebruikt.

Motor heeft een rendement van ca. > 87%, (Afhankelijk van bouwgrote, Hoe groter de diameter / vermogen hoe hoger het rendement) dit gunstige rendement blijft over een groot deel van het toerenbereik gelijk.

De AC- motor heeft geen koolborstels, en is daarmee volledig onderhoudsvrij en ook bijna helemaal stil.

De motor is helemaal gesloten (volgens de IP54 normen) en daarmee dus ongevoelig



voor de inwerking van stof, zout en vocht.

Het af te geven vermogen is in principe onbegrensd.

De motoren zijn verhoudingsgewijs groter en zwaarder.

De motor kan bij verhoudingsgewijs lage toerentallen (800 rpm) al z'n volle vermogen leveren. Dit is met name voor elektrisch varen van belang omdat dit gunstig is voor het schroefrendement.

#### - Synchronmotor

De synchronmotor is een elektrische draaistroommotor. De rotor draait in tegenstelling tot de asynchrone draaistroommotor synchron of in de pas met het opgewekte draaiveld in de stator. De synchrone motor wordt het meest gebruikt als generator in het stroomnet maar ook voor elektrisch varen kom je het veel tegen.

Synchrone permanent magneet motor.

Een rendement tot wel 95% en de motor is verhoudingsgewijs zeer compact en licht van gewicht.

Daarmee zijn ze ook zeer geschikt voor toepassing in POD's.

Niet stil veroorzaken een hoge pieptoon die niet of nauwelijks weg kan worden gefilterd.

Motoren zijn hoogtoerig, reductie of halvering van capaciteit is vaak het gevolg.

Tevens gaat het voltage bij hoge vermogens omhoog op dit moment is 20Kw de grens bij 48Volt maar dient er wel een reductie van 3:1 te worden toegepast.

Frequentie gestuurde toerenregeling is uiterst complex en dus nog kostbaar.

De motoren zijn thans beschikbaar in vermogens tot en met ettelijke tientallen kW's.

Bij vermogens vanaf + 10 kW worden ze veelal vloeistof gekoeld, en dienen te worden gecombineerd met een warmtewisselaar en 2 pompen (1 x Koelvloeistof en 1 x buiten water).

## Opslag

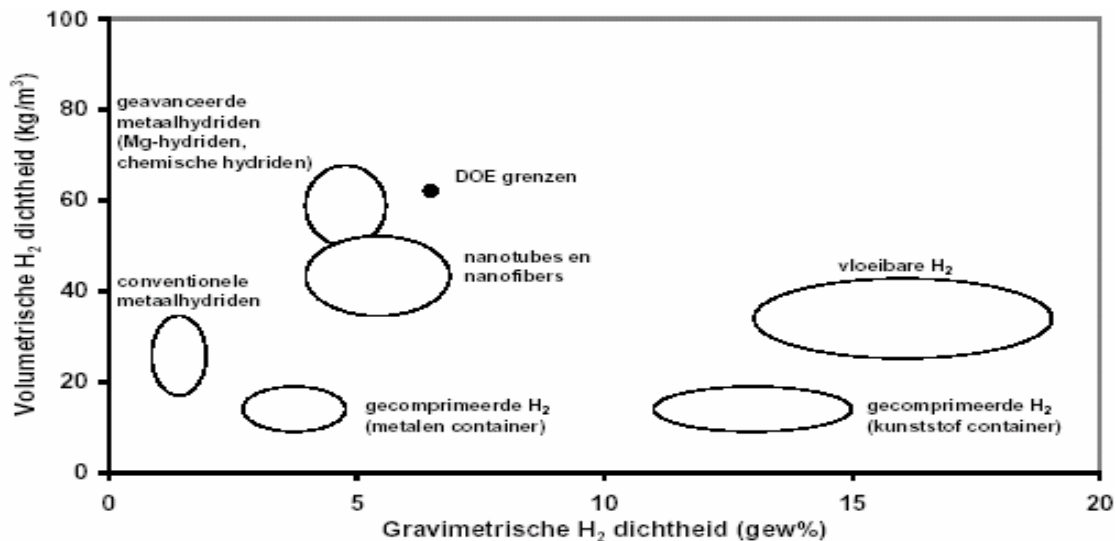
Nadat er gekeken is naar de verschillende stroomvoorziening en daaropvolgend diverse voortstuwingen, wordt er in dit paragraaf een nader blik geworpen op de beschikbare opslagmogelijkheden voor waterstof als energiedrager. De opslagtank voor dieselolie, en de ruimte nodig voor accu's worden niet in dit onderzoek verder behandeld.

### Opslag waterstof

Het opslaan van de geproduceerde waterstof is voor de huidige technologie nog een uitdaging. Er bestaan verschillende methoden die een mogelijke oplossing bieden voor dit probleem met de beschikbare technologie. In een vorige paragraaf is gekeken naar zonnepanelen als eventuele opwekking voor waterstofgas. Echter is momenteel de meest voorkomende opslagmethode voor waterstof in druktanks. In dit paragraaf zal er gekeken worden naar dit opslagmethode samen met andere technieken die mogelijk een oplossing kunnen bieden. Volgens een onderzoek gedaan door (Hoogenraad, 2004) ligt de uitdaging bij de relatief kleine energiedichtheid per volume-eenheid van waterstof om zoveel mogelijk waterstof op te slaan in een tank die geschikt is voor

transportdoeleinden. Het opslagmedium dient licht, compact, betrouwbaar en veilig te zijn. De actieradius staat in direct verband met de uiteindelijke hoeveelheid beschikbare waterstof.

Er is gebleken dat waterstof een hoge energiedichtheid heeft op basis van gewicht. Onder normale omstandigheden komt het voor in gas vorm, waardoor het een lage energiedichtheid per volume-eenheid heeft. Dit wil zeggen dat het opslaan van waterstof een grotere uitdaging met zich meebrengt dan de opslag van vloeibare energiedragers. Om een voorbeeld te nemen uit de auto-industrie, United States Department of Energie (DOE) heeft doelstellingen gesteld voor de volumetrische en gravimetrische dichtheid van het opslagmedium van een personenauto met brandstofcel om een bereik te hebben van 500 km: 6,5 vol% H<sub>2</sub> en 62 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Volumetrische dichtheid is de hoeveelheid waterstof per volume-eenheid, en gravimetrische dichtheid is de hoeveelheid energie per kilogram systeemgewicht. In figuur 5 is een overzicht te zien van de volumetrische en gravimetrische dichtheid van opslagmediums.



Figuur 5 volumetrische en gravimetrische H<sub>2</sub> dichtheid (Reijers, Groot, & Lako, 2001)

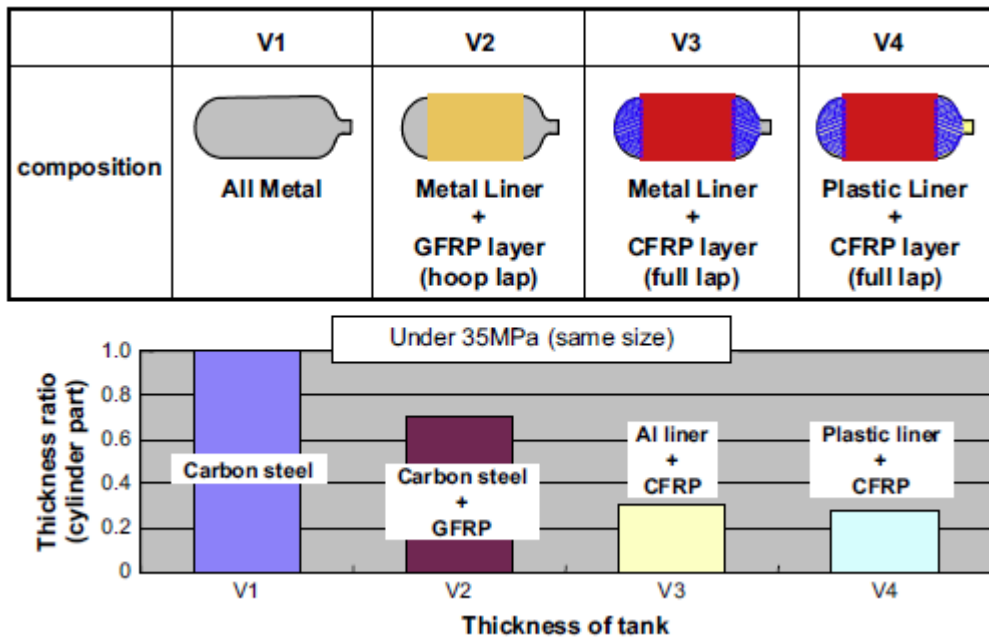
De mogelijkheden die beschikbaar zijn met de huidige technologie zullen in bijlage 2 verder besproken worden.

### Opslag waterstof

- Waterstof onder druk

Volgens de (NAS, 2004) wordt waterstof onder druk in stalen cilinders of cilinders die uit composietmateriaal bestaan opgeslagen. De gravimetrische dichtheid van traditionele stalen tanks die gevuld zijn met waterstof bedragen iets meer dan 1%. De modernere cilinders zijn gemaakt van aluminium dat gewikkeld is in koolstofvezels, welke onder een druk van 24,8 MPa een gravimetrische dichtheid kennen van 2%. De laatste ontwikkelingen op het gebied van composietmaterialen voor opslagtanks heeft geresulteerd in een tank met een gravimetrische dichtheid van 12% bij een druk van 70MPa. De energie dat nodig is om waterstof onder een druk te brengen van 34,5 MPa is 4 tot 8% van het energiegehalte van waterstof.

Verder daarop ingaand wordt in een artikel geschreven door (Mori & Hirose, 2008) verteld dat de meeste voertuigen dat op het ogenblik in de test fase zitten uitgerust zijn met een tank bestaande uit composietmaterialen. Er is hiervoor gekozen voor de simpele structuur en laad en ontlad gemak. Hogedruk tanks kunnen verder onderverdeeld worden in vier categorieën. In figuur 6 zijn de wanddiktes van de verschillende tanks te zien. De meest gebruikte categorieën zijn de koolstof composiet (carbon composite) V3 en V4.



Figuur 6 Wanddiktes verschillende tanks (Mori & Hirose, 2008)

#### - Vloeibaar waterstof

Waterstof kan in vloeibare vorm opgeslagen worden in goed geïsoleerde tanks bij een temperatuur van -253 graden Celsius en een druk van 0,1 MPa. Bij een hogere temperatuur en dezelfde druk is waterstof een gas. Er is ongeveer 30% van de energie aanwezig in de energiedrager om de waterstof tot dit temperatuur te koelen. Ter vergelijking bevat vloeibaar waterstof drie keer zoveel energie per liter als conventionele benzine. Dit type opslag wordt vanwege de goede karakteristieken voor dit type gebruik voornamelijk in de ruimtevaart gebruikt. (Kruse, Grinna, & Buch, 2002)

Tanks bedoeld voor vloeibare waterstof bestaan uit een dubbele wand, om de zeer lage temperatuur te behouden. De zogenaamde ‘boil-off’ vormt een groot probleem voor de opslag in deze vorm. Dit is het gedeelte van de opgeslagen waterstof dat door onvermijdelijke opwarming van de tank verdampt. Als de druk in de tank een bepaalde grens overschrijdt moet een gedeelte van de waterstof in gasvorm kunnen ontsnappen. Echter heeft de nieuwste tank een mogelijkheid om de warmte wisseling te beperken tot een paar watts per seconde, en hierdoor de vloeibare waterstof verlies te beperken tot een paar procent per dag. (Mori & Hirose, 2008)

#### - Waterstof opslag in gebonden vorm

Voor deze opslagmethode zijn er tot nu toe de volgende materialen geschikt om waterstof in gebonden vorm op te slaan:

- Metaal hydriden

In metaal hydriden vindt absorptie in de metaalstructuur plaats. Er komt warmte vrij bij het vullen van de tank. Om de tank te legen is warmtetoevoer nodig, hiervoor wordt de eventueel opgeslagen warmte dat vrijgekomen is tijdens het vullen van de tank gebruikt. Hoge-temperatuur metaal hydriden hebben een hoge desorptietemperatuur ( $150^{\circ}$ - $300^{\circ}$  C). Deze systemen kunnen hogere volumetrische dichtheden behalen dan vloeibaar opgeslagen waterstof, terwijl de gravimetrische dichtheid laag is. Naast de hoge-temperatuur hydriden zijn er lage-temperatuur hydriden. Deze hydriden hebben een desorptietemperatuur van  $20^{\circ}$ - $90^{\circ}$  C maar, zijn zwaar eisen veel ruimte en beschikken over een lage gravimetrische dichtheid. Onderzoek richt zich momenteel op een metaal hydride opslag met opslageigenschappen die over lage werktemperaturen beschikken en potentie hebben voor transporttoepassingen. (Hoogenraad, 2004)

- Chemische hydriden

De volgende methode zijn de chemische hydriden, waarin door middel van hydrolyse waterstof wordt opgeslagen. Hydrolyse is de ontbinding van organische mengsels door interactie met water. Een paar hydrides die hiervoor geschikt zijn: LiH,  $\text{LiBH}_4$ ,  $\text{NaBH}_4$ . Chemische opslagmediums van waterstof vereisen een goede verwerking van de gebruikte materialen doordat deze niet hervulbaar zijn. Dit zou door opslag in het systeem zelf of bij een centraal verwerkingspunt kunnen gebeuren. Deze systemen kunnen in theorie een gravimetrische dichtheid van 5 tot 8,5% behalen. (Hoogenraad, 2004)

- Koolstof Nano structuren

Als laatste optie zijn er koolstof nanoverbindingen voor de opslag van waterstof in gebonden vorm. Deze structuren zijn in staat relatief grote hoeveelheden waterstof te absorberen door het grote specifieke oppervlak van koolstofstructuren. Twee methodes die nog zitten in de fase van ontwerp en ontwikkeling met mogelijkheden op commercialisering op de lange termijn zijn nanofibers en nanotubes. Dit zijn twee soorten nanoverbindingen die poriën hebben van ongeveer één nanometer. Nanofibers hebben spleetvormige poriën en nanotubes hebben buisvormige poriën. De voornaamste barrière van nanotubes zijn de productiekosten. Bij nanofibers zijn ook gebonden aan hoge productie kosten, maar een ander struikelblok is de reproduceerbaarheid van gemeten waterstofopnamen. De studies zijn nogal tegenstrijdig in wat er ondervonden is. Sommige studies wijzen uit een gravimetrische dichtheid van 10 % en meer te hebben gehaald terwijl andere studies meer tegenvallende resultaten hebben gevonden. (Hoogenraad, 2004)

- Afweging van de opslagmethodes

Van de boven vermelde methodes zijn de opslag onder druk en vloeibare opslag de twee methodes die direct toepasbaar zijn, maar hebben beide nadelen die onderzoek naar andere methodes stimuleren. De andere methodes zullen niet op de korte termijn worden ingezet, maar gezien het doel om pas voor 2050 emissie loos te varen hebben deze methodes de potentie een commerciële status te bereiken. In tabel 10 is een overzicht te zien van de verschillende opslagmethodes en hun voor- en nadelen. (Hoogenraad, 2004)

Tabel 10 Voordelen en nadelen opslagmethodes (Hoogenraad, 2004)

| Opslagmethode           | Kansen                                                                                                                                              | Knelpunten                                                                                                                                                                      |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Opslag onder druk       | Bewezen technologie tot een druk van 200 bar; algemeen toegepast; kan tegen lage kosten                                                             | Kleine hoeveelheden waterstof bij 200 bar; bij hoge druk vergelijkbaar met vloeibare opslag, maar nog lager dan benzine en diesel; hoge druk opslag nog in ontwikkeling         |
| Vloeibare opslag        | Bewezen technologie; goede opslagcapaciteit haalbaar                                                                                                | Zeer lage temperaturen vereisen zeer goede isolatie; mogelijk hoge kosten; boil-off; energieverlies bij vloeibaar maken waterstof; opslagcapaciteit lager dan benzine en diesel |
| Metaal hydriden         | Enige technologie beschikbaar; opslag in vaste vorm; vorm aan te passen; thermische effecten kunnen in andere systemen gebruikt worden; zeer veilig | Zwaar; kunnen verweeren; momenteel duur; vullen vereist een koelsysteem                                                                                                         |
| Chemische hydriden      | Algemeen bekende omkeerbare hydride formatie reactie; compact                                                                                       | Knelpunten in de verwerking van afvalmateriaal en de vereiste infrastructuur                                                                                                    |
| Koolstof nanostructuren | Potentieel grote opslagcapaciteit; licht; mogelijk lage kosten                                                                                      | In ontwikkeling; eerdere verwachtingen blijven on vervuld                                                                                                                       |

### Externe factoren die van invloed kunnen zijn?

Bij het overwegen van de keuze om een op waterstof gebaseerde aandrijving in gebruik te nemen zijn er bepaalde externe factoren dat van invloed kunnen zijn in deze beslissing of invloed kunnen hebben op het functioneren van dit systeem. Er bestaat de mogelijkheid om waterstof te binden aan een andere stof. Waterstof zou dan onder atmosferische omstandigheden kunnen worden opgeslagen en vervoerd. Een aantal oplossingen zijn:

- ✓ Mierenzuur
- ✓ Ammoniak
- ✓ Natriumboorhybride

Deze mogelijkheden worden niet verder toegelicht in dit onderzoek. In dit onderzoek zal er alleen gekeken worden naar de tanks onder druk als uitdaging.

Daarentegen vertelt (Precision, 2019) dat er nog vier grote uitdagingen de waterstofproductie nog in de weg staan. Deze worden hieronder verder besproken:

- Vergroting elektrolyse oppervlak

Voordat de waterstof gebruikt kan worden is er energie nodig om water te splitsen in waterstof en zuurstof. Dat kan gebeuren met behulp van duurzame energie geproduceerd door bijvoorbeeld zonnepanelen. Doordat er veel waterstof nodig is om een kilo gas te produceren, of brandstofcellen te voeden, is een belangrijke technische uitdaging het vergroten van het elektrolyse oppervlak.

Nieuwe type waterstofelektroden met een veel groter actief elektrolyse-oppervlak zijn ontwikkeld bij een academisch onderzoek dat uitgevoerd is op de Technical University Denmark. Innovatieve materialen waarmee het elektrolyse-oppervlak aanzienlijk te vergroten is worden ontwikkeld binnen bedrijven en in andere landen.



- Industrialisatie waterstofproductie

Het industrialiseren van de productie van waterstof is een andere uitdaging om het als efficiëntere energiedrager te gaan toepassen. Onder andere Nederland heeft daarvoor al concrete initiatieven op gang gezet. Een voorbeeld is de investeringsagenda Noord-Nederland dat bestaat uit ruim 30 projecten waarvan een aantal al is opgestart. Steeds meer projecten worden ook internationaal opgestart voor industriële waterstofproductie, om aan de toenemende marktvraag naar waterstof te kunnen voldoen. Een ander Nederlands industrialisatieproject is de 'Gigawatt Elektrolysefabriek' waar onderzoeksinstituut TNO met een aantal partners aan werkt. Dit project is gericht op het opschalen van grote aantallen brandstofcellen voor het winnen van duurzame waterstof uit wind- en zonne-energie, tot een fabriek die kan concurreren met het winnen van waterstof uit fossiele brandstoffen.

- Nieuwe materialen en onderdelen ontwikkelen

Zowel nieuwe materialen als onderdelen moeten ontwikkeld, getest en geproduceerd voor de industriële productie van waterstof als duurzame energiedrager is een derde uitdaging. Een relatief onbekend materiaal dat wordt ingezet voor elektrolyse is het gepatenteerde  $Ni-E^3$  van Veco Precision. Dankzij een oppervlaktevergroting met een factor zes tot maximaal veertien, maakt dit materiaal de productie van waterstof aanzienlijk efficiënter. Samenwerking tussen alle betrokken partijen is noodzakelijk

Voor het opschalen en industrialiseren van zowel de waterstofproductie als benodigde brandstofcellen met een grotere capaciteit. Internationale, nationale en lokale overheden, onderzoeksinstituten, bedrijven die nieuwe materialen en onderdelen kunnen ontwikkelen en natuurlijk de energieleveranciers.

- Kostprijsverlaging

Een vierde uitdaging is het verder verlagen van de kostprijs van waterstof geproduceerd met duurzame energiebronnen. Er is namelijk ongeveer drie keer zoveel volume aan waterstof nodig in vergelijking met aardgas, om dezelfde energetische waarde te kunnen leveren. Uit verschillende onderzoeken blijkt dat over enkele jaren de prijs voor het maken van duurzame waterstof al vergelijkbaar of zelfs lager wordt dan de fossiele variant. Behalve de genoemde mogelijke efficiencyverbeteringen en schaalvergroting van de waterstofproductie, gaan daar de komende jaren ook prijsdalingen van zonnepanelen, windturbines en elektrolyzers aan bijdragen.

Tenslotte gaat het snelgroeijende aantal waterstoftoepassingen zorgen voor verdere kostprijsverlaging. Een toenemende vraag maakt het namelijk interessanter om te investeren in schaalvergroting en innovaties die de kostprijs verlagen. Terwijl er in Europa nog maar enkele honderden personenauto's, bussen en vrachtwagens op brandstofcellen gevoed door waterstof rondrijden, wil China in 2025 al naar zo'n vijftigduizend. Verder werkt het Nederlandse FELMAR-consortium aan een binnenschip dat op waterstof gaat varen en krijgt het Olympische dorp van de Olympische Spelen 2020 in Tokyo een complete waterstofinfrastructuur. Voor alle bedrijven die kansen zien om in te spelen op de toekomstige waterstofeconomie is Veco Precision graag een ontwikkel-, productie- en sparringpartner.

## Energiesystemen

### Lokaal energie opwekken

#### Voordelen

- De geproduceerde stroom is gratis: De opgewekte stroom is gratis als de installatiekosten buiten beschouwing worden gelaten.
- Milieubewust: Als de zonnepanelen op een milieubewuste wijze geproduceerd worden zal deze punt kloppen. Er ontstaat bij het produceren van stroom geen schadelijke uitlaatgassen.
- Veiligheid: Het proces van energie opwekken met behulp van zonnepanelen wordt als veilig gezien mits de bijgeleverde richtlijnen gevolgd worden.
- Weinig onderhoud: Doordat het zonnepaneel niet beschikken over bewegende onderdelen vindt er weinig tot geen slijtage plaats tijdens het gebruik. Het enige benodigde is een regelmatige schoonmaakbeurt.
- Lange levensduur: Zonnepanelen hebben een gemiddelde levensduur van tussen de 10 en 20 jaar.

#### Nadelen

- Correcte plaatsing: Als het niet mogelijk is om erbij te kunnen zorgt dit voor een waarschijnlijk ongunstige plaatsing van de panelen. De zon hoeft immers niet altijd op de panelen te schijnen om stroom op te kunnen wekken.
- Controle en schoonmaken: De zonnepanelen dienen regelmatig gecontroleerd en schoongemaakt te worden, het is aangeraden om dit te doen met een zachte doek met water.
- Rendement afname: Het blijkt dat het rendement van de zonnepanelen met de loop der jaren afneemt. De hoeveelheid rendement afname per jaar is afhankelijk van de kwaliteit van de zonnepanelen.

### Accu's gekoppeld aan een elektrische voortstuwing

#### Voordelen

- Efficiënt: De accu's leveren het benodigde vermogen voor de voortstuwing van het vaartuig, en de elektrische stroom dat gebruikt wordt bij de systemen aanboord.
- Geen giftige uitstoot: Met een op accu's gebaseerde elektrische voortstuwing vindt er geen verbranding plaats waardoor er geen uitstoot wordt geproduceerd tijdens bedrijf. Hierdoor is er in tegenstelling tot een dieselmotor geen sprake van schadelijke uitlaatgassen.
- Werken nominale snelheid: Een voortstuwing dat op accu's draait werkt altijd op de nominale snelheid. Dit heeft als gevolg dat bij deze voortstuwingstype het volledige vermogen van de motor beschikbaar is vanaf het in bedrijf zetten van de motor.
- Verminderde onderhoud: Afhankelijke van de gekozen elektromotor zijn er weinig bewegende delen aanwezig. Door het gebrek aan bewegende delen vindt er minder slijtage plaats in de motor. De accu's kunnen ook afhankelijk van het gekozen type beschouwd worden als zogeheten onderhoudsvrij.



- Minder geproduceerde geluid tijdens bedrijf: Doordat de elektrische aandrijving direct gekoppeld is aan de schroef ontstaat er minder geluid tijdens de werking van de motor.
- Hoge beschikbaarheid: De elektrische aandrijving heeft een potentieel hoge beschikbaarheid, afhankelijk van de systeem indeling. Dit betekent dat het vaartuig niet vaak last zou moeten hebben van storingen waardoor het vaartuig niet zal kunnen varen.

#### **Nadelen**

- Rendement verlies: Afhankelijk van de opzet van het systeem treden er rendement verliezen op door de omzettingen die plaats vinden tussen de accu's, elektromotor en schroef.
- Last van cavitatie: Bij kleine vaartuigen wordt er vaak voor gekozen om gebruik te maken van een zogeheten fixed pitch propeller (FPP). Doordat de elektrische voortstuwing bij elke snelheid het maximale koppel kan leveren en achteruit kan draaien. Het gevolg van deze type schroef is dat het cavitatie veroorzaakt, waardoor de schroef beschadigd raakt.
- Bij een verschil in spanning of frequentie kans op falen systeem: Bij de voordelen is gesproken over de hoge beschikbaarheid van dit systeem, maar als er door een storing een verschil in spanning in het systeem ontstaat zou deze kunnen zorgen voor het uitschakelen van het systeem.

#### **Dieselmotor**

##### **Voordelen**

- Dieselmotoren zijn het meest efficiënt bij ontwerp snelheid: Ontwerp snelheid is de optimale snelheid dat een schip voor ontworpen is. In het geval van de dieselmotor betreft het tussen de 80 en 100% van het maximale motorvermogen. De dieselmotor bereikt hiermee zijn meest efficiënte werkpunt.
- Heeft lage omzetting verliezen: Mechanische voortstuwing bestaat uit de hoofdmotor, de versnellingsbak en de schroef. De lage aantal vermogensconversie fasen zorgt ervoor dat er lage conversieverliezen optreden.
- Lage inkoopkosten: De dieselmotor heeft in vergelijking met de andere systemen lage aanschafkosten doordat dit systeem minder complex is dan de anderen.

##### **Nadelen**

- Beperkte manoeuvreerbaarheid: De manoeuvreerbaarheid van een dieselmotor is beperkt door zijn ontwerp, en is gedaan om het overbelasten van de motor te beperken. Dit kan echter verbeterd worden door het invoeren van een regelbare schroef.
- Veel gebruik leidt tot veel onderhoud: Door veel gebruik te maken van een dieselmotor zullen de statische- en dynamische belasting toenemen.
- Hoge brandstofverbruik en uitlaatgassen als onder 70% vermogen gevaren wordt
- Lage beschikbaarheid
- Veel geluid tijdens bedrijf



## Ontwerp aspecten

Tijdens de ontwerpfase van de kleine vaartuigen zijn er bepaalde voorwaarden die van belang zijn om aan de werkzaamheden te kunnen voldoen. Enkele van de mogelijke voorwaarden worden hieronder besproken:

### **Benodigde vermogen om een klein vaartuig in de haven te laten varen zonder emissie**

Er wordt hier gekeken naar het benodigde vermogen om een klein vaartuig te laten varen. Dit zal door middel van een data-analyse gedaan worden. De desbetreffende data zullen beschikbaar worden gemaakt door de heer Jan Scholtens. De heer Scholtens is betrokken geweest aan het Aquabot project. De metingen die verricht zijn aan het Aquabot zullen gebruikt worden na een aanpassing voor de schaal. Het vermogen zal berekend worden door de formule

$$P = F * v$$

Hierin is: P= vermogen in kW, F= kracht in Newton, en v= snelheid in meters per seconde.

Daarop aansluitend beweert (Rotterdam W. , 2020) dat een watertaxi van 2500 kilogram een lengte van 7,20 meter en een breedte van 2,15 m met elektrische voortstuwing een motor heeft met een vermogen van 20 kW. En daarmee een snelheid kan behalen van tot wel 15 kilometer per uur.

Uit de theorie blijkt dat een enkele brandstofcel in theorie een spanning van ongeveer 1,20 volt levert, maar in de praktijk ligt die spanning veel lager dit is namelijk tussen de 0,5 en 0,8 volt. Om de spanning te verhogen worden de afzonderlijke cellen op elkaar gestapeld en in serie geschakeld. De stapel die zo ontstaat wordt een "brandstofcelstack" of "stack" genoemd.

### **Schroef**

Onlosmakelijk gebonden aan het voortstuwingssysteem is de schroef dat dient om het vermogen om te zetten naar beweging in het water. In dit onderzoek is alleen het verschil tussen CPP en FPP-schroeven benoemd. Er dient echter nader onderzoek gedaan te worden naar welke schroef type het beste prestatie kan leveren voor de benodigde werkzaamheden die aanbod komen voor de Aquabots.

### **Energiedichtheid**

Het onderzoek van (Wouter van der Geest, 2019) geeft een vergelijking met batterij-containers en beweert dat waterstof een aanmerkelijk hogere energiedichtheid heeft, maar wel een flink lagere energiedichtheid dan diesel. Als ervoor gekozen wordt om waterstof in zuivere vorm te gebruiken zijn er drie mogelijkheden om de waterstof aanboord op te slaan. Dat kan onder een druk van 350 bar of een druk van 700 bar, of het kan in vloeibare vorm. In tabel 11 is de energiedichtheid te zien.

Tabel 11 Energiedichtheid vergelijking (Wouter van der Geest, 2019)

| Energiedrager                | Gravimetrisch<br>[ kWh / kg ] | Volumetrisch<br>[ kWh / l ] | Netto<br>[ kWh / l ] | Tankinhoud          |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| Waterstof<br>(vloeibaar):    | 33,33                         | 2,4                         | 1,2                  | 57 m <sup>3</sup>   |
| Waterstof<br>(gas, 350 bar): | 33,33                         | 0,8                         | 0,4                  | 170 m <sup>3</sup>  |
| Waterstof<br>(gas, 700 bar): | 33,33                         | 1,3                         | 0,7                  | 100 m <sup>3</sup>  |
| Diesel                       | 11,90                         | 10,0                        | 4,2                  | 16 m <sup>3</sup>   |
| CNG                          | 10,6                          | 2,2                         | 0,9                  | 75 m <sup>3</sup>   |
| LNG                          | 13,6                          | 6,1                         | 2,5                  | 25 m <sup>3</sup>   |
| Batterij                     | 0,10                          | 0,05                        | 0,04                 | 1385 m <sup>3</sup> |

Uit de tabel blijkt dat waterstof een aanmerkelijk lagere energiedichtheid kent dan diesel en LNG, een vergelijkbare energiedichtheid als CNG en een fors hogere energiedichtheid dan met batterijen.

Om een voorbeeld te geven is de benodigde tankinhoud om op waterstof te varen naar Basel vergelijkbaar met de bovengrens van de bunkerinhoud van bestaande 110-meter schepen. Met een dieseltank van 57 m<sup>3</sup> kan nu bijna drie keer heen en weer gevaren worden naar Basel met volledige belading. Bij het gebruik van vloeibare waterstof, zal er in Basel alweer gebunkerd moeten worden. Het gebruik van gecompriëerde waterstof tot 350 of 700 bar zal leiden tot extra bunkeren nabij Koblenz of Mainz.

De brandstofkosten worden vervolgens bepaald door de hoeveelheid energie (in kWh) te vermenigvuldigen met de energiedichtheid per energiedrager (in kWh per kg of liter) en vervolgens met de prijs per kg of liter voor brandstof.

### Ruimte

Dit is een uitdaging waar alle vaartuigen mee te maken krijgen tijdens de ontwerpfase. Hierin moeten er keuzes gemaakt worden in wat er mee moet en of dat wel allemaal past in de beschikbare ruimte. In dit onderzoek is gebleken dat verschillende onderdelen die van essentieel belang zijn, ruimte nodig hebben om geïnstalleerd te worden namelijk:

- Schroef
- Elektromotor
- Brandstofcelstack
- Waterstof opslagtank
- Zonnepanelen
- Besturing systeem
- Eventuele sensoren voor de werkzaamheden

Met de boven vernoemde onderdelen dient rekening gehouden te worden, en dat is afhankelijk van de bedoelde werkzaamheden van het kleine vaartuig. Dit onderzoek zal zich niet verder richten op de indeling van de desbetreffende beschikbare ruimte.