

Rondvaartboot op waterstof

Projectnummer 5005-03-20-01-094

Uitvoeringsregeling BSE-2003

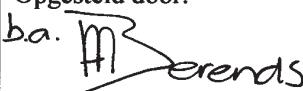
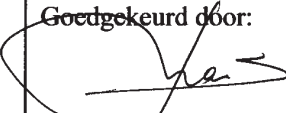

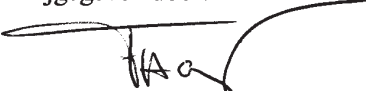
Ondersteuning Transitie-Coalities

Openbaar Eindrapport

A.M. Berends

P.C. van der Laag

ECN-C--05-065

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door: b.a.  R.C. van der Laag	Goedgekeurd door:  R.K.A.M. Mallant	ECN-Brandstofceltechnologie Werkeenheid: PEMFC & Supercaps
Geverifieerd door:  A.M. Berends	Vrijgegeven door:  F.A. de Bruijn	

Verantwoording

Dit rapport verschijnt als eindrapport van de haalbaarheidsstudie “Rondvaartboot op waterstof” over de periode 1 september 2004 – 1 maart 2005, SenterNovem Uitvoeringsregeling BSE-2003 Ondersteuning Transitie-Coalities, projectnummer 5005-03-20-01-094. Het project ontvangt 75% subsidie in het kader van voornoemde regeling. Het project is een samenwerking tussen Rondvaart Delft en het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). ECN is de penvoerder, Rondvaart Delft is medeaanvrager.



INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	4
LIJST VAN FIGUREN	4
SAMENVATTING	5
REALISATIE DOELSTELLINGEN BSE-OTC	7
1. INLEIDING	9
2. DOELSTELLING	9
3. WERKWIJZE	9
4. RESULTATEN EN DISCUSSIE	11
4.1 Vermogensvraag, systeemeisen en randvoorwaarden	11
4.1.1 De vermogensvraag tijdens varen	12
4.1.2 Aandrijfsysteem in de bestaande situatie	12
4.2 Basis systeemontwerp: specificatie PEMFC/SC/accu	12
4.2.1 Ontwerp- en optimalisatiestrategie	14
4.2.2 Optimale configuratie bij huidige kostenniveaus	15
4.2.3 Optimale configuratie bij toekomstige kostenniveaus	15
4.2.4 Keuze voor PEMFC en elektriciteitsopslagcapaciteiten	15
4.3 Systeemontwerp	16
4.4 Waterstofopslag en tanken	17
4.5 Plaatsing aan boord	18
4.6 Veiligheidsaspecten bij inbouw en tijdens bedrijf	18
4.7 Sterkte/zwakte-analyse	19
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	23
5.1 Conclusies	23
5.2 Aanbevelingen	23

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1	<i>Gegevens elektrische aandrijfsystemen in de bestaande situatie (gegevens per boordzijde).....</i>	12
Tabel 2	<i>Sterkte/zwakte-analyse van een dieselaangedreven rondvaartboot, een brandstofcel- en een accu-gevoede elektrische rondvaartboot.....</i>	20

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1	<i>Stroom-spanningskarakteristiek van een PEM brandstofcel (bron: ECN). .</i>	13
Figuur 2	<i>Schematische weergave van het waterstofgevoed, hybride PEMFC systeem voor elektrische voortstuwing van de Rondvaartboot (BOP: balance-of-plant).....</i>	16

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft de uitkomsten van een haalbaarheidsstudie naar een PEM brandstofcel-aangedreven elektrische rondvaartboot. De studie “Rondvaartboot op waterstof” is een samenwerking tussen Rondvaart Delft en ECN en omvat het specificeren van een basis PEMFC systeemontwerp voor een rondvaartboot, inclusief componentenlijst. Daarnaast worden de technische en milieu-voordelen van een PEMFC rondvaartboot ten opzichte van thans in gebruik zijnde accu-gevoede, elektrisch aangedreven rondvaartboten als ook diesel-aangedreven rondvaartboten met een sterkte/zwakte-analyse in kaart gebracht.

Om een systeemontwerp conform gebruikseisen van Rondvaart Delft te verkrijgen, zijn hun randvoorwaarden, functionele eisen en wensen geïnterpreteerd. Op basis van het vastgelegde vermogenspatroon en rekening houdend met de gestelde gebruikseisen is een basis PEMFC systeemontwerp op componentenniveau gemaakt. In dit ontwerp worden de huidige accu's van de elektrische rondvaartboot van Rondvaart Delft vervangen door een combinatie van een PEM brandstofcelstack en een kleiner aantal accu's als elektriciteitsopslagsysteem. Voor het verkrijgen van een optimale samenstelling van de grootte van de PEMFC stack en van het elektrisch opslagsysteem is een kostenanalyse uitgevoerd, waarin zowel de investerings-, brandstof-, onderhouds- en gebruikskosten zijn meegenomen. Uit kostenoverwegingen wordt gekozen voor een systeem waarbij de brandstofcelstacks continu het gemiddeld gevraagde vermogen (9 kW_{DC}) leveren en waarbij de vermogenswisselingen worden opgevangen met een gereduceerd accupakket.

De sterkte/zwakteanalyse die voor een 24-tal beoordelingsaspecten is uitgevoerd, geeft voor de huidige situatie de hoogste totaalscore aan de accu-gevoede elektrische rondvaartboot. Over een periode van circa 10 jaar krijgt de brandstofcelboot de hoogste totaalscore, nauw gevolgd door de accu-gevoede elektrische boot. Met name de hoge kosten voor investeringen en waterstofgebruik en de door de auteurs ingeschatte veiligheidsperceptie bij het grote publiek maken dat de brandstofcelboot nu nog in score achter blijft bij de accu-gevoede elektrische boot.

REALISATIE DOELSTELLINGEN BSE-OTC

Bijdrage aan doelstellingen BSE-OTC

De haalbaarheidsstudie die in dit rapport beschreven staat valt onder Transitiepad A5: Waterstof binnen de BSE-OTC-Regeling. Waterstof, al dan niet duurzaam geproduceerd, zal in de ogen van velen ooit *de* energiedrager worden voor vervoerstoepassingen. Deze haalbaarheidsstudie draagt bij aan de transitie naar de beoogde waterstof-omgeving omdat ze:

- op korte termijn te implementeren is (technisch haalbaar)
- de concrete technische en milieu-voordelen bij toepassing van brandstofcellen op een rondvaartboot toont ten opzichte van de thans gebruikte accu of dieseltechnologie
- de knelpunten van de brandstofceltechnologie ten opzichte van de huidige accu en dieseltechnologieën aan de hand van de sterkte/zwakte-analyse in kaart heeft gebracht.

Bij een experimenteel onderzoek als toepassing van brandstofcellen op de rondvaartboot kan praktijkervaring worden opgedaan. De rondvaartboot op brandstofcellen is daarbij een voorbeeld van toepassing van brandstofceltechnologie in schepen en kan zo bijdragen aan het verduurzamen van het vervoer over water. Voorts worden met het uitvoeren van zo'n praktijktest lokaal de milieumomstandigheden verbeterd en het imago van waterstof versterkt. De resultaten van deze praktijktoepassing van waterstof en brandstofcellen in een rondvaartboot kunnen bovendien breder inzetbaar worden gemaakt voor andere toepassingen als scooters, auto's, bussen en vrachtwagens.

Vorbereiding transitie-experimenten

In de haalbaarheidsstudie is een ontwerp beschreven van een brandstofcelaangedreven elektrische rondvaartboot. Aan de hand van de resultaten die in deze studie beschreven staan kan een transitieproject gestart worden, waarbij het in deze studie beschreven ontwerp, de componentenlijst en kostenindicatie gebruikt kunnen worden. Binnen dit transitieproject kunnen transitie-experimenten uitgevoerd worden rondom de daadwerkelijke bouw en het testen van een brandstofcelsysteem voor toepassing in een rondvaartboot. De haalbaarheidsstudie geeft een duidelijk beeld van wat er allemaal komt kijken bij het toepassen van brandstofcellen aan boord van een rondvaartboot en dat is belangrijk voor de beeldvorming bij eventuele coalitiepartners en subsidieverstrekkers.

1. INLEIDING

Behalve met de gebruikelijke diesel-aangedreven boten vaart Rondvaart Delft nu al zo'n zeven jaar met een elektrische rondvaartboot door de Delftse grachten. Deze accuboot is geruisloos waardoor er langer en ook op zondagen, gevaren mag worden. De (locale) emissievoordelen ten opzichte van diesel zijn natuurlijk evident.

Indien gebruik gemaakt kan worden van een elektrisch systeem op basis van polymere brandstofcellen (polymer-electrolyte membrane fuel cell, PEMFC), ontstaat de mogelijkheid een systeem te verkrijgen dat efficiënter en duurzamer is dan het huidige accu-gevoede elektrische systeem. Vanwege de hogere energiedichtheid van de PEMFC ten opzichte van de accu, kan met een PEMFC systeem plus waterstofopslag aan boord (druk dan wel metaalhydride) een grotere actieradius dan wel langer autonoom bedrijf worden gerealiseerd. Bovendien biedt het veel kleinere benodigde volume van de PEMFC inclusief waterstofopslag mogelijkheden voor een herontwerp van de boot en, in combinatie met de beschikbare (overmaat aan) stroom, eventueel een verbeterde functionaliteit van de rondvaartboot (te denken valt aan airco, video, enzovoort).

Teneinde een goede vergelijking te kunnen maken tussen de huidige accu-gevoede elektrische boot en een PEMFC-gevoede boot is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd, waarvan de resultaten in dit rapport beschreven staan.

2. DOELSTELLING

Het aangeven van de economische en technische haalbaarheid van een PEMFC-gevoede elektrische rondvaartboot in Delft.

3. WERKWIJZE

Om de onder 2 genoemde doelstelling te realiseren, zijn de volgende projecttaken uitgevoerd:

1. Vastleggen van het vermogensvraagpatroon van de elektrische rondvaartboot [Rondvaart Delft, ECN].
2. Specificatie van de benodigde PEMFC/supercondensator (SC)/accu voor de aandrijving van de elektrische motor [ECN].
3. Ontwerp van een elektrisch systeem voor de aandrijving van de elektromotoren, inclusief componentenlijst met een PEMFC-stack [Rondvaart Delft, ECN].
4. Sterkte/zwakte- en kostenanalyse van PEMFC-, accu- en diesel-gevoede rondvaartboot [Rondvaart Delft, ECN].

Een meer uitgebreide rapportage van de werkzaamheden is verschenen als vertrouwelijk eindrapport "Rondvaartboot op Waterstof", ECN-CX—05-027.

4. RESULTATEN EN DISCUSSIE

4.1 Vermogensvraag, systeemeisen en randvoorwaarden

Voor het nieuwe ontwerp van de boot is uitgegaan van het huidige systeem met accu's, waarbij de boot een capaciteit heeft voor 50 mensen. Het huidige aandrijf- en besturingssysteem bestaat uit 2 onafhankelijk werkende driefasen wisselstroommotoren van elk 8 kW met benodigde regeling en 16 accu's met een gewicht van 160 kilo elk. De accu's zijn over de boot verdeeld en zijn in verband met H₂-productie tijdens opladen voorzien van een afzuiginstallatie om explosies te voorkomen. De accu's worden 's nachts aan de kade opgeladen.

In principe worden in het nieuwe ontwerp met een PEMFC-systeem alleen (een deel van) de accu's vervangen, daar de overige componenten als motoren, regelingen en schroeven prima voldoen. De buitenafmetingen van de boot kunnen niet worden aangepast daar een kleinere boot geen plaats biedt aan 50 personen en een grotere boot niet door de grachten van Delft kan varen in verband met de ondiepe grachten en vele lage bruggen.

Als startpunt voor het nieuwe systeemontwerp, dat voor een nieuw te bouwen boot gemaakt wordt, zijn een aantal randvoorwaarden en systeemeisen vastgelegd, die hieronder zijn weergegeven:

- de basis van het nieuwe systeem is twee maal de huidige 8 kW elektromotor + regeling van de accuboot (waarbij de elektrische aandrijfsystemen onafhankelijk van elkaar kunnen functioneren), en met twee maal de huidige drive + schroef
- achteruit varen vindt plaats door de elektrische stroomrichting om te keren
- de nieuwe boot houdt de huidige buitenafmetingen, zij krijgt wel een andere bodem aangezien een rondvaartboot met deze andere bodem stabielere vaargedrag vertoont; dit heeft echter weinig invloed op het vermogensvraagpatroon en geen invloed op het PEMFC-systeem
- het vermogensvraagpatroon is gebaseerd op 8 maanden per jaar met maximaal 9 vaarten per dag, 7 dagen per week, 45 minuten per vaart; waarbij:
 - 80% van de vaartijd met 5-6 km/hr (ongeveer half vermogen: 2 maal 4 kW);
 - 10% van de vaartijd met 8 km/hr;
 - 10% van de vaartijd vol gas.
- er moet altijd minimaal 8 kW beschikbaar zijn zodat de boot bij storing terug kan varen
- een eventueel benodigde opstarttijd van het PEMFC-systeem is geen probleem, mits korter dan 45 min. daar momenteel die tijd ook al benodigd is voordat met de boot gevaren kan worden
- voor waterstofopslag is er een voorkeur voor hoge drukopslag zoals toegepast bij de CUTE-bussen in Amsterdam; de verwachting is dat de regelgeving hier wellicht het snelst mee akkoord gaat (er zijn nog geen officiële regels voor het gebruik van H₂ aan boord van schepen)
- alle waterstof-bevattende delen worden in verband met veiligheid buiten de passagiersruimte geplaatst
- in het motorgedeelte moet ruimte vrij blijven voor een nooduitgang
- achteruitzicht is vereist, wat inhoudt dat het motorgedeelte niet hoger mag worden dan het nu is

- qua verbeterde functionaliteit zou een verwarming van de ruiten erg gewenst zijn, daar de ruiten bij slecht weer gemakkelijk beslaan; airconditioning is niet nodig daar het dak van de boot open kan bij mooi weer
- het kunnen verlengen van het vaarseizoen is niet zinvol in Delft daar de ervaring leert dat er in de winterperiode te weinig toeristen zijn om rendabel te kunnen varen
- indien het opladen van eventuele accu's straks toch nodig is, is er een 380 V-aansluiting aanwezig bij het gebouwtje van Rondvaart Delft.

4.1.1 De vermogensvraag tijdens varen

Op basis van het boven omschreven (worst-case) vermogensvraagpatroon dat als uitgangspunt dient voor de dimensionering van de elektriciteitsopslagsystemen, bedraagt het gemiddelde gevraagde elektrisch vermogen 9,2 kWe (= $(0,8 \times 0,5 + 0,1 \times 0,75 + 0,1 \times 1) \times 16$ kWe). Het gemiddelde elektriciteitsverbruik tijdens een vaart bedraagt hiermee 24,8 MJ = 6,9 kWh (= 9,2 kWe x 0,75 uur). Het maximale dagelijkse elektriciteitsverbruik bedraagt hiermee 223 MJ = 62,1 kWh (= 9 x 6,9 kWh). Op jaarbasis is dit maximaal 39,4 GJ = 11.000 kWh.

Het werkelijke energieverbruik is sterk afhankelijk van het type vaart (45 minuten, maar ook drie-uurs vaarten), aantal passagiers, de windcondities en ook van de schipper. De variaties in vaartcondities leveren een groot verschil op in energieverbruik.

4.1.2 Aandrijfsysteem in de bestaande situatie

In de bestaande situatie is het aandrijfsysteem van de elektrische rondvaartboot zoals weergegeven in Tabel 1. Er zijn twee onafhankelijke aandrijfsystemen geïnstalleerd, die elk bestaan uit een accupakket, een DC/AC converter met regelaar, een elektromotor met schroefas en schroef.

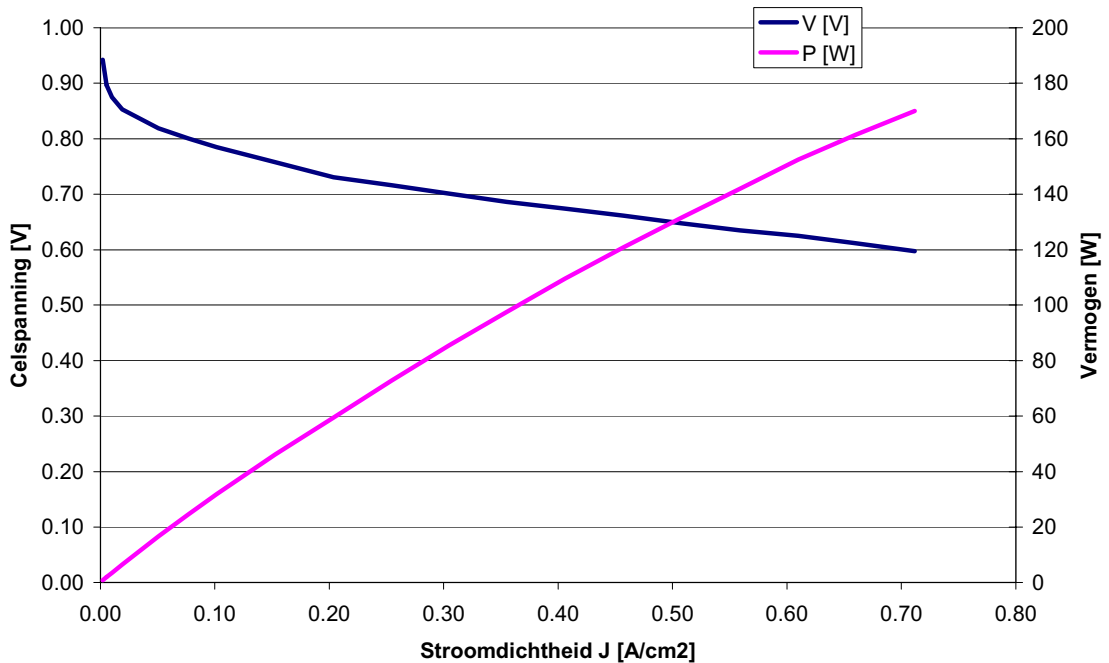
Tabel 1 *Gegevens elektrische aandrijfsystemen in de bestaande situatie (gegevens per boordzijde).*

Onderdeel	Nominale capaciteit	Eenheid
<i>Elektromotor:</i>		
• Nominaal vermogen (3 fasen AC)	8,0	kW
• Nominale spanning	48	Volt
<i>Accupakket:</i>		
• Nominale spanning	48	Volt
• Nominaal vermogen (ontlaadtijd: 5 uur)	8,8	kW

4.2 Basis systeemontwerp: specificatie PEMFC/SC/accu

Het startpunt voor het basis systeemontwerp is het vermogensvraagpatroon zoals vastgelegd in paragraaf 4.1. De elektromotoren werken op 48 V, dus zal het PEMFC-systeem ook deze spanning te allen tijde moeten leveren, ongeacht het te leveren vermogen. Een PEMFC stack zet waterstof en zuurstof langs elektrochemische route om in elektriciteit, warmte en water. Zolang voldoende waterstof en zuurstof toegevoerd worden, en de geproduceerde warmte afgevoerd, vindt deze omzetting plaats zodra er een belasting op wordt aangesloten. Een brandstofcel levert typisch tussen 0.5 en 1 V; in een stack worden een aantal van deze cellen in serie geschakeld waardoor een werkbare

spanning verkregen wordt. Een voorbeeld van een vermogenskarakteristiek van een PEMFC cel wordt gegeven in Figuur 1. Deze figuur laat duidelijk zien dat de spanning van een PEMFC varieert met het gevraagde vermogen. Een systeem met een PEMFC stack heeft dientengevolge een converter nodig om de wisselende werkspanning van een stack om te zetten in een nagenoeg constante railspanning van 48 volt.



Figuur 1 *Stroom-spanningskarakteristiek van een PEM brandstofcel (bron: ECN).*

De snelheid waarmee vermogenswisselingen gevolgd kunnen worden door een PEMFC-systeem, zijn rechtstreeks afhankelijk van de snelheid waarmee de gassen in hoeveelheid gevarieerd kunnen worden (een PEMFC stack zelf kan in principe zeer snelle variaties in vermogensvraag aan). Voor het beoogde systeem¹ betekent dit, door de traagheid van de gekozen gastoevoerregelingen, dat het PEMFC-systeem niet meteen een hoger vermogen kan leveren, maar met een vertraging van typisch 5 seconden. Om deze vertraging op te kunnen vangen wordt er hier gebruik gemaakt van elektriciteitsopslag. Hiertoe zijn zowel supercondensatoren (SC) als accu's geschikt. Een SC kan slechts kleine hoeveelheden energie opslaan, maar deze wel met een hoog vermogen vrijgeven gedurende een korte tijd, typisch 1-10 seconden. Daarentegen kan een accu grote hoeveelheden energie opslaan en deze gedurende langere tijd, typisch uren, met een laag vermogen vrijgeven. De keuze tussen SC en accu wordt hierdoor dan ook bepaald.

De werkspanning van de SC of accu verschilt over het algemeen van die van de PEMFC stack. De voornoemde converter kan ook zorgen voor de afstemming van de verschillende werkspanningen van de PEMFC en de elektriciteitsopslag (supercondensatoren dan wel accu's).

¹ Voor het beoogde systeem zullen geen pogingen worden ondernomen om de responstijd te verlagen. Vanwege de gewenste aanwezigheid van accu's (redundancy van de stroombron in geval van storing, zie § 4.2.4) is dit niet relevant.

4.2.1 Ontwerp- en optimalisatiestrategie

In de nieuwe situatie met een PEMFC systeem zijn diverse uitvoeringsvormen denkbaar. Het belangrijkste onderscheid is de mate van hybridisatie, waarbij al dan niet gebruik wordt gemaakt van elektriciteitsopslag zoals accu's, supercondensatoren of een combinatie van beide.

Er zijn twee limietsituaties mogelijk. De eerste is een situatie waarbij er géén elektriciteitsopslag wordt toegepast en waarbij het PEMFC systeem gedimensioneerd wordt op de piek-vermogensvraag: het vraagvolgend ontwerp. Dit levert het grootste brandstofcelsysteem op qua capaciteit, investeringskosten, volume- en gewichtsbeslag. Een dergelijk op de piekvraag gedimensioneerd systeem vertoont het hoogste rendement bij de omzetting van waterstof in elektriciteit. Dit komt doordat een brandstofcel die in deellast bedreven wordt minder inwendige verliezen kent. Qua waterstofconsumptie is dit de meest voordelige configuratie. Daarentegen stelt een dergelijke configuratie de hoogste eisen aan de regelbaarheid van het systeem. Vanwege de middels metingen geconstateerde snelle fluctuaties bij de vraag naar elektrisch vermogen, zal het brandstofcelsysteem vrijwel instantaan de dynamiek in het vraagpatroon moeten kunnen volgen.

De tweede limietsituatie is die waarbij het PEMFC systeem gedimensioneerd wordt op de gemiddelde vermogensvraag en deze continu ook levert: het constant-gemiddelde vermogensontwerp. Het systeem wordt dan aangevuld met elektriciteitsopslag in de vorm van accu's en/of supercondensatoren. Dit levert het kleinste brandstofcelsysteem op qua capaciteit, investeringskosten, volume- en gewichtsbeslag. Echter, dit systeem vertoont een lager omzettingsrendement, omdat het continu bij het nominale werkpunt bedreven wordt. Qua waterstofconsumptie is dit de minst voordelige situatie. Wèl is het hierbij gunstig dat er minder hoge eisen worden gesteld aan de regelbaarheid van het systeem, omdat het in een "aan/uit" modus bedreven wordt. De dynamische bandbreedte is minimaal en de tijdsconstanten voor de stapresponsies bij vermogenswisselingen mogen relatief hoog zijn, in de orde van 1 minuut. Bovendien kan er bij het bijtanken eventueel voor gekozen worden om naast waterstof tevens wat stroom af te nemen om de elektriciteitsopslag weer vol te laden.

De ligging van het *economisch* optimum is op voorhand moeilijk aan te geven, vanwege de tegengestelde tendenzen bij enerzijds de hoogte van de investeringskosten voor brandstofcel- en opslagsystemen en anderzijds de hoogte van de operationele kosten voor waterstof- en elektriciteitsgebruik. Op basis van een gedetailleerde analyse voor de kostenopbouw van de componenten waaruit het brandstofcelsysteem is opgebouwd, voor het vermogensafhankelijke omzettingsrendement en het effect van degradatie, kan de optimale configuratie nauwkeurig bepaald worden. Hier echter wordt volstaan met een geschatte specifieke investering en een effectieve waarde voor het rendement waarmee het brandstofcelsysteem waterstof omzet in elektriciteit.

Het economisch optimum geldt voor die configuratie (i.e. capaciteiten van waterstof- en elektriciteitsopslag en het geïnstalleerde PEMFC vermogen) waarbij de vaartkosten minimaal zijn:

$$\text{vaartkosten} = \frac{\text{jaarlijkse_kosten}}{\text{jaarlijkse_vaarten}}$$

De jaarlijkse kosten zijn opgebouwd uit: afschrijvingskosten volgens een annuïteitconstructie met jaarlijkse rente, brandstofkosten en bedrijfs- en onderhoudskosten. Daarbij worden de afschrijvingskosten [€/jaar] als volgt bepaald:

$$\text{afschrijvingskosten} = \frac{\rho \cdot \text{Inv}}{1 - \exp(-\rho \cdot T)}$$

Hierin is ρ de jaarlijkse rente [1/jaar], Inv de hoogte van de investering [€] en T de afschrijvingstermijn [jaar].

De jaarlijkse brandstofkosten zijn afhankelijk van het aantal vaarten per jaar, het systeemrendement en de kosten voor elektriciteit, respectievelijk waterstof.

4.2.2 Optimale configuratie bij huidige kostenniveaus

Vanwege de relatief hoge kapitaalslasten voor het brandstofcelsysteem loont het om te kiezen voor het kleinste systeem, dat continu de gemiddelde vermogensvraag levert. De dynamiek wordt dan volledig uitgewisseld met de elektriciteitsopslag. Deze opslagcapaciteit is echter aanzienlijk kleiner dan in de referentiesituatie. De benodigde elektriciteitsopslag blijkt een capaciteit te hebben van 2 MJe. We houden rekening met een onzekerheidsmarge, door te kiezen voor een opslagcapaciteit van 4 MJe

De huidige geraamde kostenniveaus voor investering in het PEMFC systeem en de huidige tarieven voor waterstof leiden tot tienmaal hogere kosten per vaart dan voor de accuboot.

4.2.3 Optimale configuratie bij toekomstige kostenniveaus

Wanneer toekomstige kostenniveaus worden verondersteld voor het brandstofcelsysteem en voor het waterstofgebruik, zullen de vaartkosten aanzienlijk kunnen dalen. De belangrijkste verwachte prijsdalingen zijn die voor het brandstofcelsysteem en de waterstofkosten. Wij verwachten een prijsdaling met een factor twintig voor het brandstofcelsysteem en een factor veertien voor de waterstof (in geval van kleinschalige aardgasreforming). De vaartkosten worden dan 10% hoger dan de huidige vaartprijs met de accu-gevoede boot, voor het brandstofcelsysteem dat nagenoeg continu de gemiddelde vermogensvraag levert. Ondanks de hoge efficiëntie waarmee waterstof wordt omgezet in elektriciteit zijn de waterstofkosten nog licht hoger dan de elektriciteitskosten. Ook daarom loont het om te kiezen voor het kleinste brandstofcelsysteem, dat iets meer dan de gemiddelde vermogensvraag kan leveren en waarbij de dynamiek van de vermogensvraag (nagenoeg) geheel wordt uitgewisseld met de elektriciteitsopslag.

4.2.4 Keuze voor PEMFC en elektriciteitsopslagcapaciteiten

Voor het ontwerp-vaarpatroon (worst-case situatie in paragraaf 2.1) bedraagt de gemiddelde vermogensvraag 9,2 kWe; in de praktijk blijkt het gemiddelde gevraagde vermogen doorgaans lager te zijn. Het brandstofcelsysteem wordt gedimensioneerd op een nominaal vermogen van 10 kWe. Tijdelijk kan het brandstofcelsysteem meer vermogen leveren, waarbij het omzettingsrendement echter terugloopt. Dit uitgangsvermogen wordt ingevoerd op de busrail bij een spanning van 48 Volt. De busspanning is de werkspanning van de beide, synchroon geregelde accupakketten en elektromotoren. In de nieuwe situatie blijven de accu's verdeeld over de beide zijden

van het schip. De grootste storingskans geldt voor zwerfvuil dat in één van beide schroeven komt.

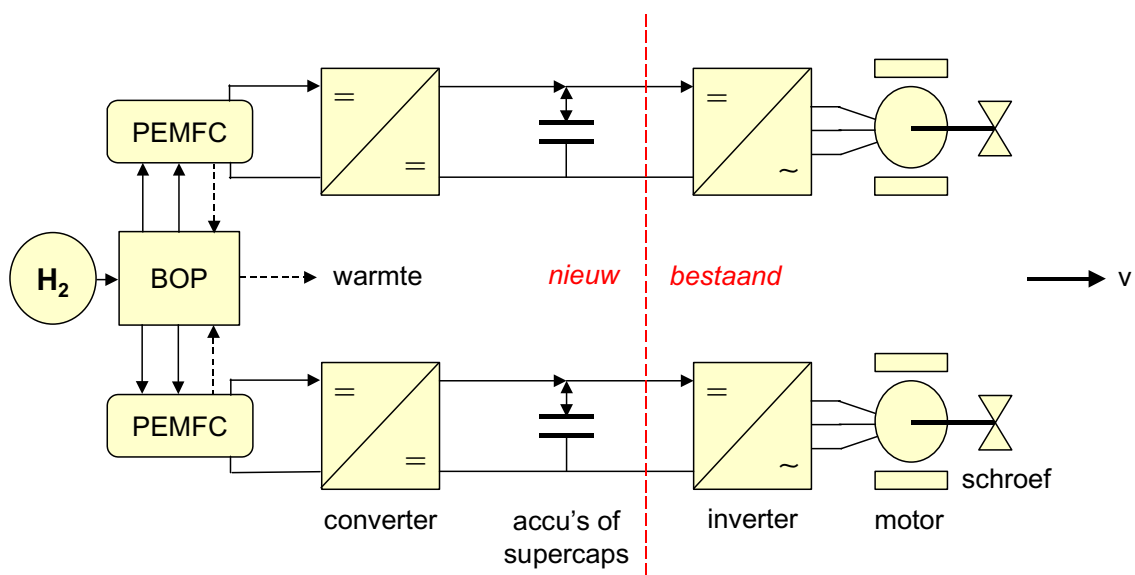
De elektriciteitsopslag vervult bij deze systeemopzet twee belangrijke functies:

1. Compensatie van de dynamiek van het vermogensvraagpatroon. Dit vergt een opslagcapaciteit van ongeveer 4 MJe. Indien het brandstofcelsysteem niet continu, maar gedempt vraagvolgend bedreven wordt, wordt deze opslagcapaciteit slechts gedeeltelijk benut.
2. Noodvoorziening om in het geval van een storing in het brandstofcelsysteem of in één van beide aandrijfmotoren, de rondvaartboot op half vermogen terug te kunnen varen naar de aanlegsteiger. Dit vergt een maximale opslagcapaciteit van 10,8 MJe (= 8 kWe x 22,5 min x 60 sec/min).

De tweede functie is bepalend voor de installatiecapaciteit van de elektriciteitsopslag. In vergelijking met de aanwezige elektriciteitsopslagcapaciteit kan volstaan worden met een sterk gereduceerd accupakket. De gewichtsvermindering die hiervan het gevolg is moet in Delft gecompenseerd worden met ballastmateriaal, om de diepgang en vlakligging van het schip te waarborgen (in verband met de doorvaarthoogtes in de Delftse grachten).

4.3 Systeemontwerp

In Figuur 2 staat de opbouw van het waterstofgevoede PEM-brandstofcelsysteem, in een hybride uitvoering met elektriciteitsopslag voor piekvermogen, schematisch weergegeven. Het rechter deel van het figuur, de dubbel uitgevoerde stroomvoorziening naar de elektromotor met schroefas en schroef en de vermogensregelaar, blijft onveranderd. Het bestaande accupakket wordt gereduceerd. Het brandstofcelsysteem is in deze figuur sterk vereenvoudigd weergegeven.



Figuur 2 Schematische weergave van het waterstofgevoede, hybride PEMFC systeem voor elektrische voortstuwing van de Rondvaartboot (BOP: balance-of-plant).

De huidige situatie kent twee onafhankelijk opererende aandrijfsystemen om het risico op totale uitval te verkleinen. Wij stellen ons voor dat er slechts één brandstofcelstelsel wordt geplaatst, dat de beide elektromotoren van elektrisch vermogen kan voorzien. Daarbij worden er twee, elektrisch gescheiden PEMFC stacks toegepast. De rationale hierachter is dat de grootste kans op een verstoring zich voordoet bij de elektromotoren en de schroeven, ten gevolge van zwerfvuil in het water. De motoren zijn om deze reden dubbel uitgevoerd.

Bij de nieuwe aandrijvingsvarianten op basis van brandstofceltechnologie zal het accupakket vervangen worden door een aantal kleinere accu's met een lagere opslagcapaciteit of door een aantal supercondensatoren. Er wordt uitgegaan van een 1-op-1 verdeling van het gevraagde vermogen over twee identieke aandrijfsystemen. Per deelsysteem wordt de aanwezigheid van een 5 kW nominaal brandstofcelstack verondersteld, welke 6 kW piekvermogen kan leveren en 4 kW minimaal vermogen.

Wordt voor de opslag een 48 V accu genomen, dan hoort hierbij een systeemopzet met vrijwel constante railspanning, zoals ook in de bestaande situatie het geval is. Deze oplossing voor de elektriciteitsbuffer sluit goed aan bij de bestaande elektromotoren en DC/AC-tractieconvertoren.

Bij supercondensatoren hoort een tussen 24 en 48 V variërende railspanning, waarmee andere eisen aan tractieconverter en roterende machine gepaard gaan (twee maal zo hoge stroomsterktes).

De huidige tractieconverter is niet geschikt om rechtstreeks te koppelen aan een supercondensator. De combinatie van de bestaande tractieconverter met een supercondensator vereist de toepassing van een extra spanningsconverter. De totale kosten van deze combinatie zijn veel hoger dan die voor het gereduceerde accupakket. De keuze valt derhalve op het gereduceerde accupakket.

4.4 Waterstofopslag en tanken

De meest kansrijke optie voor het vervoer van waterstof aan boord van kleinere schepen lijkt gecompriëerde waterstof te zijn in speciaal daartoe ontwikkelde druktanks. Deze techniek wordt vooral toegepast aan boord van voertuigen voor personen- en groepsvervoer (bijv. het Europese CUTE bussenproject). Voor deze studie gaan wij uit van waterstofopslag in één of meerdere hoge-druk tanks die buiten de passagierscabine geplaatst worden, in een goed geventileerde ruimte.

Op grond van het maximale vermogenspatroon (gemiddeld elektrisch vermogen van 9,2 kW gedurende 45 minuten per vaart en negen vaarten per dag, ofwel 223 MJ per dag) wordt er per vaart maximaal 425 gram waterstof verbruikt. Per dag is het maximale verbruik 3,8 kg waterstof.

Om circa 4 kg waterstof aan boord te kunnen opslaan bij een druk van 350 of 450 bar, komen DyneCell tanks in aanmerking (www.dynetek.com). Momenteel is alleen de 350 bar variant uitgebreid gecertificeerd (TÜV, ISO 11439, NGV2, CSA B51, Reijkijun Betten-9). Vanwege certificatie en vanwege de beschikbare ruimte aan boord, kiezen wij twee tanks van het type V074, op 350 bar.

Het vullen van de tanks kan bij de ligplaats aan de kade plaatsvinden, door gebruik te maken van een pakket van waterstofflessen, dat circa wekelijks vervangen wordt.

Volgens opgave van HoekLoos komt een flessenpakket bestaande uit zestien, onderling doorverbonden cilinders van 50 liter het meest in aanmerking. De vuldruk bedraagt 200 bar, waardoor er maximaal 144 m³ (15 °C, 1 bar) ofwel 12,1 kg waterstof in het flessenpakket aanwezig is.

Omdat de vuldruk van de opslagtanks aan boord (350 bar) hoger is dan de druk in de voorraadtanks op de kade (max. 200 bar), kan een met perslucht aangedreven boostercompressor gebruikt worden om de maximale hoeveelheid waterstof aan boord te kunnen opslaan. Dit verdubbelt tevens de actieradius van de rondvaartboot. Dergelijke typen compressoren (gas boosters) voor waterstof worden geleverd door de Duitse firma Maximator (www.maximator.de). Deze worden aangedreven met perslucht van maximaal 10 bar (hoe hoger de luchtdruk, hoe korter de vulperiode), met een minimale waterstof-aanvoerdruk van 15 bar. Bij Rondvaart Delft is een persluchtcompressor aanwezig.

4.5 Plaatsing aan boord

De mogelijkheden om het brandstofcelsysteem, inclusief de brandstoftanks in het schip te plaatsen zijn nagegaan. Hiertoe zijn CAD tekeningen gemaakt van het achterschip. Tussen de beide motorcompartimenten waarin de elektromotoren met hun tractieregelaars en koeling zijn ondergebracht is nog voldoende ruimte beschikbaar om het brandstofcelsysteem met de beide PEMFC stacks te monteren. Deze ruimte zal gasdicht afgescheiden worden van de passagierscabine, door middel van doorzichtig plexiglas om ongehinderd zicht naar achteren te behouden. De ruimte met het brandstofcelsysteem wordt apart geventileerd. De beide waterstofdruktanks zijn boven de buns met de elektromotoren geplaatst en verhinderen door hun lage ligging het achteruitzicht niet. Ook deze tanks bevinden zich in een gasdichte met plexiglas afgesloten, goed geventileerde ruimte.

4.6 Veiligheidsaspecten bij inbouw en tijdens bedrijf

Naast de sensoren en actuatoren voor de normale procesregeling worden er diverse ontwerp- en proceduremaatregelen genomen om het brandstofcelsysteem op een veilige en betrouwbare wijze te laten functioneren. De omgang met waterstof brengt in principe veiligheidsrisico's met zich mee, die, net als bij gebruik van diesel, benzine of LPG, met de juiste maatregelen tot een acceptabel niveau kunnen worden teruggedrongen.

Voor de toepassing van brandstofcelsystemen aan boord van schepen heeft Germanischer Lloyd (GL) een aparte classificatierichtlijn opgesteld: *Germanischer Lloyd AG, Guidelines for the Use of Fuel Cell Systems on Board of Ships and Boats, Edition 2003, Hamburg*. Deze richtlijn is op 1 maart 2003 van kracht geworden.

Door GL worden een serie van risico-reductiemaatregelen voorgeschreven. Een aantal daarvan volgt hieronder. Voor de precieze beschrijving wordt naar de literatuuropgave verwezen. Voor kleinere schepen kan hiervan, in overleg met GL, afgeweken worden.

Al tijdens het conceptontwerp, bijvoorbeeld bij de plaatsing van de systeemcomponenten, is rekening gehouden met deze voorschriften.

- Opslagtanks dienen buiten de verblijfs-, service- en machineruimten geplaatst te worden. De afscheiding is gasdicht uitgevoerd.
- Brandstofleidingen mogen niet door veilige ruimten (passagierscabine, serviceruimte, ..) gevoerd worden.
- Alle brandstofvoerende delen (incl. brandstofcelstacks) worden in een aparte, geventileerde behuizing ondergebracht en voorzien van een gasdetectiesysteem.
- De behuizing van het brandstofcelsysteem wordt buiten de passagiers-, service- en machineruimten geplaatst.
- De behuizing van het brandstofcelsysteem is afgescheiden van de ruimte voor brandstofopslag.
- Openingen voor ventilatie- en productgasafvoer worden op het open dek, tenminste 3 meter verwijderd van ontstekingsbronnen en toegangen tot passagiers-, service-machine- en besturingsruimten, geplaatst.
- Brandstofcellen voor essentiële afnemers dienen redundant uitgevoerd te worden.
- Ruimten waarin een brandbaar gasmengsel kan ontstaan dienen voorzien te worden van een afzonderlijke mechanische afzuiginstallatie. Kleine ruimten kunnen eventueel voorzien worden van natuurlijke ventilatie.
- Nergens dienen zich brandbare gasvormige componenten te kunnen ophopen.
- Ruimten waarbinnen gaslekkage niet uitgesloten wordt geacht, dienen voorzien te zijn van een gas-sensorsysteem. Bij een concentratieoverschrijding van 5 % van de lagere-explosiegrens wordt een hoorbaar en zichtbaar signaal afgegeven bij het controlepaneel. Bij een concentratieoverschrijding van 10 % van de lagere-explosiegrens wordt het brandstofcelsysteem automatisch afgeschakeld.
- Chemische reacties, zoals in de brandstofcel plaatsvinden, dienen te worden gemonitord middels temperatuur-, druk- of spanningssensoren.

Aanvullende keuringsrichtlijnen voor de toepassing van waterstof-druktanks aan boord van voertuigen zijn in het kader van het European Integrated Hydrogen Project EIHP² en door de UN-ECE, GRPE Informal Group Hydrogen/Fuel Cell Vehicles, WP.29 (New Vehicles Construction) opgesteld (www.eihp.org).

4.7 Sterkte/zwakte-analyse

Met een aantal experts van ECN op het gebied van PEM brandstofcellen, -systemen, supercondensatoren, elektronica engineering en met de eigenaar van Rondvaart Delft is de sterkte/zwakte-analyse uitgevoerd. Hiertoe is eerst per item en per type boot een score van 1-5 toegekend, waarbij 1 betekent dat dat type slecht scoort, en 5 betekent dat het type goed scoort. Vervolgens is per item een weegfactor van 1-3 toegekend, waarbij 1 betekent dat het item minder belangrijk is en 3 dat het item zeer belangrijk is. Enige subjectiviteit kan natuurlijk nooit voorkomen worden bij het maken van zo'n sterkte/zwakte-analyse. Omdat bepaalde items in de analyse naar de mening van de experts over 10 jaar beduidend anders zullen scoren, is hier een prognose van gemaakt en ook meegenomen.

Tabel 2 Sterkte/zwakte-analyse van een dieselaangedreven rondvaartboot, een brandstofcel- en een accu-gevoede elektrische rondvaartboot

Aspect	weegfactor	Brandstof- celboot	Accuboot	Dieselboot
	1 - 3	1 - 5 [slecht – goed]		
geluidsproductie, inclusief trillingsaspecten	3	4 luchtcompressor schroefgeluid	5 fluisterboot schroefgeluid	2 geluid, trillingen, schroefgeluid
luchtemissies als roet, NO _x , SO ₂ [tank - schroef: lokaal dus]	3	5	5	2
actieradius per 'tank'lading	2	3	2	5 200 liter tank
veiligheidsrisico's (hoeveel moeite moet er gedaan worden om een veilig systeem te verkrijgen?)	3	4 ventileren waterstof; kortsluiting	4 ventileren accu's; kortsluiting	5
veiligheidsperceptie (na 10 jr)	2	2 (3) waterstof	4 (4)	5 (5)
energie-efficiëntie [tank - schroef: lokaal dus]	2-3	3 50 %	4 90 %	2 30 %
energie-efficiëntie well-tank	2-3	4 80 % ²	2 41 % ³	5 95 %
volume aandrijf-systeem, incl tank(s)	2	4	3	3
comfort (ruimtelijk; hoeveel plek is er voor passagiers?)	2	4	3	2 inbouw lengte dieselmotoren
comfort (functioneel; mogelijkheid tot verwarming, etc.)	1	3 warmte	2	3 warmte
comfort (geluid, geur)	3	5	4	2
totaalgewicht	1	4	2 hoog gewicht	3
gewichtsverdeling	2	3	4 goede verdeling	2 gewicht achterin
acceleratievermogen	2	4 16 kW + SC/BC; snelle responsie	3 18 kW	5 90 PK
manoeuvrbaarheid	2	5	5	3 schokkerig
EMC	2	3 tractie- en DC/ DC converter	3 tractieconverter 8-15 kHz > GPS	5
onderhoud (frequentie, kosten)	3	3	4	3
onderhoudbaarheid	2	3 zeer specialistisch	4 specialistisch	5 veel expertise aanwezig; aandrijfsysteem

² stoomreforming van aardgas.

³ parkrendement elektriciteitscentrales, incl. transmissie- en distributieverliezen.

beschikbaarheid	3	3-4	5	4
investeringskosten (na 10 jr)	2	1 (3)	3 (4)	5 (4 emissiereductie- maatregelen)
brandstofkosten (na 10 jr)	2	1 (4)	5 (4)	4 (3)
levensduur	2	3	3	5
toegevoegde waarde (extra functionaliteit als airco, video, etc.)	2	4	3	4
duurzaamheidsaspecten als milieubelasting door afvoer van componenten	3	3 MEA's (Pt)	2 accu's (Pb, zuur)	2 smeerolie, bilgenwater
toekomstaspecten als dieselmotoren en te verwachten verscherpte regelgeving omtrent lucht-/geluidsemissies	3	5	5	1
Totaalscore (na 10 jr)		202 (214)	211 (211)	193 (189)

N.B.: In deze analyse is er van uit gegaan dat er geen 'kinderziekten' meer zijn bij zowel de accu- als de brandstofcelboot; de brandstofcelboot is nieuwbouw

Uit de sterkte/zwakte-analyse blijkt dat momenteel de accu-gevoede elektrische rondvaartboot de hoogste score behaalt; over 10 jaar is dat de brandstofcel-gevoede elektrische rondvaartboot, nauw gevolgd door de accu-gevoede boot. Met name de hoge investerings- en brandstofkosten en de door de auteurs ingeschatte veiligheidsperceptie maken dat nu de brandstofcel-gevoede boot nog een lagere score behaalt dan de accuboot.

Met veiligheidsperceptie wordt de perceptie bij het grote publiek bedoeld: hoe ervaren zij de veiligheid van het type aandrijving? Uit internationale studies⁴ is gebleken dat een groot gedeelte van het ondervraagde publiek indifferent staat tegenover het gebruik van H₂. Een ander, eveneens aanzienlijk gedeelte van het publiek associeert H₂ met groen, duurzaam en als zodanig gewenst. Een betrekkelijk klein gedeelte ziet H₂ als een bedreiging.

De score die hier gegeven is aan het item veiligheidsperceptie wijkt af van die van voornoemde studies, omdat de opstellers van dit rapport in het dagelijks leven regelmatig geconfronteerd worden met kritische vragen met betrekking tot de veiligheid van H₂. Al met al kan gesteld worden, dat hier een zeker risico ligt. Indien publieke voorlichting over H₂ niet op de juiste wijze zal plaatsvinden, of in het geval van het optreden van één of enkele ernstige ongevallen met H₂, zou de perceptie bij het brede publiek zich zeer wel mogelijk ten nadele van H₂ kunnen ontwikkelen.

Opvallend zijn de kleine verschillen tussen de drie verschillende boten, de scores liggen binnen 10% van het gemiddelde. Dit geeft aan dat er geen uitgesproken sterke keus is te maken voor één van deze drie typen rondvaartboot. Wat hier mee speelt, is het grote aantal punten waarop deze sterkte/zwakte-analyse is uitgevoerd: er ontstaat een 'natuurlijke' middeling van de verschillen.

⁴ <http://www.accepth2.com/results/index.html>

Om de specifieke sterke punten van zowel de brandstofcel- als accu-gevoede rondvaartboot aan te duiden, de twee typen met de hoogste score, zijn de items waarbij de grootste verschillen in score optreden tussen *deze twee* typen aandrijving in groen weergegeven. De sterke punten van de brandstofcel-gevoede boot zijn de energie-efficiëntie well-tank en het totaal gewicht; van de accu-gevoede boot zijn dat de (door de opstellers ingeschatte) veiligheidsperceptie, de investerings- en brandstofkosten.

De dieselaangedreven rondvaartboot scoort, ten opzichte van de andere twee systemen, hoog op de actieradius per 'tank'lading, EMC, investeringskosten en levensduur; en laag op geluidsproductie, luchtemissies, comfort (geluid, geur), manoeuvreerbaarheid en toekomstaspecten als dieselkosten, en te verwachten verscherpte regelgeving omtrent lucht-/geluidsemissies.

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

Vooralsnog is de brandstofcel-gevoede, elektrische rondvaartboot economisch (zonder subsidies) niet haalbaar, technisch is het echter wel haalbaar. De investerings- en brandstofkosten van een brandstofcelsysteem zijn momenteel nog veel hoger dan die van een accu-systeem of een diesel-systeem. De sterkte/zwakte-analyse geeft wel aan, dat als naast economische factoren ook technische en milieu-aspecten meegenomen worden, de brandstofcel-gevoede rondvaartboot over 10 jaar een aantrekkelijkere optie is dan een accu-gevoede boot. De kosten van een brandstofcelsysteem en van de brandstof blijven echter, onder de aannames die in dit rapport gemaakt zijn, wat hoger dan van de overige twee systemen (respectievelijk 2% en 45% ten opzichte van een accu-systeem). Eén en ander hangt dus sterk af van het verloop van deze kosten over de komende jaren.

5.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt een project te starten waarin een door brandstofcellen aangedreven (rondvaart)boot wordt gerealiseerd en beproefd. Het beproeven onder realistische bedrijfscondities moet, waar het gaat om het gebruik van brandstofcellen en waterstof in vaartuigen, informatie verschaffen over het functioneren in de praktijk en over maatschappelijke inpasbaarheid. De reikwijdte van een dergelijk project is groter dan de rondvaarttoepassing alleen. Immers, de brandstof en de technologie waar het hier om gaat, H₂ en brandstofcellen, zijn toepasbaar op vele gebieden. De onderzochte rondvaartboottoepassing biedt evenwel een unieke marktniche. Immers, er wordt door de vergunningverlener verzocht dat met stille en emissievrije boten wordt gevaren, waardoor de voorlopige goedkopere maar vuilere dieseltechnologie eigenlijk als concurrent is komen te vervallen. Daarnaast komt de boot steeds weer op één punt terug, waardoor de H₂-infrastructuur makkelijk is te verwezenlijken. En, het karakter van een rondvaartboot brengt met zich mee dat veel personen binnen relatief korte tijd kennis kunnen maken met de nieuwe technologie. Er wordt een positief effect verwacht op het imago van Delft/Nederland. Met een dergelijk project wordt dan ook een belangrijke stap gezet in de transitie naar een maatschappij waarin H₂ een belangrijke rol vervult als groene en duurzame energiedrager in het transport.

Tevens wordt aanbevolen om in het project aandacht te besteden aan de maatschappelijke inpasbaarheid. Zijn er al duidelijke normen op basis waarvan het aandrijfsysteem aan boord en de tijdelijke opslag plus tankinstallatie aan de wal kunnen worden gerealiseerd? Hoe gaan verzekeraars om met het gebruik van H₂? En last-but-not-least: hoe reageert het publiek? Bij de invoering van een nieuwe brandstof als waterstof is de publieke acceptatie hiervan van groot belang. Hoewel de auteurs in contacten met niet in de materie ingevoerde personen regelmatig kritische vragen beluisteren, laat een internationale studie⁵ zien dat een groot deel van het publiek nog geen uitgesproken mening heeft, een ander deel is positief en een betrekkelijk klein deel

⁵ <http://www.accepth2.com/results/index.html>

is afwijzend. Wat is de mening van het publiek aangaande het gebruik van H₂, niet alleen in de betreffende boot maar ook als toekomstige energiedrager? Is de mening van het publiek robuust positief, of kan een H₂-gerelateerd ongeval of andere gebeurtenis makkelijk leiden tot een algemeen gevoel van onveiligheid, eventueel tot afwijzen?