

ECN-C--05-038



AIR
PRODUCTS 



WEXTEX

Een experimentruimte voor waterstof op Texel

K.A. Duijves

R. Smit

MAART 2005

Verantwoording

Deze haalbaarheidsstudie is uitgevoerd onder de regeling Ondersteuning Transitie Coalities en via SenterNovem gesubsidieerd door het Ministerie van Economische Zaken.

Met ondersteuning van de Stichting Shell Research is door een consortium bestaande uit ECN, Gemeente Texel, Stichting Duurzaam Texel en Air Products Nederland een studie verricht naar de haalbaarheid van een waterstofdemonstratieproject op Texel. Tebodin Consultants en Engineers was subcontractor in dit project. Het project is bij ECN bekend onder projectnummer 7.0054.

Gegevens project

Projectnummer	OTC 5005-03-20-01-052
Projecttitel	"WEXTEX, een experimentruimte voor waterstof of Texel"
Penvoerder	Energieonderzoek Centrum Nederland Westerduinweg 3 1755 ZG Petten Contactpersoon: Klaas Duijves Tel. 0224 564443 duijves@ecn.nl
Medeaanvrager 1	Air Products Nederland B.V. Postbus 59031 3008 PA Rotterdam Contactpersoon: Pim Meyboom Tel. 010 2961336 meyboop@airproducts.com
Medeaanvrager 2	Gemeente Texel Postbus 200 1790 AE DEN BURG Contactpersoon: Roel Struick Tel. 0222 362189 rjstruick@texel.nl
Subcontractant	Tebodin Consultants & Engineers Laan van NOI 25 Postbus 16029 2500 BA Den Haag Contactpersonen: Mark Elderman Tel.: 070 3480573 m.elderman@tebodin.nl Ruud Visser Tel.: 070 3480315 r.visser@tebodin.nl
Verslagperiode	1 augustus 2004 tot en met 25 februari 2005

Abstract

In this study the feasibility of a hydrogen demonstration project on the island of Texel has been investigated. At first the hydrogen will be produced by the reforming of natural gas and will be transported by a pipeline to a combined heat and power facility based on a fuel cell. The target location of this hydrogen infrastructure is the visitors centre EcoMare. In the long term the hydrogen is produced from renewable sources such as biogas or electricity from wind turbines. During the second phase of the project hydrogen is also used for transportation purposes like busses and taxis.

This study has been executed by a consortium of ECN, Community of Texel, the Foundation Duurzaam Texel and Air Products Holland and was sponsored by SenterNovem and the Foundation Shell Research. Tebodin Consultants and Engineers was subcontractor.

A base case has been investigated consisting of the components mentioned above, together with three modules to expand this base case with mobile applications, a larger fuel cell and CO₂ capture and storage. The required investment and exploitation costs together with the energy savings and the reduction of CO₂-emissions have been determined.

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	6
LIJST VAN FIGUREN	6
SAMENVATTING	7
1. INLEIDING	9
2. DOELSTELLING	11
3. WERKWIJZE	12
4. RESULTATEN	13
4.1 Inleiding	13
4.2 Selectie van de locatie	13
4.3 Energievraag EcoMare	14
4.4 Base case	15
4.5 Besparingen Base Case	16
4.6 Uitbreidingen	17
4.6.1 Mobiele toepassingen	17
4.6.2 Grotere brandstofcel	18
4.6.3 CO ₂ opslag	20
4.7 Base case en 3 uitbreidingen	23
4.8 Besparingen base case en uitbreidingen	25
4.9 Knelpunten en uitdagingen	26
4.10 Coalitievorming	27
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	28
BIJLAGE A VRAGENLIJST ECOMARE	29
BIJLAGE B BESPREKINGSVERSLAG BEZOEK ECOMARE	29
BIJLAGE C PLATTEGROND VAN BASE CASE OP ECOMARE	30

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1 Partijen en hun inbreng binnen het project "WEXTEx"	11
Tabel 2 Investeringskosten voor de base case	16
Tabel 3 Operationele kosten voor de base case	16
Tabel 4 Investeringskosten voor de uitbreiding naar mobiele toepassingen	18
Tabel 5 Operationele kosten verbonden aan de uitbreiding naar mobiele toepassingen.....	18
Tabel 6 Investeringskosten voor uitbreiding naar een 50 kW brandstofcel met seizoenswarmte- opslag.....	20
Tabel 7 Investeringskosten voor het opslaan van CO ₂ die is vrijgekomen bij de waterstofproductie.....	21
Tabel 8 Operationele kosten verbonden aan de uitbreiding naar CO ₂ opslag	22
Tabel 9 Variabele en operationele kosten voor de base case met alle uitbreidingen.	23
Tabel 10 Omzettingsrendementen voor de processen in referentie -en waterstofsysteem.....	24
Tabel 11 Jaarlijkse CO ₂ emissies en jaarlijks primair energieverbruik.....	25

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1 Schematische weergave van een minimale infrastructuur op korte termijn.....	9
Figuur 2 Schematische weergave van de uitbreiding van infrastructuur op middellange termijn.	10
Figuur 3 Schematische weergave van de integratie van een waterstof infrastructuur in een duurzame energievoorziening.....	10
Figuur 4 Energieverbruik per maand en thermische en elektrische basislast op EcoMare	14
Figuur 5 Schattig voor de belastingduurkromme voor de elektriciteitsvraag op EcoMare	15
Figuur 6 Schematische weergave van de base case	15
Figuur 7 Schematische weergave van de uitbreiding naar mobiele toepassingen	18
Figuur 8 Schematische weergave van de uitbreiding naar een grotere brandstofcel en warmteopslag	19
Figuur 9 Schematische weergave van de uitbreiding naar CO ₂ opslag.....	21
Figuur 10 Begrote investeringskosten van de waterstofinfrastructuur op Texel	23
Figuur 11 Waterstof infrastructuur met een 50kW warmtekracht systeem in combinatie met een seizoensopslag voor warmte en een bus op waterstof in plaats van een bus op diesel.....	26

SAMENVATTING

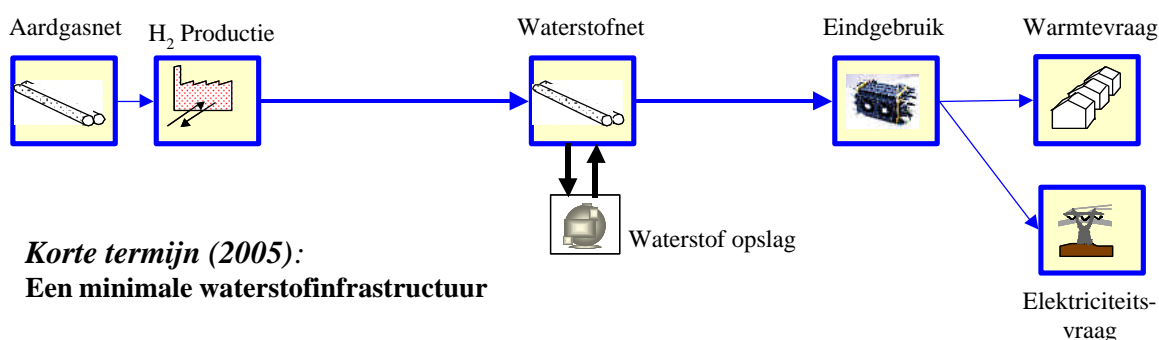
Het project behelst het onderzoek naar de haalbaarheid van een uniek waterstofdemonstratieproject op Texel. Het project wordt uitgevoerd door een coalitie aangevoerd door ECN en bestaande uit de Gemeente Texel, de Stichting Duurzaam Texel en Air Products Nederland met ondersteuning van de Stichting Shell Research. Subcontractor is Tebodin Consultants en Engineers. In eerste instantie wordt waterstof geproduceerd middels reforming van aardgas. De waterstof wordt via een leiding gevoed aan een WKK installatie met een brandstofcel in EcoMare. Op langere termijn zal waterstof uit duurzame bronnen worden verkregen. In de volgende fase van het project zal ook het gebruik van waterstof in mobiele toepassingen worden gerealiseerd, bijvoorbeeld in een bus, taxi's etc.

Beschouwd is een base case bestaande uit bovengenoemde componenten. Daarnaast zijn uitbreidingsmodules bekeken te weten: mobiele toepassingen, een grotere brandstofcel en CO₂ sequestratie. Van deze toepassingen zijn de investerings- en exploitatiekosten bepaald en is een inschatting gemaakt van de energiebesparing en de reductie van de CO₂ emissie.

De investeringen voor een waterstof productie unit, een stuk waterstof infrastructuur en een warmtekrachtsysteem op basis van een 15kW brandstofcel, bedraagt 1,32 M€ Niet alleen wordt er met dit systeem een kern voor een waterstofinfrastructuur gecreëerd, ook wordt er jaarlijks € 12.000,- aan energie en 6 ton aan CO₂ bespaard. Deze CO₂ reductie kan echter tot 90 ton per jaar verhoogd worden als de CO₂ die vrijkomt bij de waterstofproductie ook wordt afgevangen en wordt opgeslagen of nuttig gebruikt. Bovengenoemde waterstofinfrastructuur kan worden uitgebreid tot in de wereld unieke "waterstofeconomie" waarin CO₂ afvangst, een warmtekrachtinstallatie op basis van een 50kW brandstofcel en een waterstoftankstation gecombineerd worden. Hiervoor bedragen de investeringskosten 4,9 M€ De besparing aan energiekosten is in dit geval €21.000,- per jaar en de emissiereductie aan CO₂ bedraagt dan 340 ton per jaar.

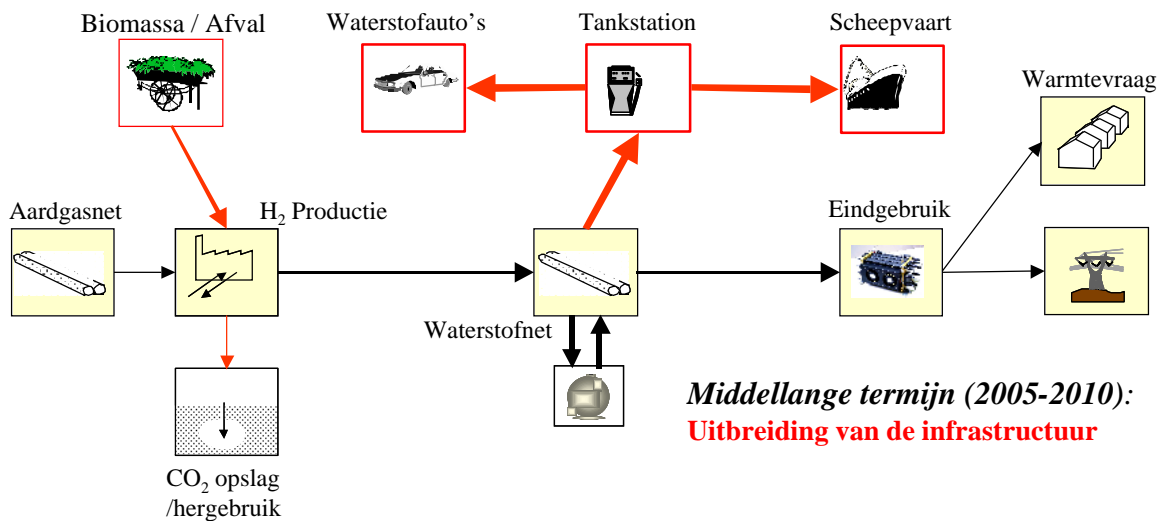
1. INLEIDING

De introductie van waterstof als energiedrager vergt een transitie. Kenmerkend voor een transitie is dat het een proces is dat een ingrijpende verandering vereist op het technologisch en (bedrijfs-)economisch vlak en waarbij een groot aantal partijen betrokken dient te zijn. Het aansturen van een dergelijke transitie (transitiemanagement) vraagt om een gemeenschappelijk eindbeeld. Voor Texel is een beeld van een volledig duurzame en onafhankelijke energievoorziening in 2030 het vertrekpunt. Waterstof kan daarin een belangrijke rol spelen voor wat betreft de buffering van duurzame energie en in de vervoersector. Het 'transitiepad' waarvan in dit project wordt uitgegaan, is in de onderstaande figuren uitgewerkt.



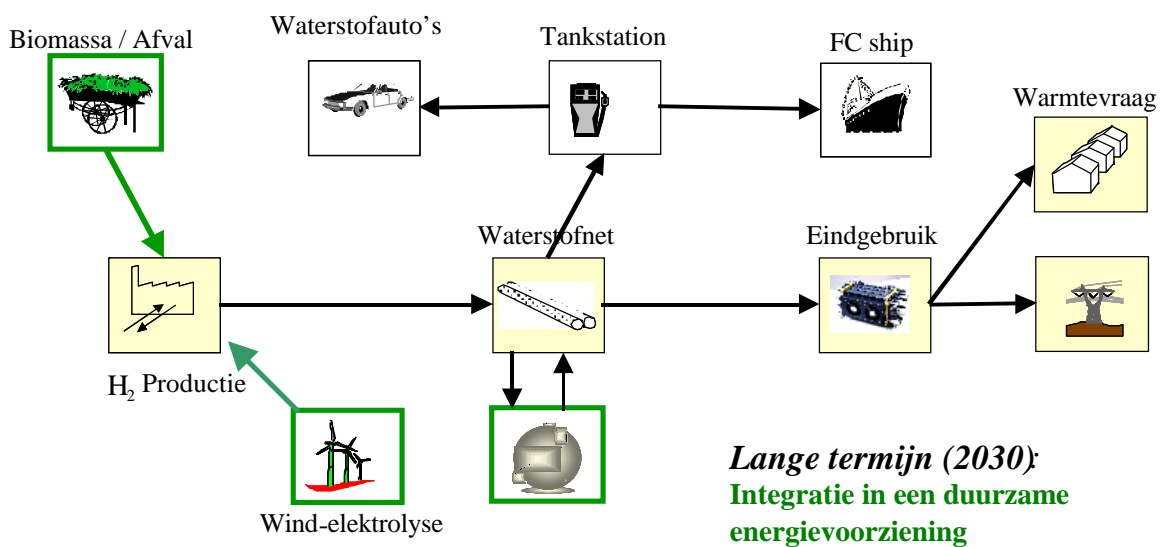
Figuur 1 Schematische weergave van een minimale infrastructuur op korte termijn.

In de eerste stap wordt door het uitvoeren van een demonstratie met een warmtekracht systeem met waterstof als brandstof een begin gemaakt. De rol van het project in de transitie is het realiseren van een eerste infrastructuur. Door ontkoppeling (en over-dimensionering) van waterstofproductie en eindgebruik, wordt een minimale eerste fysieke infrastructuur gerealiseerd. Even belangrijk is de niet-fysieke infrastructuur: een kader voor de regelgeving rond gebruik, distributie en transport van waterstof, kennis van de mogelijkheden en risico's met betrekking tot het gebruik van waterstof bij inwoners en ondernemers op Texel, betrokkenheid van de in vervolgstappen benodigde partijen.



Figuur 2 Schematische weergave van de uitbreiding van infrastructuur op middellange termijn.

In de vervolg fase kan het systeem worden uitgebreid met andere toepassingen en andere productiemethodes. Daarbij is van belang dat het bestaan van een infrastructuur betekent dat projecten kunnen worden uitgevoerd waarbij niet in één keer de hele keten gerealiseerd hoeft te worden. De drempel voor waterstoftechnologie projecten wordt daardoor verlaagd.



Figuur 3 Schematische weergave van de integratie van een waterstof infrastructuur in een duurzame energievoorziening.

Op de lange termijn wordt door inzet van waterstof introductie van een aanzienlijke hoeveelheid duurzame energie mogelijk gemaakt. De functies van waterstof zijn daarbij met name buffering en brandstof voor vervoer.

2. DOELSTELLING

Het project behelst het nagaan van de haalbaarheid van een praktijkexperiment rond de inzet van waterstof als energiedrager in de gemeente Texel. De keuze van een specifieke inrichting van het experiment was onderdeel van de verkenning. De focus is kleinschalige waterstofproductie, transport van waterstof via een leiding en de inzet van de waterstof in een warmtekracht installatie (50-100 kW). Het praktijkexperiment moet bijdragen aan het streven naar een volledig duurzame energievoorziening in 2030, zoals beschreven in de 'Structuurvisie' die in opdracht van de stichting Duurzaam Texel is opgesteld. Het project moet antwoord geven op de volgende vragen:

- Op welke manier kan de inzet van waterstof op Texel bijdragen aan het realiseren van een volledig duurzame energievoorziening;
- Welke transitiepaden, waarbij de inzet van waterstof tot ontwikkeling komt, zijn mogelijk om dat eindbeeld te realiseren?
- Welke praktijkexperimenten, die op korte termijn gerealiseerd kunnen worden, passen binnen die transitiepaden?

In het project wordt een plan uitgewerkt voor een praktijkexperiment passend binnen een transitie naar een duurzaam Texel. Tevens wordt nagegaan welke partijen gezamenlijk het praktijkexperiment kunnen en willen uitvoeren. Het project is er op gericht te komen tot een samenwerkingsovereenkomst tussen deze partijen.

De partijen door wie deze studie is uitgevoerd en hun inbreng staan vermeld in Tabel 1.

Tabel 1 Partijen en hun inbreng binnen het project "WEXTEX"

Partner	Hoofdvestiging	Inbreng in het project
ECN	Petten	Coördineert het project en brengt kennis in op het gebied van waterstoftechnologie en implementatie van waterstof als energiedrager.
Air Products Nederland	Rotterdam	Heeft als onderdeel van een vooraanstaand internationaal gasleverancier, grote deskundigheid op het gebied van waterstoftechnologie, waaronder productie van waterstof en veiligheid.
Gemeente Texel en Stichting Duurzaam Texel	Texel	Voeren al jaren een zeer actief beleid op het gebied van Duurzame Energie en dragen er voor zorg dat het project aansluit bij de ontwikkelingen op Texel.
Tebodin Consultants & Engineers	Den Haag	Heeft een grote ervaring met energiesystemen en waterstof, zowel met onderzoek als realisatie in gebouwde omgeving en industrie. Uitgevoerde werkzaamheden zijn: het opstellen van vragenlijsten, evaluatie locaties en de technische inpassing van een WKK systeem o.b.v. een brandstofcel.

3. WERKWIJZE

De aanpak richt zich op de haalbaarheid van de realisatie van een praktijkexperiment met gelijktijdig de verkenning van mogelijkheden om het experiment verder uit te breiden (andere gebruikers, andere opties voor waterstofproductie). De kern van het praktijkexperiment richt zich op het ontwikkelen van een kiem voor een (minimale) waterstofinfrastructuur. Een concrete invulling van een eerste stap in de ontwikkeling van een infrastructuur, die past bij de belangen van marktpartijen is het demonstreren van een warmtekracht systeem in een waterstofinfrastructuur. Deze demonstratie moet rekening houden met de stand van zaken van de technologie en de te realiseren overheidsdoelstellingen.

Een warmtekracht systeem o.b.v. lage temperatuur brandstofcellen (PEMFC) wordt gebruikt om elektriciteit en warmte te leveren aan bezoekerscentrum EcoMare. De geproduceerde elektriciteit en warmte wordt gebruikt door EcoMare. Een overschot aan elektriciteit wordt aan het net geleverd, een eventueel tekort wordt van het net betrokken. Als brandstof voor de brandstofcel wordt waterstof gebruikt, dat wordt geproduceerd uit aardgas op een nabij gelegen locatie.

De kosten voor de waterstof infrastructuur van het praktijkexperiment op Texel zijn geschat aan de hand van een "base case". Deze base case stelt een minimale infrastructuur voor waarbij de kosten zo laag mogelijk worden gehouden. Deze base case kan vervolgens worden uitgebreid met verschillende modules die functionaliteiten aan de waterstof infrastructuur toevoegen. Door uitbreiding met faciliteiten voor vervoerstoepassingen en het afvangen van CO₂ kan brede ervaring worden opgedaan met een geïntegreerd energievoorzieningsstelsel op basis van waterstof en kan een maximale CO₂ reductie worden behaald. Voor elke uitbreiding van de waterstof infrastructuur worden de kosten geschat. De kosten voor de uitbreidingen zijn dus meerkosten ten opzichte van de base case en kunnen onafhankelijk van elkaar gekozen worden. De base case vormt samen met alle uitbreidingsmodules de meest ambitieuze waterstof infrastructuur en is dus het meest ambitieuze praktijkexperiment op Texel dat in deze haalbaarheidstudie beschouwd wordt.

4. RESULTATEN

4.1 Inleiding

De cijfers voor de investeringskosten, engineeringkosten, onvoorziene kosten en variabele kosten zijn gebaseerd op gegevens en schattingen van ECN en Tebodin. Hiernaast zijn "budgetquotes"¹ van een brandstofcelfabrikant Nedstack en een reformerfabrikant Hexion gebruikt om de investeringskosten en variabele kosten te bepalen. Alle investeringskosten zijn gegeven in Euro's en alle variabele kosten zoals onderhoud zijn gegeven in Euro per jaar. De totale investeringen omvatten investeringen voor deelcomponenten en bijkomende kosten, zoals montage, fundatie, gebouw, piping, pompen, bekabeling, beveiliging, monitoring etc. Daarnaast zijn kosten voor engineering (geschat of 10 % van de investeringskosten) en projectbegeleiding apart begroot. Voor wat betreft de onvoorziene kosten wordt uitgegaan van een percentage van 25% over de investeringskosten + engineeringkosten. Bij de onderhoudskosten van de verschillende apparaten en onderdelen in het praktijkexperiment is uitgegaan van een vast percentage van 2,7% (dit is een praktijkgegeven) over de investeringskosten van het betreffende onderdeel.

4.2 Selectie van de locatie

Na een eerste selectie zijn er op Texel vier locaties geïdentificeerd als geschikte en meeste veelbelovende locaties voor het praktijkexperiment met waterstof. Deze locaties zijn respectievelijk het nieuwe gemeentehuis van Texel, het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ), bezoekerscentrum EcoMare en het vakantiecentrum De Krim. Om een goed beeld te krijgen van de energievoorziening op deze vier locaties, hebben de vertegenwoordigers vragenlijsten ingevuld waarin uiteen wordt gezet wat het energieverbruik is en hoe de huidige installaties voor de warmtevoorziening en elektra er uit zien (bijlage A: vragenlijst EcoMare). Bij de keuze voor de locatie van het praktijkexperiment is gekeken naar de energievraag als functie van de tijd, de praktische inpasbaarheid van een warmtekracht systeem en het uitstralings-effect van de locatie.

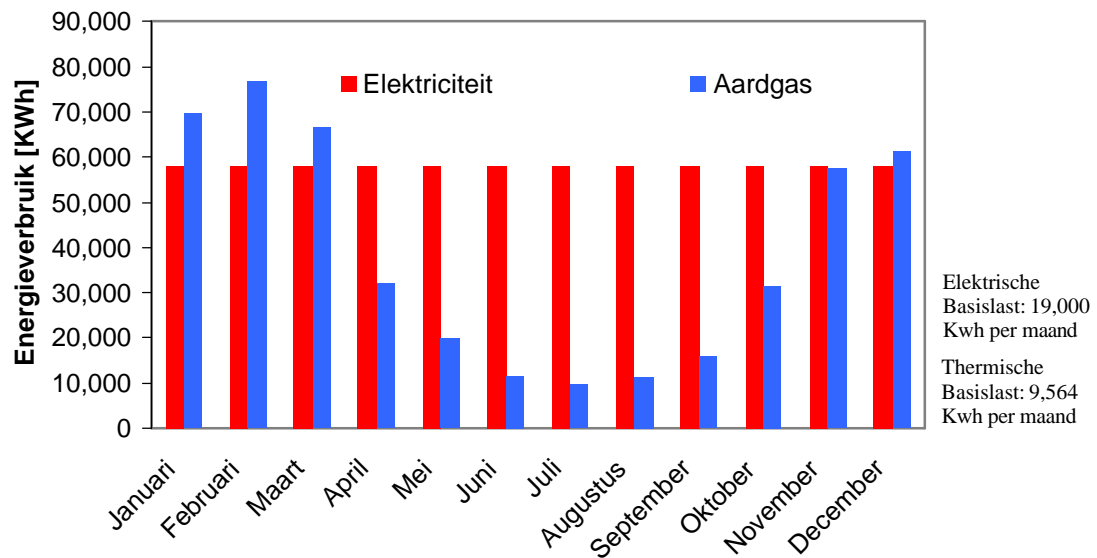
Hieruit is geconcludeerd dat in eerste instantie het NIOZ af valt omdat dit centrum reeds beschikt over een onlangs in eigen beheer genomen en gereviseerde warmtekrachtsysteem in de vorm van een gasmotor. Momenteel valt het nieuw te bouwen gemeentehuis van Texel ook af. Aangezien het nieuwe gemeentehuis van Texel pas rond 2008 gebouwd zal gaan worden, zijn er geen gebruiksgegevens hiervan bekend. Bovendien wordt voorzien dat dit experiment op een kortere termijn zal plaatsvinden dan het jaar 2008. Een groot voordeel van een nieuw te bouwen locatie is echter het feit dat het warmtekracht systeem op basis van waterstof vanaf de nieuwbouw volledig geïntegreerd kan worden in de energievoorziening.

¹ Investeringskosten +/- 25%

Rekening houdende met de kenmerken van de energievoorziening en in overleg met de plaatselijke vertegenwoordigers is besloten om in eerste instantie het centrum EcoMare als uitgangspunt voor het praktijkexperiment te gebruiken. Het is van belang hier te vermelden dat alleen de zogenaamde "base case²" met de mensen van EcoMare is besproken, eventuele uitbreidingen zijn nog niet voorgelegd. Een extra overweging bij de keuze voor EcoMare is het *enthousiasme* van de mensen van EcoMare en het grote *uitstralings-* en *demonstratie-effect* (350.000 bezoekers per jaar). Bovendien lijken de elektrische, thermische, gaszijdige en bouwkundige inpassingen relatief eenvoudig (bijlage B). Met de vertegenwoordigers van vakantiepark "De Krim" zijn nog geen gesprekken gevoerd, maar deze locatie wordt mede met het oog op mogelijke infrastructurele uitbreidingen voorsnog als back-up locatie gebruikt.

4.3 Energievraag EcoMare

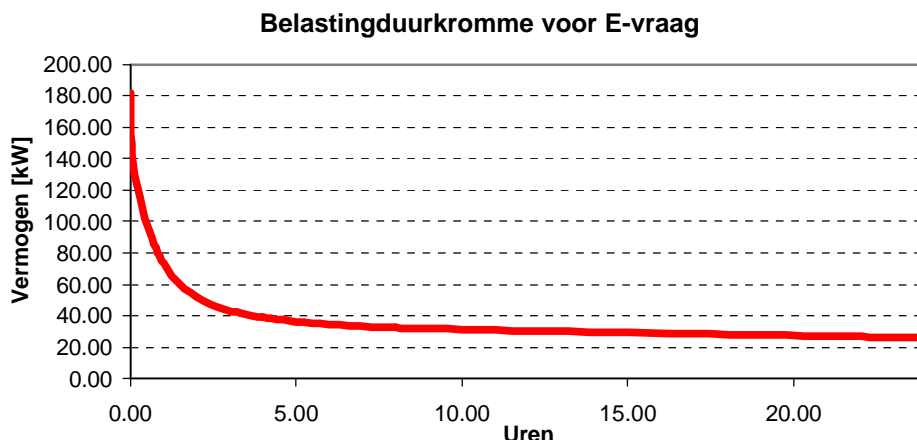
De huidige warmtevraag bij EcoMare wordt gedekt door twee gasketels met een nominaal vermogen van respectievelijk 390 en 425 kW. Het totale verbruik per jaar is ongeveer 47.000 m³ aardgas wat overeenkomt met 464.000 kWh. Over het gehele jaar gezien heeft EcoMare in de maand juli het laagste aardgasverbruik, ofwel met andere woorden: de thermische basislast is de warmtevraag in de maand juli. Deze basislast bedraagt ongeveer 10.000 kWh wat overeen komt met bijna 1000 m³ aardgas per maand. Het elektriciteitsverbruik is vrijwel constant gedurende het jaar, gedurende een dag varieert dit gebruik echter aanzienlijk. Er wordt namelijk gemiddeld over een dag 79 kW aan elektriciteit gebruikt, waarvan ongeveer 26kW ofwel 19.000 kWh per maand de elektrische basislast is. Deze basislast wordt veroorzaakt door bassinpompen die 24 uur per dag een constant vermogen vragen. Het overige vermogen wordt gevraagd door het inschakelen van kantoorapparatuur, overige pompen en verlichting. In Figuur 4 wordt het energieverbruik op EcoMare grafisch weergegeven.



Figuur 4 Energieverbruik per maand en thermische en elektrische basislast op EcoMare

Om een afchatting te maken van het percentage in de totale elektriciteitsvraag dat door een warmtekracht systeem kan worden afgedekt, is een belastingduurkromme noodzakelijk. Helaas waren er tot op heden geen belastingduurkromme voor betreft het elektriciteitsverbruik op EcoMare bekend. Uitgaande van de basislast van 26 kW en een gemiddeld gevraagd vermogen van 79 kW is hier een aanname voor gemaakt in Figuur 5. Met bijvoorbeeld een 50 kW elektrische brandstofcel kan volgens de aangenomen kromme ongeveer 85% van de elektriciteitsvraag worden afgedekt.

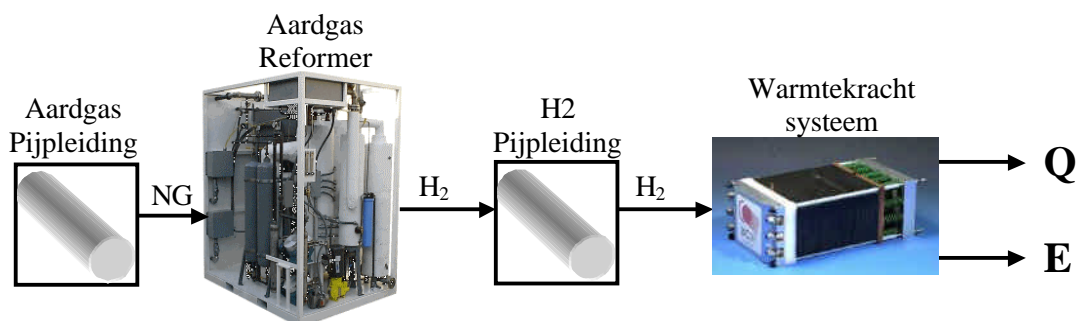
² Een WWK systeem van 15kW elektrisch o.b.v. waterstof die geproduceerd wordt door een aardgas reformer.



Figuur 5 Schattig voor de belastingduurkromme voor de elektriciteitsvraag op EcoMare

4.4 Base case

De base case wordt gezien als de minimale waterstof infrastructuur die geplaatst kan worden. Deze kleine waterstof infrastructuur bestaat uit een aardgas gevoede steam reformer die ongeveer 50 Nm³/uur aan pure waterstof produceert. Scheiding van waterstof, CO₂ en andere stoffen vindt plaats door middel van 'pressure swing adsorption' (PSA). Via een korte pijpleiding wordt de waterstof naar brandstofcel warmtekracht installatie van 15 kW geleid. De brandstofcel produceert de 'thermische basislast' wat overeenkomt met de warmtevraag in de warmste maand in het jaar; de warmtevraag is dan immers minimaal. Omdat er dus op geen moment in het jaar warmte teveel wordt geproduceerd, hoeft er geen warmte te worden opgeslagen. De totale vraag naar elektriciteit is hoger kan de 15 kW die continu door de brandstofcel geproduceerd wordt, dus de elektriciteit kan op elk moment van de dag gebruikt worden wat tot gevolg heeft dat er geen teruglevering van elektriciteit noodzakelijk is. Aangezien deze waterstof infrastructuur niet een bestaand systeem vervangt zal de warmte en de elektriciteitsvraag die niet gedekt kan worden met de brandstofcel, geleverd worden door respectievelijk de bestaande CV installatie en het elektriciteitsnet. De stoom reformer is voor dit systeem overgedimensioneerd. voor een latere mogelijke uitbreiding naar mobiele toepassingen. Voor de base case is geen uitbreiding naar mobiele toepassingen meegenomen. Er wordt dus evenveel waterstof geproduceerd als nodig voor de brandstofcel en de reformer zal dus in deellast draaien. De CO₂ die vrijkomt bij de productie van waterstof wordt wel afgescheiden, maar niet opgeslagen of nuttig gebruikt. In Figuur 6 staat de waterstof infrastructuur voor de base case schematisch weergegeven. In deze schematische weergave zijn alleen de essentiële onderdelen van de waterstof infrastructuur voor deze base case meegenomen. De onderdelen die nodig voor het systeem zijn te vinden in Tabel 2.



Figuur 6 Schematische weergave van de base case

De volledige kosten voor de base case zijn bepaald door Tebodin en ECN. De kosten voor de base case zijn opgebouwd uit kosten voor de hardware (apparaten en dergelijke), de engineering en variabele kosten zoals onderhoud en monitoring. In Tabel 2 staan alle investeringskosten voor de base case. In Tabel 3 staan de geschatte kosten voor het onderhoud aan de onderdelen van de base case en de projectleiding.

Tabel 2 Investeringskosten voor de base case

Naam	Specificaties/details	Kosten
Aardgas pijpleiding	Nieuw aansluiting op 3 bar leiding	20.000
waterstof pijpleiding/distributienet	1 bar leidingen	30.000
Brandstofcel stacks + toebehoren	15kW incl. bevochtigers, CVM, H ₂ -circulatie, luchtblower, controler	180.000
Warmte integratie systeem	Van BC-stacks een WKK-systeem maken	50.000
Spanningsomvormer	E uit BC geschikt maken voor 220V, 50Hz	10.000
Certificering + vergunningen	Met name personeelskosten	30.000
Ketelhuisje voor WKK systeem	Behuizing voor brandstofcellen	50.000
Container, toebehoren, montage	Behuizing reformer	10.000
Fundering + hek	Voor reformer	10.000
Aardgas Reformer	50 Nm ³ /uur	460.998
Aardgas compressor	Ongeveer 2 kW	10.000
E&I monitoring		30.000
Elektrotechnische installatie	Verdeelkast, bekabeling, beveiliging	12.000
	Subtotaal 1	902.000
Engineering (10%)		90.200
projectbegeleiding (1 jaar)	800 uur per jaar, 80 euro/uur	64.000
	Subtotaal 2	1.056.200
Onvoorzien/Risico (25%)		264.050
	Totaal	1.320.250

Tabel 3 Operationele kosten voor de base case

Naam	Specificaties	Kosten [EUR/jaar]
Operationele kosten reformer	Onderhoud, vervanging onderdelen	11.115
Onderhoudskosten brandstofcellen	2.7 % van de investeringskosten van 15 kW FC systeem	4.860
	Totaal	16.000

De ruimtelijk inpassing van het base case systeem op het terrein van EcoMare wordt gegeven door de plattegrond in bijlage C.

4.5 Besparingen Base Case

Met behulp van het 15 kW brandstofcel systeem produceert EcoMare een deel van zijn elektriciteit en dekt een deel van de warmtevraag af. Jaarlijks wordt door het warmtekracht systeem 105.000 kWh warmte en 126.000 kWh elektriciteit geproduceerd. Op jaarbasis betekent dit een besparing van 25.000 euro bij een elektriciteitsprijs van 0,196 euro/kWh. De vermeden inkoop aan aardgas bedraagt bijna 6.000 euro bij een aardasprijs van 0,52 euro/m³, echter de reformer gebruikt aardgas om waterstof te produceren: ruim 19.000 euro per jaar. De netto kostenbesparing voor wat betreft energie bedraagt voor EcoMare ongeveer 12.000 euro per jaar.

Omdat een deel van de warmte en kracht die gevraagd worden op EcoMare gecombineerd worden opgewekt, wordt er uiteindelijk een kleine hoeveelheid primaire energie bespaard. Hiermee wordt ook de uitstoot van CO₂ met 6 ton per jaar verminderd. Het reductiepotentieel van de base case wordt pas volledig benut als de CO₂ die vrijkomt bij de waterstof productie

ook wordt opgeslagen of nuttig gebruikt. De reductie van de hoeveelheid geëmitteerde CO₂ kan hierdoor ongeveer 12 keer zo groot worden.

4.6 Uitbreidingen

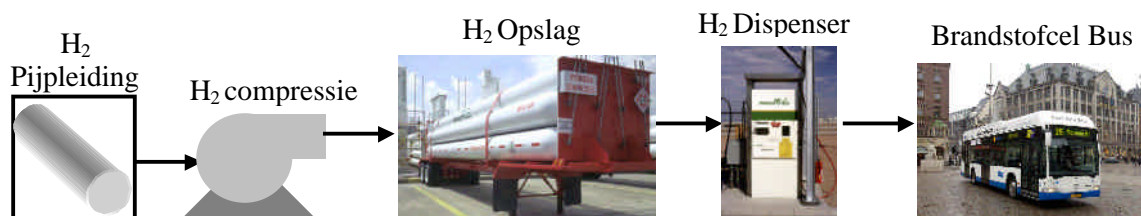
De base case kan uitgebreid worden met verschillende modules. Deze uitbreidingen zijn nog niet besproken met bijvoorbeeld EcoMare en dienen met name om een goed beeld te krijgen van extra investeringskosten voor een ambitieuzere waterstof infrastructuur. Er bestaan op dit moment veel projecten waarbij alleen naar de kosten en terugverdientijden wordt gekeken. Wat echter onderbelicht blijft is de uitstraling die een groot project op het gebied van waterstof infrastructuur met zich mee brengt. Het project heeft mede als doel te laten zien hoe een toekomstige waterstof infrastructuur eruit zal gaan kunnen zien. Om een volledig beeld hiervan te krijgen zullen alle facetten van de kleine waterstof infrastructuur of waterstof economie moeten worden meegenomen in het praktijkexperiment. Uitdagingen waar een waterstofinfrastructuur in de toekomst mee te maken krijgt, zullen nu in de praktijk moeten worden aangegaan. Uitgaande van de base case zoals deze eerder beschreven wordt er gedacht aan de volgende drie uitbreidingen:

1. **Mobiele Toepassingen:** een waterstoftankstation in combinatie met de inzet van waterstofvoertuigen voor het vervoer van bezoekers van EcoMare van en naar de veerpont.
2. **Grotere brandstofcel:** een 50kW brandstofcel gebruiken waarbij elektriciteit wordt teruggeleverd aan het elektriciteitsnet en waarbij warmte wordt opgeslagen in een seizoensopslag.
3. **CO₂ opslag:** het afvangen, comprimeren, opslaan en afvoeren van CO₂.

De uitbreidingen op de base case vergroten het leereffect van het project, er wordt immers meer van de waterstofinfrastructuur neergezet, er kan dus ook meer geleerd worden van het gebruik van deze infrastructuur. Door het systeem uit te breiden kan de uitstoot van CO₂ sterker worden gereduceerd. Hieronder wordt de invulling van de drie uitbreidingen kort besproken. Ook worden de investeringskosten geschat die elke uitbreiding met zich meebrengt.

4.6.1 Mobiele toepassingen

Bij de uitbreiding van de waterstofinfrastructuur naar mobiele toepassingen wordt er een tankstation voor waterstof gebouwd en wordt een waterstofvoertuig geleased of aangeschaft. Genoeg waterstof is beschikbaar voor mobiele toepassingen aangezien de reformer in de base case is overgedimensioneerd. De reformer produceert ongeveer 4,5 kg waterstof per uur. Bij een 15 kW brandstofcel is voor mobiele toepassingen nog ongeveer 3,6 kg waterstof per uur beschikbaar. Bij een 50kW brandstofcelsysteem is dit 1,4 kg waterstof per uur. Waterstof die niet door de brandstofcel wordt gebruikt, wordt nu gecompriëerd naar een druk van ongeveer 300 bar waaronder het ook wordt opgeslagen in een buffer op het tankstation. De compressor heeft een vermogen van ongeveer 6 kW en draait vrijwel 24 uur per dag. Er is vanuit gegaan dat het waterstofdagverbruik van de mobiele toepassing wordt opgeslagen in 24 vaten elk met een inhoud van 50 liter. In totaal kan er 33 kg waterstof onder een druk van iets boven 300 bar op het tankstation worden opgeslagen. Vanuit deze opslagvaten wordt via een dispenser de waterstof onder hoge druk getankt in een waterstofvoertuig. Het voertuig wat voor deze begroting gebruikt wordt is een "fuel cell bus" zoals in het CUTE-project wordt gebruikt. Deze bus verbruikt ongeveer 15 kg waterstof per 100 km. Uitgaande van de 50 Nm³/uur reformer en een brandstofcel van 50kW kan de bus dus per dag ongeveer 220 km rijden. Bij een brandstofcel van 15kW kan de bus in potentie 575 km per dag rijden. In Figuur 7 wordt de uitbreiding naar mobiele toepassingen schematisch weergegeven.



Figuur 7 Schematische weergave van de uitbreiding naar mobiele toepassingen
(Bron afbeeldingen: Air Products en DaimlerChrysler)

In Tabel 4 worden de investeringskosten gegeven voor de verschillende onderdelen van het tankstation alsmede de kosten voor een waterstofbus. Er is gekozen om de kosten voor de bus mee te nemen in de totale kosten voor uitbreiding naar mobiele toepassingen, omdat het onwaarschijnlijk zal zijn om een tankstation te installeren zonder dat hier direct een afzetmarkt voor is. Deze strategie ligt ook ten grondslag aan het idee dat vlootvoertuigen de introductie van brandstofcelvoertuigen in Nederland kan versnellen.

Tabel 4 Investeringskosten voor de uitbreiding naar mobiele toepassingen

Naam	Specificaties	Kosten
H2 hydraulische compressor	Ongeveer 6kW	90.752
H2 opslag vaten	24 vaten van 50 liter	7.328
H2 dispenser	Waterstof tankpunt	90.263
Dispenser software		19.331
H2 Pijpleidingen		3.271
Veiligheidsinspectie	Met name personeelskosten	11.000
Fundering en gebouw		20.000
Aanleg bestrating	Toegankelijkheid van tankstation	50.000
	Subtotaal 1	291.945
Engineering (10%)		29.195
	Subtotaal 2	321.140
Daimler-Chrysler "Citaro"	Waterstofbus uit het CUTE-project, lease voor een periode van 3 jaar.	1.250.000
Onvoorzien (25%)		392.785
	Totaal	1.963.925

Tabel 5 Operationele kosten verbonden aan de uitbreiding naar mobiele toepassingen

Naam	Specificaties	Kosten [EUR/jaar]
Onderhoud brandstofcel bus	2,7 % van de investeringen	33.750
Onderhoud tankstation	2,7 % van de investeringen	10.139
Kalibratiekosten dispenser		700
Energiekosten H2 compressor	7,8 kW, 8400 uur/jaar, 0,2 euro/kWh	13.000
	Totaal	57.589

4.6.2 Grotere brandstofcel

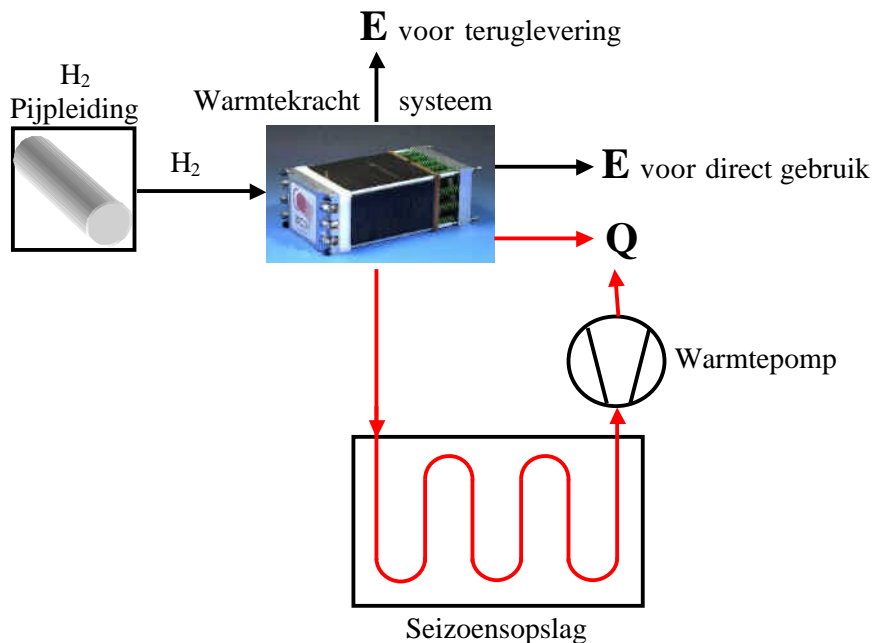
Een belangrijk leereffect bij het gebruik van de brandstofcel als elektriciteit -en warmteleverancier zit in de regelstrategie van de brandstofcel. De elektriciteitsvraag varieert gedurende de dag: er is een elektrische basislast, maar er zijn ook pieken in de vraag. De warmtevraag varieert ook gedurende een dag, maar varieert nog sterker over het hele jaar gezien. Een grotere brandstofcel geeft de mogelijkheid om verschillende regelstrategieën te

testen en in de praktijk te brengen. In de toekomst kunnen huishoudens ook gebruik gaan maken van een warmtekracht systeem op basis van een brandstofcel. Voor een woning heeft men in sterke mate te maken met de ongelijkzijdigheid in warmte -en elektriciteitsvraag.

Een gevolg van een bepaalde regelstrategie kan zijn dat er warmte moet worden opgeslagen: bijvoorbeeld in de zomer, wanneer er wel een vraag naar elektriciteit is, maar een zeer beperkte vraag naar warmte. Om geen warmte te dumpen kan het surplus aan warmte dat in de zomer wordt geproduceerd, worden opgeslagen in een (ondergrondse) seizoensopslag. In de maanden dat de brandstofcel niet voldoende warmte produceert om de vraag te dekken, kan warmte via een warmtepomp uit de seizoensopslag worden gebruikt

Ook kan er gelijktijdig een grote warmtevraag en een kleine elektriciteitsvraag voorkomen. De brandstofcel produceert dan meer elektriciteit dan op dat moment gebruikt kan worden, wat kan betekenen dat er op dat moment elektriciteit kan worden teruggeleverd aan het net. De teruglevering van elektriciteit is een zeer belangrijk issue bij het gebruik van een warmtekracht systeem in een woning en zal dus in een demonstratieproject ook uitgebreid getest moeten worden. Er zit met name een grote uitdaging in het contract of terugleververgoeding tussen de kleine elektriciteitsproducent en het energiebedrijf.

Door middel van de juiste regelstrategie, eventueel in combinatie met teruglevering van elektriciteit en opslag van warmte maakt men optimaal gebruik van het grote voordeel van de brandstofcel gevoed door waterstof: het met zeer hoog rendement gelijktijdig opwekken van warmte en elektriciteit. In Figuur 8 staat de uitbreiding naar een 50kW brandstofcel in combinatie met een warmteopslag systeem en teruglevering van elektriciteit weergegeven.



Figuur 8 Schematische weergave van de uitbreiding naar een grotere brandstofcel en warmteopslag

In Tabel 6 worden de geschatte kosten gepresenteerd voor de uitbreiding van de base case naar een systeem dat elektriciteit kan terugleveren en warmte kan opslaan. De kosten die staan vermeld zijn meerkosten exclusief engineering en onvoorziene kosten ten opzichte van de base case. Als deze uitbreiding wordt meegenomen in de berekening voor de kosten voor het totale systeem kan het totaal bedrag worden opgeteld bij de totale kosten van de base case.

Tabel 6 Investeringskosten voor uitbreiding naar een 50 kW brandstofcel met seizoenswarmteopslag.

Naam	Specificaties	Kosten [EUR]
Brandstofcel 50 kW	Meerprijs t.o.v. 15kW (exclusief engineering en onvoorzien)	420.000
Warmte integratie systeem	Meerprijs t.o.v. 15kW (schaalt niet 1 op 1 met de grootte van de FC)	20.000
Warmteopslag systeem	Inclusief warmtepomp en opslag	500.000
Spanningsomvormer	Meerprijs t.o.v. 15 kW	35.000
Engineering (10%)		94.000
	Subtotaal	1.066.000
Onvoorzien (25%)		266.500
	Totaal	1.332.500

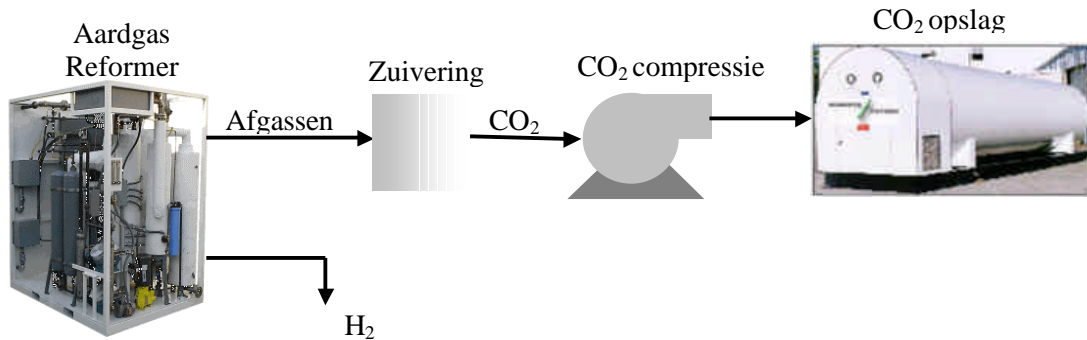
Er wordt vanuit gegaan dat de onderhoudskosten voor de het 50kW brandstofcelsysteem gelijk zijn de aan de kosten voor het 15kW systeem zoals deze staan vermeld in Tabel 3. Bij de kostenschatting voor de warmteopslag is Tebodin uitgegaan van een bovengrondse seizoensopslag waarbij warmte wordt opgeslagen in 2 vaten met water, elk met een inhoud van ongeveer 1000 m³. De isolatie van deze vaten kost typisch 100.000 euro en draagt dus voor een aanzienlijk deel bij aan de kosten. Omdat deze kosten voor warmteopslag hoog zijn, kan overwogen worden om in plaats van warmte op te slaan in de zomer, te vermijden dat er in de zomer teveel warmte wordt geproduceerd. Aangezien de besparingen op het gebied van eigen elektriciteitsproductie relatief klein zijn (zie hoofdstuk Besparingen Base Case) kan de regelstrategie van het warmtekracht systeem aangepast worden zodat de brandstofcel nooit meer warmte produceert dan gevraagd wordt. Het grote voordeel van een grotere brandstofcel blijft het feit dat een groter deel van de elektriciteitsvraag kan worden afgedekt en dat de mogelijkheid bestaat tot het terugleveren van elektriciteit. Het is echter niet nodig een brandstofcel met een elektrisch vermogen van 50kW te gebruiken, met een exemplaar van bijvoorbeeld 30kW kan in principe hetzelfde leereffect bereikt worden.

Het strekt tot de aanbeveling om de kosten voor ondergrondse warmteopslag nader uit te zoeken, des te meer omdat bovengrondse seizoenopslag in combinatie met een 50 kW brandstofcel een weinig realistische optie is. De investering zijn voor deze warmteopslag zijn hoog en bovendien is het gemiddelde warmteverlies hoger dan de hoeveelheid warmte die wordt opgeslagen. Ondergrondse seizoensopslag vraagt nadere studie. Hoge temperatuuropslag in de ondergrond gaat gepaard met relatief grote (afstroom) en convectieve verliezen. Bovendien kunnen er negatieve milieueffecten aan deze ondergrondse opslag kleven (e.g. uitloging van zouten). Lage temperatuur warmteopslag (tot 40°C) vraagt een warmtepomp, in het algemeen produceert deze echter slechts warmte tot 60°C, terwijl het systeem op EcoMare een 80-60 °C systeem is.

4.6.3 CO₂ opslag

Het volledige potentieel van CO₂ emissiereductie wordt pas benut wanneer de CO₂ die vrijkomt bij de productie van waterstof ook wordt afgescheiden en opgeslagen. De scheiding van waterstof en de afgasstroom vindt plaats door middel van "pressure swing adsorption. De afgasstroom van de reformer bevat voor het grootste deel CO₂ en hiernaast ook nog stikstof, water en koolwaterstoffen. In principe is de CO₂-houdende afgasstroom beschikbaar om te worden opgeslagen, maar is helaas niet geschikt voor toepassingen waarbij zuivere CO₂ gevraagd wordt. Bij de uitbreiding naar CO₂ opslag wordt ervan uitgegaan dat de afgasstroom eerst nog gezuiverd wordt met behulp van een katalytisch reductie. Hierna kan wordt de CO₂ gecompriemd en wordt het onder hoge druk wordt opgeslagen in een opslagtank die kan worden afgevoerd zodat de inhoud elders nuttig gebruikt kan worden. Er wordt door de

reformer van 50 Nm³/uur bijna 50 kg CO₂ per uur geproduceerd. Om deze stroom CO₂ te comprimeren naar een druk van typisch 150 bar is een compressor met een elektrisch vermogen van typisch 10kW nodig. De vrijgekomen CO₂ kan worden opgeslagen in een grote opslagtank met een capaciteit van meer dan 45 ton CO₂ die in ruim 4 weken vol zijn. De afmetingen van deze CO₂ opslagtank is ongeveer 12 bij 3 bij 3 meter. In Figuur 9 wordt schematisch weergegeven hoe de opslag van CO₂ er uit zou kunnen zien. In Tabel 7 staan de geschatte investeringskosten van de onderdelen die nodig zijn voor de opslag van het CO₂ mengsel.



Figuur 9 Schematische weergave van de uitbreiding naar CO₂ opslag

Tabel 7 Investeringskosten voor het opslaan van CO₂ die is vrijgekomen bij de waterstofproductie

Naam	Specificaties	Kosten [EUR]
CO ₂ compressor	Terugschaling van 13 MW compressor	62.101
CO ₂ opslag	Opslagtank geschikt voor vrachtvervoer	100.000
CO ₂ pijpleidingen	Schatting o.b.v. H ₂ pijpleidingen	13.000
Zuivering	Schatting	15.000
Engineering (10%)		19.010
Subtotaal		209.100
Onvoorzien (25%)		52.250
Totaal		261.350

Met name aan de afvoer van volle CO₂ opslagtanks en de aanvoer van lege opslagtanks zijn aanzienlijke variabele kosten verbonden. Er is momenteel nog geen concrete afnemer van de CO₂ gevonden, maar wellicht is de glastuinbouw in Noord-Holland een geschikte afzetmarkt. Een typisch kasgewas (paprikateelt) kan ongeveer 10 kg CO₂ per jaar per vierkante meter opnemen. Gebruikmakend van dit cijfer en het gegeven dat er per jaar ongeveer 410 ton CO₂ vrijkomt, is er een kasoppervlak nodig wat gelijk staat aan 0,23% van het gehele oppervlak aan kassen in de provincie Noord-Holland.

Er worden echter veel kosten bespaard wanneer de CO₂ niet vervoerd hoeft te worden. Helaas vindt er op dit moment geen kasbouw plaats op Texel, zodat er geen directe afzetmarkt op het eiland zelf is. Wel zou er een kas gebouwd kunnen worden in de buurt van de plek waar de CO₂ houdende stroom vrijkomt. Een korte pijpleiding zou dan circa 4 hectare aan kasoppervlak kunnen voorzien van CO₂. Met deze optie worden de kosten voor het comprimeren, opslaan en vervoeren van de CO₂ vermeden. Een katalytische oxidatie achter de reformer moet echter nog steeds worden geïnstalleerd omdat de CO₂ houdende afgasstroom van de reformer, stoffen zoals bijvoorbeeld etheen kan bevatten. Deze stoffen zijn zeer schadelijk voor de gewassen en mogen niet in de kas terechtkomen. Door een integratie van kasbouw en dit praktijkexperiment met waterstof wordt de lokale economie en het ondernemerschap gestimuleerd. Op dit moment

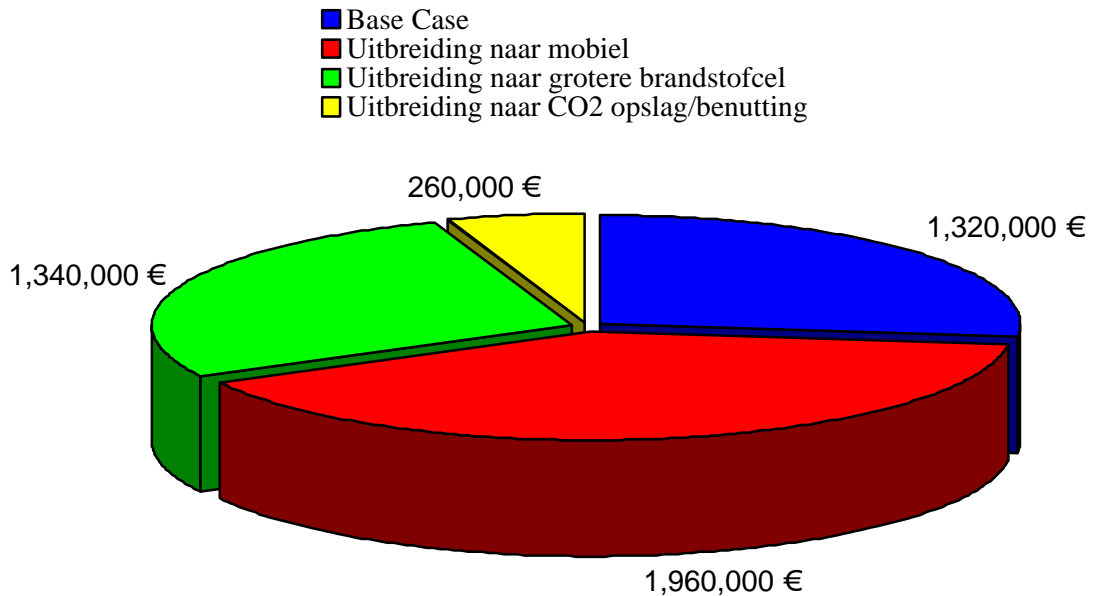
wordt CO₂ in kassen veelal geproduceerd door middel van aardgas. Door gebruik te maken van de CO₂ die is vrijgekomen bij de waterstofproductie, kan de inkoop van aardgas door tuinders vermeden worden. Deze veelbelovende uitbreiding vraagt echter nog nadere uitwerking en is niet in de huidige begroting meegenomen.

Tabel 8 Operationele kosten verbonden aan de uitbreiding naar CO₂ opslag

Naam	Specificaties	Kosten [EUR/jaar]
Onderhoud CO ₂ compressor	2,7 % van de investeringen	1.700
Aan -en afvoer van opgeslagen CO ₂		p.m.
Energiekosten voor compressie	10 kW, 8400 uur/jaar, 0,2 eur/kWh	16.800
Totaal		18.500

4.7 Base case en 3 uitbreidingen

De base case samen met de drie uitbreidingen is het meest ambitieuze systeem dat in deze haalbaarheidstudie voor een praktijkexperiment met waterstof op Texel wordt beschouwd. In Figuur 10 is een overzicht gegeven van de investeringskosten van de base case en hoe de verschillende uitbreidingen bijdragen aan de totale kosten van het meest ambitieuze systeem:



Figuur 10 Begrote investeringskosten van de waterstofinfrastructuur op Texel

De totale begrote investeringskosten van het meest ambitieuze systeem zijn 4,9 miljoen Euro. Deze kosten zijn inclusief engineering, onvoorziene kosten, maar exclusief de kosten voor bijvoorbeeld een projectleider of het onderhoud gedurende de looptijd van het project. Deze twee laatste posten kunnen zeker nog aanzienlijke kosten met zich meebrengen. Bij een eventuele investeringsbeslissing zal hier zeker rekening mee gehouden moeten worden. Gedurende de looptijd van het project zullen variabele kosten voor zaken als onderhoud en operationele kosten ook een belangrijke rol spelen. De kosten worden gegeven in Tabel 9 en zijn grotendeels gebaseerd op schattingen van Tebodin en ECN.

Tabel 9 Variabele en operationele kosten voor de base case met alle uitbreidingen.

Naam	Specificaties	Kosten [EUR]
Operationele kosten reformer	Opgaaf van Hexion	11.115
Onderhoud aan stacks	2,7% van de investeringen (15kW)	4.860
Onderhoud aan stacks	Voor 50 kW, meerpijs t.o.v. 15 kW	11.340
Onderhoud CO ₂ compressor	2,7% van de investeringen	1.677
Aan/afvoer CO ₂ opslag		p.m.
Onderhoud CO ₂ opslag		366
Energiekosten CO ₂ compressie	10 kW, 8400 uur/jaar, 0,2 euro/kWh	16.800
IJkingskosten dispenser		716
Onderhoud H ₂ tankstation	2,7% van de investeringen	10.139
Onderhoud brandstofcel bus	2,7% van de investeringen	33.750
Energiekosten H ₂ compressie	7,8 kW, 8400 uur/jaar, 0,2 euro/kWh	13.000
Totaal		

Gebruikmakend van de netto contante waarde methode zijn de totale variabele kosten bijna 1,2 miljoen euro. Bij de berekening van deze kosten is een rentevoet van 4,08% en een looptijd van

5 jaar gehanteerd. Voor de financiering van de totale investeringskosten en de variabele kosten voor een projectduur van 5 jaar is 6,1 miljoen euro nodig.

Om de totale reductie in CO₂ emissies voor het systeem dat gebruikt maakt van waterstof als energiedrager te berekenen, moet worden uitgegaan van een referentie situatie die "business as usual" representeert. Voor de stationaire toepassingen is de referentie voor elektriciteitsopwekking de gemiddelde CO₂ emissies van het Nederlandse elektriciteitspark. De referentie voor warmteopwekking is een aardgasgestookte ketel. Voor wat betreft mobiele toepassingen is de referentie een stadsbus van ongeveer gelijke grootte die diesel als transportbrandstof gebruikt. De gegevens voor de referentiesituatie samen met de specifieke emissies van de onderdelen in het waterstofsysteem, zijn samengevat in Tabel 10. Onderdelen in het waterstofsysteem waar puur waterstof als energiedrager gebruikt wordt (zoals de brandstofcel) hebben geen emissies.

Tabel 10 Omzettingsrendementen voor de processen in referentie -en waterstofsysteem

Conversie	Specifieke CO ₂ emissie	Efficiency
Referentie systeem	540 g/kWh	42 %
Elektriciteitsproductie in Nederland		
Warmte productie o.b.v. aardgas gestookte ketel	238 g/kWh	90 %
Stadsbus op diesel	263 g/kWh	0,56 liter diesel per km
H₂ systeem		
Steam reforming o.b.v. aardgas CO ₂ opslag	325 g/kWh ³	80 %
Stadsbus op waterstof	Geen	0,50 liter diesel per km ⁴
Seizoensopslag rendement	Niet van toepassing	80%
Thermisch rendement brandstofcel	Niet van toepassing	48%
Elektrisch rendement brandstofcel	Niet van toepassing	40%

³ kWh waterstof

⁴ Dieselequivalent voor het verbruik 0,15 kg/km aan waterstof

4.8 Besparingen base case en uitbreidingen

Met het ambitieuze systeem wordt een aanzienlijke hoeveelheid energie bespaard. In Tabel 11 wordt de balans van de energievraag en productie opgesteld. Ook zijn de emissies van het referentiesysteem en het H2 systeem met elkaar vergeleken. De besparingen zijn afhankelijk van de regelstrategie die gekozen wordt om de brandstofcel te bedienen. Alle berekeningen zijn gebaseerd op de aanname dat de brandstofcel constant 50kW elektriciteit produceert. Uitgaande van de aangenomen belastingduurkromme voor de elektriciteitsvraag betekent dit dat ongeveer 85% van de tijd er elektriciteit moet worden teruggeleverd aan het elektriciteitsnet. Er is vanuit gegaan dat elektriciteit die door de brandstofcel wordt geproduceerd op elk gewenst moment kan worden teruggeleverd. Teruglevering van elektriciteit wordt dus ook gezien als een besparing omdat deze elektriciteit niet ergens anders geproduceerd hoeft te worden. In het meeste ambitieuze systeem zal minder elektriciteit moeten worden teruggeleverd, omdat de basis elektriciteitsvraag omhoog gaat vanwege het constant draaien van de compressoren voor waterstof en CO₂. Voor wat betreft de terugwinning van warmte uit de opslag is er vanuit gegaan dat 80% van de warmte die in de (ondergrondse) opslag wordt gestopt er ook weer nuttig uitgehaald kan worden. Om de hoeveelheid vermeden inkoop van aardgas te berekenen is uitgegaan van een ketel rendement van 90%. De extra energievraag die het op waterstof gebaseerde systeem met zich mee brengt zijn aardgas voor de reformer, en elektriciteit voor de waterstof en CO₂ compressoren. Omzettingsrendement zijn te vinden in Tabel 10.

In Tabel 11 staan in de eerste twee kolommen de jaarlijkse CO₂ emissies en het jaarlijkse energieverbruik van het referentiesysteem vermeld. In de volgende twee kolommen staan de jaarlijkse hoeveelheden uitgestoten CO₂ en het energieverbruik/productie door het systeem gebaseerd op waterstof.

Tabel 11 Jaarlijkse CO₂ emissies en jaarlijks primair energieverbruik.

	Referentiesysteem		H2 systeem	
	kWh	kg CO ₂	kWh	kg CO ₂
Elektriciteit inkoop ⁵	1.006.000	375.840	1.657.143	220.051
Aardgas voor ketels	463.601	110.337	129.123	30.731
Aardgas voor reformer (met CO ₂ opslag)	0	0	1.575.000	0
Diesel voor bus ⁶	444.378	116.785	0	0
Netto	2.565.131	602.962	2.711.078	259.109

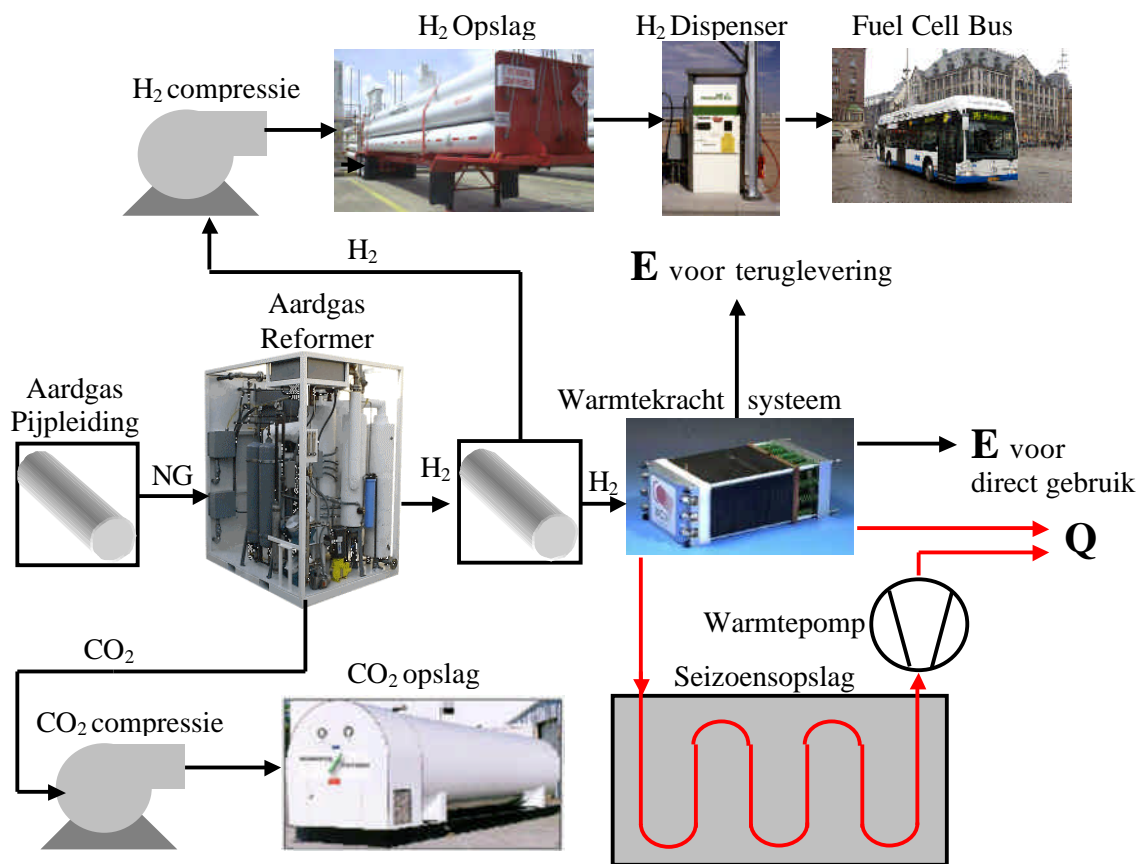
De uiteindelijke energiebesparing voor de waterstofinfrastructuur t.o.v het referentiesysteem is bijna -6 %, oftewel het primaire energie energieverbruik stijgt. Dit wordt met name veroorzaakt door de elektriciteit die nodig is voor de compressoren en het hoge waterstofverbruik van de bus. Op jaarbasis wordt er netto bijna 21.000 euro bespaard als gevolg van vermeden inkoop van elektriciteit, aardgas en diesel⁷.

De CO₂ reductie is wel positief. Met behulp van de waterstofinfrastructuur die bestaat uit een 50kW warmtekracht systeem in combinatie met een seizoensopslag voor warmte en een bus op waterstof in plaats van een bus op diesel (zie Figuur 11), wordt een reductie in CO₂ emissie van 57% behaald. Deze emissie reductie staat gelijk aan ruim 340 ton CO₂ per jaar. In Figuur 11 staat de base case samen met de drie uitbreidingen nog eens schematisch weergegeven.

⁵ Dit is het totale verbruik inclusief elektriciteit voor waterstof en CO₂ compressor minus de netto productie van elektriciteit door de brandstofcel

⁶ Op basis van 219 gereden km per dag.

⁷ Prijs van diesel is 91 eurocent per liter.



Figuur 11 Waterstof infrastructuur met een 50kW warmtekracht systeem in combinatie met een seizoensopslag voor warmte en een bus op waterstof in plaats van een bus op diesel.

4.9 Knelpunten en uitdagingen

Het grootste knelpunt ligt niet zozeer in de technische uitvoerbaarheid van het systeem, er worden immers geen compleet nieuwe technieken gebruikt. Ook wordt de inpassing van de waterstofinfrastructuur in de huidige energievoorziening niet als groot knelpunt gezien. Een van de doelstellingen binnen het praktijkexperiment is knelpunten in het gebruik van een waterstofinfrastructuur bloot te leggen. Wat naar alle verwachting al voorspeld kan worden is dat het systeem het nodige onderhoud zal vragen, mede doordat een aantal van de onderdelen (bijvoorbeeld de brandstofcel) nog niet aan lange duurtesten zijn onderworpen.

Een ander knelpunt wat zich voor kan doen is de vraag of er voldoende ruimte beschikbaar is om ongeveer vier hectare aan kassen in de buurt van reformer te plaatsten. Ook zal er ruimte beschikbaar moeten zijn voor het waterstoftankpunt en de opslag van waterstof. Bepaalde veiligheidsafstanden tussen de waterstofopslag en bebouwingen kunnen een vereiste zijn en zullen moeten worden ingepast in de bestaande omgeving. Wanneer het waterstofvoertuig de afmetingen heeft als van de bus die in deze studie wordt voorgesteld, zal er wellicht een aanrijroute gemaakt moeten worden die ook moet worden ingepast in de bestaande omgeving.

Er is deze studie nog vrijwel geen aandacht besteed aan de regelgeving en vergunningen die nodig zijn voor het uitvoeren van een praktijkexperiment met waterstof. Ervaringen uit het verleden leren echter dat er nog geen volledige regelgeving met betrekking tot de productie en het gebruik van waterstof bestaan. Een project als dit kan een zeer waardevolle bijdrage leveren aan de totstandkoming van deze regels, omdat regelgevende instanties ertoe gedwongen worden

om over deze zaken na te denken. In deze zin kan het "knelpunt" van regelgeving als een interessante en leerzame uitdaging gezien worden. Publieke acceptatie is voorafgaande aan dit project gedefinieerd als potentieel knelpunt. De contacten met bijvoorbeeld EcoMare en het NIOZ en met de Stichting Duurzaam Texel wijzen er echter niet op dat waterstof wordt gezien als iets gevaarlijks of onwenselijks. Wat hier wel benadrukt dient te worden is dat het aspect van veiligheid een zeer grote rol speelt in de publieke acceptatie van waterstof. In de concrete uitvoering van het project, maar zeker ook in de publieke berichtgeving zal veiligheid boven aan de prioriteitenlijst moeten staan. Air Products en Tebodin kunnen met hun jarenlange ervaring en uitstekende reputatie op gebied van waterstofveiligheid hierin een belangrijke rol spelen in het vervolg van dit project.

Het belangrijkste knelpunt tenslotte, zal het verkrijgen van de benodigde investeringskosten en variabele kosten zijn. Het moge duidelijk zijn dat dit project niet direct wordt terugverdiend op basis van energiebesparingen, mede omdat op dit moment waterstof gerelateerde technologieën zoals brandstofcellen en stoom reformers kostbaar zijn. Een investeerder moet echter de toegevoegde waarde van dit praktijkexperiment voor ogen hebben. De uitdaging bestaat uit het vinden van deze investeerder(s), ze te interesseren voor dit ambitieuze project en de toegevoegde waarde duidelijk te maken.

4.10 Coalitievorming

De bijdrage van de huidige coalitie bestaat uit de inbreng van manuren teneinde deze haalbaarheidsstudie uit te voeren. In het kader van deze studie is getracht partijen te interesseren om als coalitie te investeren in een praktijkexperiment. Hiertoe zijn diverse bedrijven benaderd die belang zouden kunnen hebben bij een dergelijk project. Er is een concrete projectlocatie geïdentificeerd bij EcoMare en zij zijn erg enthousiast ten aanzien van een brandstofcel project. De energiedistributiebedrijven NUON, Essent en ENECO gaven aan de ontwikkelingen te willen volgen maar waren vooralsnog niet bereid tot investeringen. Een brandstofcelfabrikant en een reformerfabrikant gaven aan een bijdrage te willen leveren als hun systeem zou worden aangeschaft.

Een verzoek aan het GVB om na afloop van de demonstratie in Amsterdam met de waterstofbussen een van deze bussen naar Texel te laten komen is welwillend in overweging genomen. Nu met de resultaten van deze studie meer duidelijkheid is verkregen, is het zinvol de diverse partijen nogmaals te benaderen.

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Uit de studie blijkt dat de opzet van een waterstofinfrastructuur bij EcoMare technisch mogelijk is. Het uitstralings- en demonstratie-effect bij EcoMare met 350.000 bezoekers zal groot zijn. Het belangrijkste knelpunt zijn de benodigde investeringen. De base case kan gerealiseerd worden voor een bedrag van ca. 1,3 M€ en levert een energiebesparing op van €12.000,- per jaar, de operationele kosten zijn echter €16.000,- per jaar.

De uitgebreide installatie inclusief tankstation, bus, grotere brandstofcel, warmteopslag en CO₂ afvangst kost ca. 4,9 M€. Indien de bus uit het CUTE project om niet zou kunnen worden overgenomen scheelt dit ca. 1,2 M€. Het verdient aanbeveling de optie ondergrondse warmteopslag in een vervolgfase te onderzoeken teneinde een vergelijking met bovengrondse opslag mogelijk te maken.

Aanbevolen wordt om op basis van de resultaten die in deze studie zijn vastgesteld, een of meerdere partijen te vinden die bereid zijn te investeren. Waarbij in eerst instantie voor de uitgebreide installatie moet worden gegaan omdat hier het meest van geleerd kan worden en de uitstoot van CO₂ het sterkst kan worden beperkt.

Zeer waarschijnlijk kan voor een substantieel deel van de investeringen subsidie worden verkregen via het Rijk en/of de provincie Noord-Holland. De huidige subsidieregelingen van het ministerie van EZ zoals de UKR en EOS-Demonstratie stellen echter onder meer als voorwaarde dat er eerst een investeerder moet zijn voordat subsidie kan worden verleend.

BIJLAGE A VRAGENLIJST ECOMARE



Vragenlijst
Ecomare_waterstof ...

BIJLAGE B BESPREKINGSVERSLAG BEZOEK ECOMARE



"Meeting report 001
dd. 17-02-2005 rev.1.

BIJLAGE C PLATTEGROND VAN BASE CASE OP ECOMARE

