



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Waterstofproductie voor Wagenborgen

Oplevering businesscase met intentieverklaring van de boer

Eindrapport fase 1

Opdrachtgever

Enexis Netwerkbeheer BV
Afdeling Regie op Vernieuwing

Contactpersonen

Jan Flonk
Walter Koppenol
Sybe bij de Leij

Groningen
Mei 2020



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Inhoud

1. Inleiding	pag. 3
2. Weg van de boer naar het dorp	pag. 4
3. Randvoorwaarden Enexis	pag. 5
4. Berekeningen	pag. 8
5. Opties bepalen en verder uitwerken en samenvoegen	pag. 19
6. Welke leveranciers kunnen welke waterstofdiensten leveren	pag. 20
7. Financiële consequenties	pag. 21
8. Contact met de boer	pag. 27
9. Uitgewerkt businessplan	pag. 28
10. Intentie van de betreffende boer	pag. 29
11. Go/No Go overleg met voorbereiding	pag. 29
12. Aanbevelingen voor het vervolg	pag. 30
 Bijlage A. Berekeningen groottes winterbuffers voor verschillende electrolyzers	 pag. 31
Bijlage B. Reproduceerbaarheid, opschaling en kostenverlaging	pag. 37
Bijlage C. Uitgangspunten kosten aangevoerd waterstof	pag. 40



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

1. Inleiding

Enexis wil een proef uitvoeren in de dorpen Wagenborgen en Nieuwolda (provincie Groningen) om bij een aantal woningen aardgas te vervangen door waterstof. In de gemaakte berekeningen voor dit rapport gaan we uit van 45 bestaande woningen, die worden voorzien van isolatie en een hybride warmtepomp. Dit laatste wil zeggen, dat een elektrische lucht/water warmtepomp met een daaraan gekoppelde waterstof verwarmingsketel wordt geïnstalleerd. Hierdoor zal het verbruik van de woningen met ongeveer 30% verminderen t.o.v. het huidige (bekende) verbruik.

Enexis heeft L'orèl gevraagd om een voorlopige businesscase te maken om met behulp van een electrolyser waterstof te maken op een boerderij in de buurt van het dorp. Deze waterstof wordt dan door Enexis getransporteerd naar de woningen. De electrolyser wordt in de huidige opzet door de boer 'gerund', waarbij Enexis voor de komende 10 jaar de hoofdafnemers is. Het is de bedoeling om op termijn alleen groene waterstof te produceren met de electrolyser, mits financieel haalbaar.

Om deze businesscase te kunnen maken zijn de volgende onderstaande werkzaamheden uitgevoerd:

- Weg van de boer naar het dorp
- Randvoorwaarden Enexis
- Berekeningen
- Opties bepalen en verder uitwerken en samenvoegen
- Welke leveranciers kunnen welke waterstofdiensten leveren
- Financiële consequenties
- Contact met de boer
- Uitgewerkt businessplan
- Intentieverklaring van de betreffende boer
- Go/No Go overleg met voorbereiding
- Aanbevelingen voor het vervolg

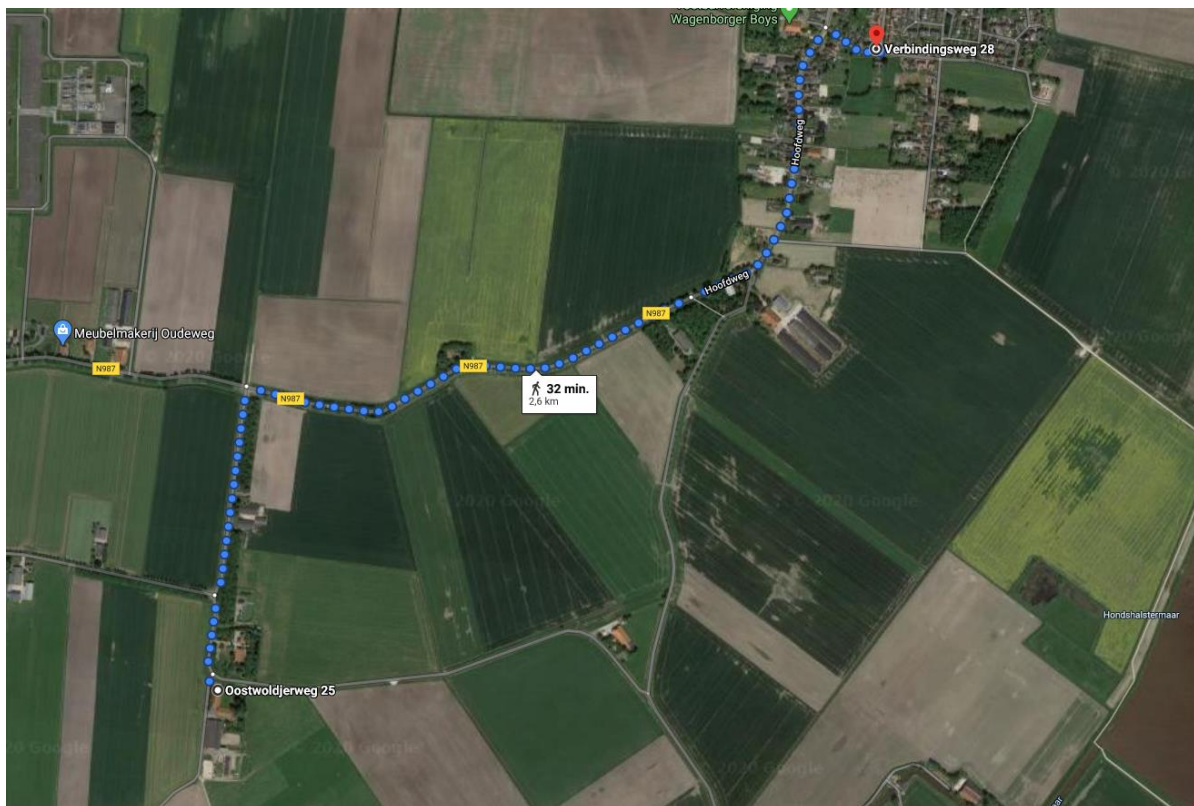
Enexis wil de businesscase gebruiken om een subsidie aan te vragen voor dit project, inclusief de electrolyser.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

2. Situatieschets.

De beoogde productielocatie, welk gelegen is in de gemeente midden Groningen, ligt op een afstand van ongeveer 2,5 km van de woningen, zie hieronder een mogelijk tracé:



Detail Boerderij:

Exacte plaats waar de Electrolyser en de opslag komen wordt in fase 2 bepaald in overleg met de betreffende ondernemer (in ieder geval vlak naast de boerderij).





L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

3. Randvoorwaarden Enexis voor uitvoeren Fase 1

Oriëntatie (pionieren van grof naar minder grof)

3.1 Inleiding

Er wordt onderzocht of er mogelijkheden zijn om in Wagenborgen ongeveer 45 woningen te kunnen aansluiten op een 100% waterstofnet. Ter plekke is momenteel geen waterstof beschikbaar; er dient dus een faciliteit aangelegd te worden om waterstofgas in Wagenborgen te krijgen. De scope van dit onderzoek richt zich op de productie of inkoop en transport van de waterstof tot het invoerpunt op gasdistributienet.

In onderstaand document worden de verschillende mogelijkheden besproken en een inschatting gemaakt van de investerings- en exploitatiebegroting als de waterstof op een boerderij wordt opgewekt vlak buiten het dorp.

3.2 Waterstofvraag

3.2.1 Waterstofvraag woningen

De huidige woningen hebben een gemiddeld aardgasverbruik van 1.820 m³.¹ CEDelft² heeft onderzocht welke aandeel een hybride warmtepomp voor zijn rekening kan nemen. De woningen in Nieuwborgen worden tot minimaal label C geïsoleerd.

Aan de hand van de aardgasuitgifte van Gasontvangstation Wagenborgen is een waterstofverbruiksprofiel gemaakt. Hierin is rekening gehouden met de volgende uitgangspunten:

- Verlaging van de benodigde energie als gevolg van isolatie – 30 %³ Resterend gemiddeld 1.275 m³ aardgasverbruik per jaar.
- Aardgasverbruik voor warmtapwater van 530 m³ per jaar per woning.²
- Vanaf 7 graden Celsius wordt de benodigde warmtevraag t.b.v. ruimteverwarming volledig door de warmtepomp geleverd; dit is het uitgangspunt van Enexis en basis voor de uitgevoerde berekeningen in dit rapport;
- Tussen de 4 en 7 °C wordt de benodigde warmtevraag t.b.v. ruimteverwarming voor de helft door de waterstof-Cv-ketel geleverd; ook aanname van Enexis.
- Onder de 4 °C wordt de benodigde warmtevraag t.b.v. ruimteverwarming volledig door de waterstof-Cv-ketel geleverd². Dit profiel volgt het historisch verbruik in 2019 o.b.v. meetdata Enexis.
- Temperatuurbedata van het KNMI-meetstation Nieuw Beerta in 2019.
- De energie-inhoud van een m³ waterstof is drie keer kleiner dan een m³ aardgas.

¹ Bron: https://opendatasitecore.blob.core.windows.net/opendata/verbruiksdata/Enexis_kleinverbruiksgegevens_01012019.csv

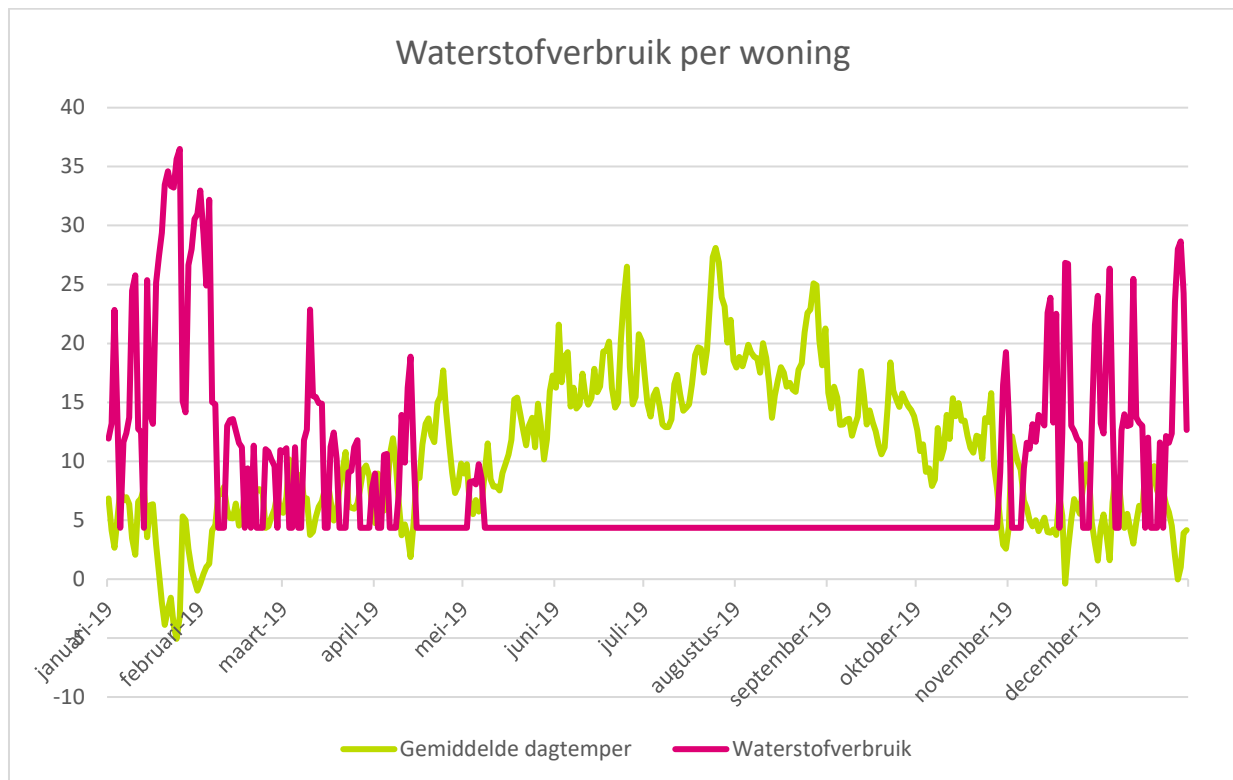
² Bron: https://www.ce.nl/assets/upload/file/Rapporten/2018/Factsheets%20warmtetechnieken/06_Factsheet%20Hybride%20warmtepomp_DEF.pdf

³ Doelstelling vanuit aardgasvrijwijk Nieuwborgen.net



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Hieruit volgt het volgende profiel:



Jaarlijks verbruik van dit profiel (gemiddelde van meerdere woningen) is 3.154 m³ waterstof (1.050 m³ aardgas) per woning, maximale dagverbruik is 36,5 m³ waterstof (12 m³ aardgas) en minimale dagverbruik (zomers voor tapwatervoorziening) is 4,36 m³ waterstof (1,45 m³ aardgas). Maximale genormaliseerd uurverbruik per woning is 2 m³ waterstof per uur.

Door gebruik te maken van het profiel van de aardgasuitgifte op het GDS zijn individuele piekbelastingen niet terug te zien; hier dient rekening mee te worden gehouden als er over individuele woningen of een beperkt aantal woningen wordt gesproken.

Note: Er wordt gesproken over 30% minder verbruik na isolatie. Dit is inclusief tapwaterverbruik, 30% minder verbruik van het totaal (1.820) of resterend 1.275 m³ aardgas verbruik. Dan is het verbruik dat door waterstof gecompenseerd moet worden volgens bovenstaande berekening 1.050 m³ aardgas. Dan 'doet de warmtepomp' dus 225 m³ aardgas of ongeveer 18% waterstof besparing.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorelnl.nl

3.2.2 Waterstofvraag invoedpunt

Uitgaande van hierboven genoemd dagverbruik moet het invoedpunt de volgende capaciteiten hebben bij 45 woningen. Onderstaande tabel is de door Enexis aangeleverde tabel uitgebreid met 10- en 20-daagse koude periode en het jaarverbruik is gecorrigeerd voor 45 woningen (was 40).

De juiste tabel voor 45 woningen

	Volume in nm ³ H ₂	Veiligheidsmarge	Volume in nm ³ H ₂	H ₂ in kg
Jaarverbruik	141.930	1,1	156.123	13.940 kg
Maximaal dagcapaciteit	1.642,5	1,2	1.971	176 kg
Minimaal dagcapaciteit	196,2	1,0	196,2	17,6 kg
Maximale uurcapaciteit	90	1,5	135	12,1 kg
Maximaal 10 koude dagen capaciteit (winter 2012)	13.140,0	1,2	15.768	1.408 kg
Maximaal 10 koude dagen capaciteit met 10 dagen half koud (winter 2017)	19.710,0	1,2	23.652	2.112 kg

Tabel 1: vereiste volumes waterstof voor verschillende situaties

Noodbuffer

Daarnaast is door Enexis een eis geformuleerd dat er een noodbuffer is van minimaal 3 dagen, voor het geval er leveringsproblemen zijn of bij de keus voor een electrolyser. Dit betekent dat er ten alle tijden een buffer moet zijn van 528 kg waterstof of 5.914 nm³ waterstof.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

4. Berekeningen

4.1 Overzichtelijke berekeningen/simulaties maken

(Samen met externe ondersteuning) om vraag en aanbod verder uit te werken voor 45 huurwoningen met verschillende opties en diverse keuzemogelijkheden: o.a. verbruik woningen, productie, buffervaten, opslag (druk) en afname.

4.1.1 Alles opvangen in de piekproductie en zonder buffer, 100 mbar of 8 bar voor verschillende situaties.

Als eerste moet er gekozen worden voor de beste techniek van de electrolyser, deze bepaald ook de groottes/piekproductie van de electrolysers en dus ook de grootte van de eventuele buffers.

Gekozen techniek van de electrolyser

De **PEM Techniek** is gebouwd voor grotere vermogens en heeft (**toev Alkaline**) een hoger rendement bij het omzetten van stroom in waterstof, minder onderhoud nodig, een groter regelbereik, een hogere einddruk (35 ipv 27 bar) en werkt met milieuvriendelijkere (maar wel met schaarsere metalen) componenten.

Echter de techniek is ook duurder in aanschaf, zeker bij vermogens onder de 1.000 kW. Voor de waterstofproductie op de boerderij voor Waterborgen is een groter regelbereik niet noodzakelijk en is het gewenste vermogen te laag. De aangeboden einddruk is ook voldoende.

De **AEM Techniek** is gebouwd voor veel kleiner vermogens en heeft in vergelijking met PEM een vergelijkbaar rendement bij het omzetten van stroom in waterstof, vergelijkbaar minder onderhoud nodig, vergelijkbaar groter regelbereik en vergelijkbaar hogere einddruk. Het verschil met PEM is dat er met minder kostbare en schaarse componenten gewerkt wordt, waarbij de verwachting is dat deze in de toekomst goedkoper dan PEM wordt, zeker bij kleinere vermogens. Op dit moment is deze techniek te duur, zijn de vermogens te klein en is de levensduur te kort. Echter deze techniek maakt op dit moment de grootste stappen voorwaarts op prijs en levensduur, van alle drie de technieken.

Om voor dit project voldoende vermogen te kunnen leveren, moeten meer dan 100 losse modulaire AEM electrolysers gecombineerd worden en wordt de prijs dubbel zo hoog als een Alkaline electrolyser, met een kortere levensduur. Daarom valt deze techniek voorlopig af. Mocht echter op termijn besloten worden dat de geproduceerde waterstof direct en volledig uit eigen opgewekte duurzame energie gemaakt wordt (ook wel donkergroen waterstof genoemd) dan is deze techniek uitermate geschikt, omdat het regelbereik van een Alkaline slechts ligt tussen 40 – 100%. Door nu een extra klein AEM vermogen bij te plaatsen tot 40% van de Alkaline electrolyser kan bijna van 0 – 100% geschakeld worden, en kan het maximale deel van de duurzame energie omgezet worden in waterstof.

Voor de uitvoering van dit project wordt derhalve gekozen voor de Alkaline techniek, de oudste techniek met de meeste ervaring en de juiste standaard grootte en met de laagste productieprijs.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@loreel.nl

De Alkaline electrolyser is in verschillende groottes verkrijgbaar. Afwijkende groottes worden nauwelijks geproduceerd en zijn ook een stuk duurder. Voor dit project zijn een drietal standaard groottes interessant om verder uit te werken; alle drie Alkaline Electrolysers:

- A. Electrolyser die circa $100 \text{ nm}^3 \text{ H}_2$ per uur levert of 8,9 kg H_2 ; hierbij hoort een stroomafname van ongeveer 500 kW. Dit betekent een eigen 630 KVA transformator aansluiting. Deze aansluiting moet speciaal aangelegd en heeft vastrechtkosten en transportkosten per kWh. *Enexis levert deze kosten voor de berekening.*
- B. Electrolyser die circa $60 \text{ nm}^3 \text{ H}_2$ per uur levert of 5,4 kg H_2 ; hierbij hoort een stroomafname van ongeveer 300 kW. Dit betekent een eigen 400 kVA transformator aansluiting. Deze aansluiting moet speciaal aangelegd en heeft vastrechtkosten en transportkosten per kWh. *Enexis levert deze kosten voor de berekening.*
- C. Electrolyser die circa $30 \text{ nm}^3 \text{ H}_2$ per uur levert of 2,7 kg H_2 ; hierbij hoort een stroomafname van ongeveer 150 kW. Dit betekent een 3*250 Ampère aansluiting. Deze aansluiting moet speciaal aangelegd en heeft vastrechtkosten en transportkosten per kWh. *Enexis levert deze kosten voor de berekening.*

Vervolgens wordt de leiding gekozen van de electrolyser naar het dorp en naar de woningen, ook deze heeft invloed op de grootte van de eventuele buffers. Deze leiding wordt door Enexis gekozen.

Enexis heeft gekozen voor een 160 mm PE-leiding; dit is de dikste leiding 'op haspel', anders worden de aanlegkosten hoger. Deze leiding kan voor 100 mbar tot 8 bar overdruk gebruikt worden. Als de leiding op 8 bar wordt gebruikt, dan komen er nog kosten bij voor een nieuw distributiestation vlak bij het dorp om terug te regelen naar 100 mbar overdruk.

Enexis levert voor beide opties de kostenberekening.

Door de keuze voor 8 bar wordt in de PE-leiding een bepaalde extra buffer gecreëerd; echter hier hangt ook een bepaald extra prijskaartje voor het nieuwe distributiestation. Deze keuze zal moeten worden gewogen.

Voor het berekenen van de buffercapaciteit van de leiding gaan we uit van een PE 160 mm SDR 11 leiding van 1,5 – 2 km tot aan het dorp, die op 8 of 100 mbar gebruikt kan worden en een leiding op 100 mbar in het dorp naar de wijk met een lengte van 400 – 700 meter. Ook voor deze leiding kiezen we voor een 160 mm leiding. De leidinglengte is dan in totaal 2,2 – 2,6 km.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

4.1.1.1. Berekenen van de grootte van de electrolyser om alleen op 100 mbar te werken zonder buffer

Bij 100 mbar is het volume van de leiding tot 40 mbar als laagste druk:

Eerste buffer is de gasleiding naar de woningen zijn:	700	1.750	2.000	2.250	2.500	meter
Diameter 160 mm en 100 mbar tot 40 mbar overdruk	2,29	5,72	6,54	7,35	8,17	m ³ H ₂
	0,20	0,51	0,58	0,66	0,73	kg H ₂
Gezien de verbruiken is deze buffer op 100 mBar minimaal, er kan 3 minuten gebufferd worden.						

Het piekverbruik voor de 45 woningen is 12,1 kg H₂ per uur (zie tabel 1).

De leidingbuffer van ongeveer 0,7 kg is omgerekend dus voldoende voor 3 minuten; dit betekent dat de electrolyser nagenoeg alle schommelingen in het verbruik moet opvangen! Dit is niet mogelijk bij een Alkaline electrolyser. Om de electrolyser stabiel te kunnen laten draaien is een additionele buffer noodzakelijk.

Daarnaast heeft een Alkaline electrolyser, die 12,1 kg H₂ (of 135 nm³ H₂) per uur moet kunnen leveren, ongeveer 690 kW aan stroom nodig. In het landelijk gebied is een 630 kVA normaal de grootste transformator die maximaal 600 kW aan stroom kan leveren. Een electrolyser van 600 kW levert ongeveer 10,5 kg H₂ (of 117 nm³ H₂) per uur en 250 kg H₂ (of 280 nm³ H₂) per dag. De piekhoeveelheid per dag is 176 kg (zie ook tabel 1) en kan gemakkelijk geleverd worden. Er is alleen een buffer noodzakelijk om de piekcapaciteit per uur te leveren. Een noodzakelijke buffer van 10 kg H₂ kan bijna 6 uur piekcapaciteit leveren en 25 kg zelfs 15 uur aaneengesloten piekcapaciteit leveren.

Bij een 100 mbar leiding is het om diverse redenen niet mogelijk om aan de minimale productie-eisen te voldoen zonder een additionele buffer!



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

4.1.1.2. Berekenen van de grootte van de electrolyser om op 8 bar (leiding tot aan dorp) en 100 mbar (in het dorp) te werken, zonder buffer.

Bij 8 bar is het volume gesplitst in een 8 bar en 100 mbar deel.

Bij 8 bar is het volume van de leiding tot 2,5 bar als laagste druk:

Eerste buffer kan de gasleiding naar het dorp zijn:	1.500	1.750	2.000	2.250	2.500	meter
Diameter 160 mm en 8 bar tot 2,5 bar als laagste druk	171,82	429,56	490,93	552,29	613,66	m ³ H ₂
	15,34	38,35	43,83	49,31	54,79	kg H ₂

Gezien de verbruiken is deze buffer op 8 Bar met 2,5 bar als laagste druk goed voor een buffer van 3 - 4 uur.

Bij een piekverbruik van 12,1 kg H₂ per uur is deze buffer voldoende voor 3 – 4 uur!

Voor het 100 mbar deel in het dorp is het volume tot 25 mbar onderdruk:

- 400 meter: 0,15 kg
- 700 meter: 0,26 kg

In totaal varieert het volume van deze complete leidingbuffer tussen 3 - 4 uur.

Hiermee kan de ochtend en avondpiek opgevangen worden.

In het landelijk gebied is een 630 kVA normaal de grootste transformator die maximaal 600 kW aan stroom kan leveren. Hiermee kan de electrolyser ongeveer 10,5 kg H₂ (117 nm³ H₂) leveren. De buffer van 43,5 – 50 kg H₂ in de leiding kan bijna 26 -30 uur piekcapaciteit leveren en dat is meer dan het piekverbruik per dag.

Bij een 8 bar leiding is het met een 600 kW electrolyser mogelijk om aan de minimale productie-eisen te voldoen door de extra buffer in de leiding!



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

4.2 Opslag op het terrein van de boer, welke drukken en welke buffergrootte.

Al dan niet in combinatie met netdrukken, 100 mbar en 8 bar (zie bijlage a)

Enexis heeft berekeningen laten uitvoeren, om waterstof met een aparte trailer of met een flessenrek van 14 sets te laten bezorgen aan de rand van Wagenborgen. Een opslag met een los flessenrek is goedkoper dan een trailer met vaste flessen; zie bijlage C. Echter de opslag is beperkt, waardoor er veel vrachtverkeer nodig is en in koude periodes de levering niet 100% gegarandeerd kan worden. Daarnaast zijn de kosten per kg waterstof zo hoog dat het ter plekke maken van waterstof met een electrolyser qua kosten lager uitkomt, zeker als de grootte van de electrolyser, de bedrijfsdrukken en de buffergrootte goed op elkaar afgestemd worden.

4.2.1 Kostenberekening electrolyser (10 jaar afschrijving)

De electrolyser gaat gemiddeld 14.000 kg H₂ per jaar produceren, in koude winters wordt er meer geproduceerd en in warme winters minder.

De investeringskosten voor deze electrolyser zijn, allen met levensduur van 60 – 80.000 uren:

<i>Electrolyser:</i>	<i>Investering op 27 bar</i>	<i>Plaatsen op locatie</i>	<i>Kosten voor onderhoud</i>	<i>Jaarlijkse kosten</i>	<i>Kosten per kg H₂</i>
100 nm ³ H ₂ per uur	€ 1.046.000	€ 25.000	3,5 %	€ 144.710	€ 10,34
60 nm ³ H ₂ per uur	€ 835.000	€ 25.000	4,0 %	€ 119.400	€ 8,53
30 nm ³ H ₂ per uur	€ 558.000	€ 20.000	4,5 %	€ 82.910	€ 5,92

Tabel 2: productievolumes uitgezet tegen de kosten en de kosten per kg H₂

Hierbij draait de 30 nm³ H₂ per uur ongeveer 5.230 uren per jaar; levensduur van 11,5 – 15,3 jaar.

Hierbij draait de 60 nm³ H₂ per uur ongeveer 2.165 uren per jaar; levensduur van 23 – 30,6 jaar.

Hierbij draait de 100 nm³ H₂ per uur ongeveer 1.570 uren per jaar; levensduur van 38,2 – 51 jaar.

Duidelijk is dat de kleinste electrolyser financieel het beste bij de gewenste hoeveelheid waterstof past, echter de maximale productie per dag is 64 kg H₂, terwijl er op de koudste dagen 176 kg nodig is. Hiervoor is een 'winterbuffer' nodig. De middelste electrolyser die per dag 128,6 kg H₂ produceert, heeft nog steeds een buffer nodig. Hierbij zijn de jaarkosten van deze electrolyser wel € 36.500 hoger. Dit hoger bedrag voor de electrolyser kan niet terugverdiend worden met een kleinere buffer (zie uitwerking hieronder en bijlage A, deze laat de benodigde winterbuffergroottes zien).



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

4.2.1.2. Gekozen buffer met een electrolyser

Op dit moment wordt waterstof meestal opgeslagen op drukken tussen 300 bar (flessenrekken), 350 bar (vrachtauto's) tot 700 bar (privéauto's). Voor de opslag van grotere hoeveelheden wordt meestal 300 bar gebruikt in combinatie met flessenrekken of speciale trailers.

4.2.1.2.a Eigen buffer op 300 bar met eigen electrolyser

De gekozen (Alkaline) electrolyzers leveren een uitgaande druk voor waterstof van 10 of 27 bar. Vervolgens moet waterstof in twee stappen naar ruim 300 bar gebracht worden. Hiervoor zijn speciale compressoren noodzakelijk en een tussenopslag. De opslag vindt plaats in flessenrekken (per 14 stuks) waar ongeveer 245 kg in kan worden opgeslagen. De tussenbuffer (per 4 stuks) kan ongeveer 70 kg bufferen.

Hiervoor is onderstaande extra investering nodig:

1. 2 Compressoren, ongeveer € 90.000 (levensduur 5 jaar).
2. Extra tussenbuffer ongeveer € 30.000.
3. Dubbel uitwisselaar flessenrek, compleet ongeveer € 235.000.

Een investering van ongeveer € 355.000 is nodig om waterstof op 300 bar te kunnen opslaan.

Om groen waterstof voor de markt te produceren is onderstaande berekening gemaakt of deze extra productie het businessmodel al dan niet gunstig beïnvloed.

Voor het ophalen van groen waterstof wordt ongeveer € 5 – 7 per kg betaald. De kostprijs van alleen de stroom om met een Alkaline electrolyser waterstof te maken is ongeveer € 4 – 4,5. Daar bovenop komen de extra slijtage- en onderhoudskosten van de electrolyser om extra groen waterstof te leveren in de zomer. Afhankelijk van de grootte van de electrolyser ligt dit bedrag tussen de € 2 – 4 per kg. Daar bovenop komen de slijtage-, onderhoud- en de extra stroomkosten voor de compressoren om het waterstof op 300 bar te krijgen, gezamenlijk ook € 2 – 4.

Verkoop groen waterstof (zomer) levert financieel een negatief resultaat op en wordt afgeraden!

Noodbuffer

Naast de uitwisselbare buffers op 300 bar is er ook een noodbuffer noodzakelijk om 3 dagen te kunnen opvangen bij een storing van de electrolyser. In de winterpiek wordt 176 kg waterstof per dag gebruikt: een additionele buffer van 528 kg. Hiervoor zijn 2 grote (14 stuks) flessenrekken noodzakelijk en een klein (4 stuks) flessenrek ($2 \times 245 + 70 = 560$ kg). De kosten voor deze extra noodbuffer is nogmaals € 265.000.

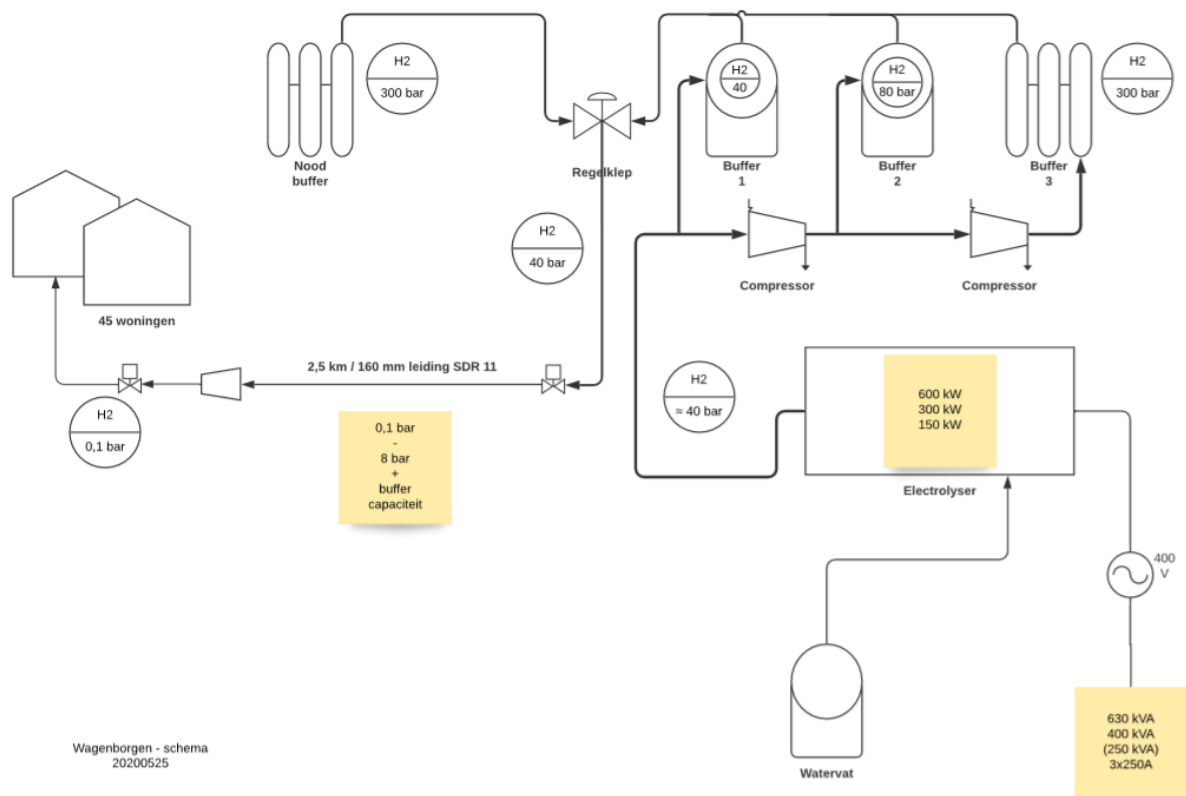
De totale investering voor de uitwisselbare buffers, de complete noodbuffer voor 3 dagen en de compressoren is ongeveer € 620.000. Na 5 jaar vervanging compressoren, nogmaals € 90.000.

Bij een afschrijving in dit project van 10 jaar, zijn de jaarlijkse afschrijvingskosten ± € 71.000. Hierbij komt nog een onderhoudspost van ± € 25.000 en stroompost voor de compressoren van ± € 25.000 (bij 14.000 kg H₂). Excl. kosten electrolyser en stroom, kost de noodbuffer € 8,64 per kg H₂.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Hieronder het eerste 'technisch schema' met electrolyser en eigen buffers op verschillende drukken:





L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

4.2.1.2.b Ondergrondse buffers, een gunstig alternatief

L'orèl heeft in projecten met biogas ook gewerkt en gerekend met veel lagere drukken waarbij de opslagcapaciteit per m³ veel goedkoper is. Diverse nationale en internationale onderzoeken hebben aangetoond dat waterstof in het aardgasnet getransporteerd kan worden, zeker in de nieuwere gasleidingen. Daarom zal het opslaan van waterstof in nieuw te leggen gasleidingen geen probleem zijn; zeker als bij de bouw 'waterstofproof' wordt gebouwd. Op deze manier kan afhankelijk van de gekozen wanddikte een opslag op 80, 69, 40, 35 of 27 bar worden gebouwd. Hieronder worden de verschillende kosten voor een ondergrondse leidingbuffer uitgerekend.

Eigen ondergrondse leidingbuffer op 27 bar met eigen electrolyser:

De gekozen (Alkaline) electrolyzers leveren een uitgaande druk voor waterstof van 27 bar. Vervolgens stroomt de geproduceerde waterstof in een grote ondergrondse gasleiding.

Hiervoor is nodig:

1. Een aantal (tot gewenste buffercapaciteit) aan elkaar gelaste gasleidingen.
2. Een tweetal afsluiters om de buffer te kunnen afsluiten.
3. Een reduceerinstallatie, die waterstof vanuit de leidingbuffer in de distributieleiding naar het dorp laat stromen.
4. Een noodleidingbuffer om 3 dagen te kunnen opvangen bij een storing van de electrolyser.

Als voorbeeld kan in een 48 duims gasleiding, werkend tussen 27 en 2,5 bar, bijna 120 kg waterstof opgeslagen worden. Een extra compressor is niet nodig. Door vijf gasleidingen aan elkaar te lassen ontstaat een noodleidingbuffer van 585 kg waterstof (3 dagen en 8 uur) voor een prijs van ongeveer € 200.000 met € 2.000 onderhoud per jaar.

Voor een strenge winterperiode zijn ongeveer 8 gasleidingen (48 duims) voldoende of 940 kg waterstof. Dit is nogmaals een kostenpost van € 200.000,. Hierbij kunnen de afsluiters en de reduceerinstallatie voor beide leidingbuffers gebruikt worden. Het is namelijk mogelijk om de complete buffer (max. 1.521 kg) altijd op een minimale druk van 11 bar te houden; dit is dan de noodleidingbuffer. Bij een druk van 11 bar is de noodbuffer 528 kg, precies 3 dagen! De winterbuffer is dan 993 kg terwijl een minimale buffer van 900 kg noodzakelijk is.

De totale investering voor beide ingegraven buffers is ongeveer € 400.000.

Eigenlijk kunnen we uitgaan van een levensduur van 50 jaar voor de ingegraven gasleidingen.

Als we uitgaan van een afschrijving in dit project van 10 jaar, dan zijn de jaarlijkse afschrijvingskosten ongeveer € 40.000. Hierbij komt nog een onderhoudspost van ongeveer € 4.000. In totaal jaarlijks ongeveer € 44.000 bij gemiddeld 14.000 kg H₂. De kosten voor de leidingbuffer (excl. kosten electrolyser en stroom) is dus ongeveer € 3,14 per kg H₂.

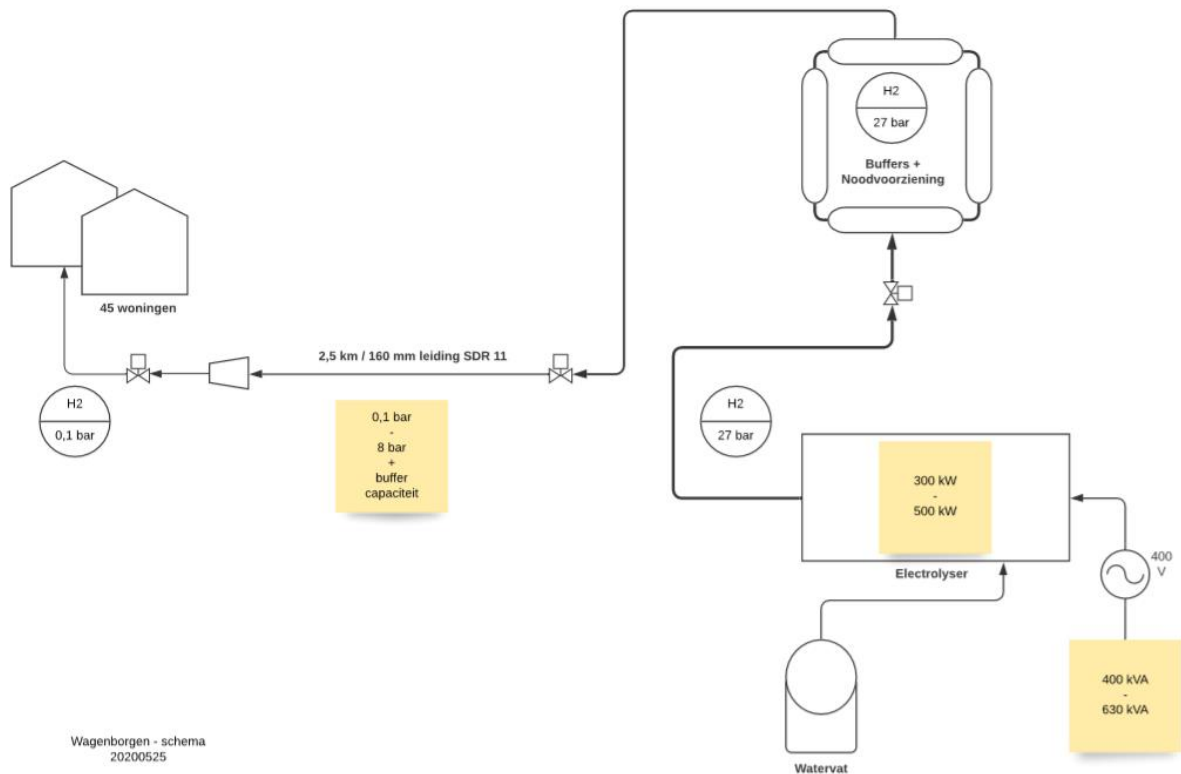
Dit betekent een jaarlijkse verlaging tussen eigen buffer op 300 bar en een ondergrondse lage-druk leidingbuffer van ongeveer € 77.000 of € 5,50 per kg H₂!



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Een lagedruk-opslag voor H₂ is zover bekend nog niet eerder uitgevoerd en is mogelijk subsidiabel; hierdoor wordt het verschil nog groter (bij 25% subsidie wordt het verschil tussen eigen buffer op 300 bar en een ondergrondse lage-druk leidingbuffer zelfs € 87.000 of € 6,20 per kg).

Hieronder het 'technisch schema' met grote (dure) electrolyser (zonder winterbuffer) en eigen ondergrondse noodbuffer:





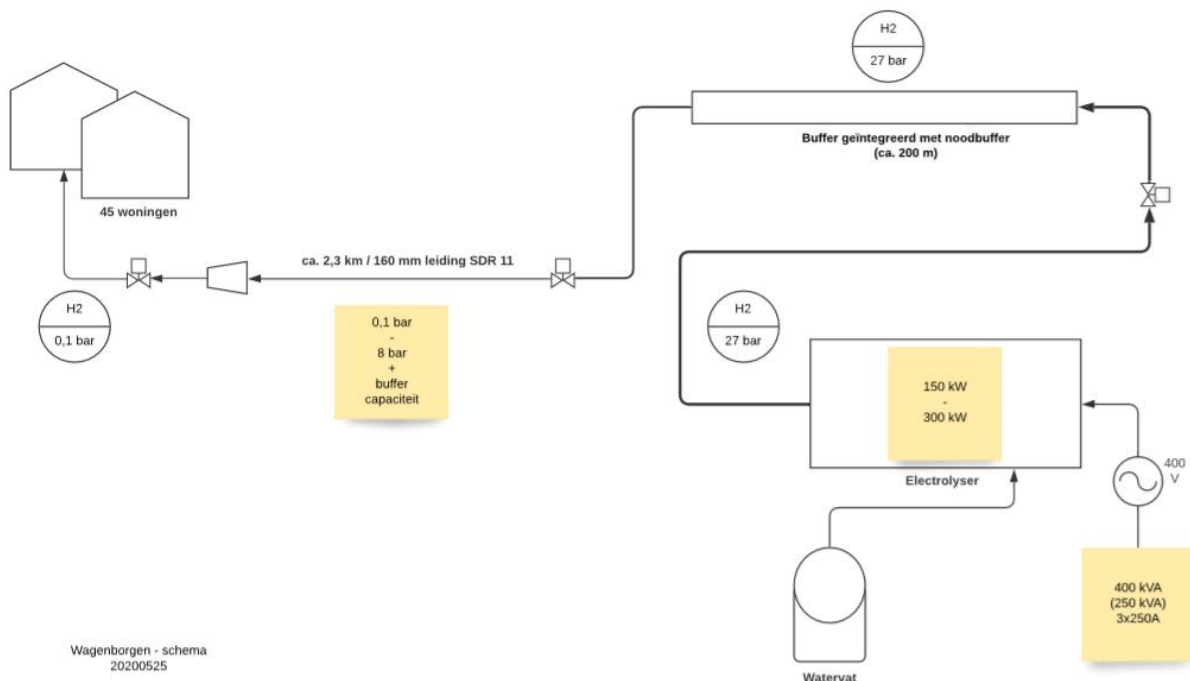
L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Voor de exploitatie van waterstofproductie op de boerderij tot aan de erfgrans, kan een onderscheid gemaakt worden tussen:

1. De exploitatie van de electrolyser inclusief de kosten voor de waterstofproductie (hetgeen door een marktpartij uitgevoerd moet worden, dit mag niet door een distributeur van energie)
2. De exploitatie van de ondergrondse lage-druk leidingbuffer (hetgeen wel hoort bij de core- business van Enexis).

Door de gasleidingen vanaf de electrolyser op de boerderij al direct richting het dorp te leggen kan de kunststof gasleiding 200 meter korter. Dit levert een additionele besparing op van € 20.000.

Hieronder het 'technisch schema' met kleinere (goedkopere) electrolyser (met winterbuffer) en de eigen geïntegreerde grote ondergrondse winter- en noodbuffer





L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

4.2.1.2.c Wel of niet aanvoer via een trailer of flessenrek als (extra) buffer is mogelijk ook een optie (algemeen, Air Liquide, Linde Gas, Gasunie, Holthausen en).

Op basis van de bedragen door Enexis aangeleverd, zijn de berekeningen nogmaals uitgevoerd (zie bijlage c) met een noodbuffer voor 3 dagen, naast de 'uitwisselbuffers'. De noodbuffer zorgt voor een verhoging van bijna € 60.000 per jaar bij gebruik maken van trailers. Hierdoor wordt de all-in prijs, waarvoor waterstof geleverd wordt ongeveer € 19 per kg.

Bij een flessenrek zal een noodbuffer zorgen voor een stijging van ruim € 37.000 per jaar. Hierdoor wordt de all-in prijs waarvoor waterstof aangeleverd wordt bijna € 15,50 per kg.

De optie om de ondergrondse buffer te verkleinen en bij koude periodes eenmalig een trailer te laten komen, die in korte tijd de buffer vult, lijkt bij bovenstaande prijzen niet realistisch.

Zeker omdat in de koudste dagen ook andere projecten extra waterstof nodig hebben en het vervoer over de weg net lastiger is vanwege winterse omstandigheden als gladheid en blokkades door sneeuwval. Daarnaast levert de electrolyser bij Hystock levert ongeveer 15 kg per uur. Om een trailer te vullen is bijna 30 uur noodzakelijk. Dan zal een trailer ruim van tevoren aangevraagd worden.

Het vullen (€ 1.724) en het transport (€ 610) kost ruim € 2.300 per trailerrit. Uitgaande van 10 ritten per 10 jaar is deze post bijna € 23.000.

Daarbovenop komen de huurkosten van de trailer. Hier zijn ervaringen mee. De eigenaar van de trailer zal de trailer 1 dag kwijt zijn voor het vullen en 1 dag voor het transport en ook het leegmaken ter plekke. Gezien de kosten van een trailer (bijna € 300.000), de vrachtauto met chauffeur en de beperkte beschikbaarheid is een kostenpost lastig te bepalen. Zeker in het begin, met weinig ritten, zullen de kosten hoog zijn. Een bedrag van € 1.500 – 2.000 lijkt aannemelijk. Dan wordt deze post per 10 jaar € 15.000 – 20.000. Hier is nog geen praktijkervaring mee.

In totaal zullen de kosten voor deze optie € 38.000 – 43.000 bedragen.

De verkleining van de buffer met 2 gasleidingen levert eenmalig € 40.000 op of € 4.000 per jaar, maar een aankoppelpunt op 300 bar kost weer extra geld.

Conclusie

De verkleining van de buffer door aanvoer door derden levert nauwelijks of geen financiële winst op, maar wel het risico dat je 100% zeker moet zijn dat je tijdens de koude piek waterstof kunt krijgen vanwege de productiecapaciteit en/of het vanwege de weersomstandigheden lastig te leveren is. Op dit moment raden wij deze optie af. Zodra hier meer praktijkervaring in is, kan deze berekening nogmaals uitgevoerd worden en kan de keuze alsnog bekeken worden.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

5. Opties bepalen en verder uitwerken en samenvoegen

Op basis van (voorlopige) offertes van de verschillende leveranciers met bijbehorende gesprekken ter verduidelijking van de offertes en wensen, de opties bepalen en verder uitwerken en samenvoegen.

Bij een zevental fabrikanten zijn een dertigtal vragen neergelegd. Hiervan waren vijf fabrikanten op dit moment te klein en/of hadden niet de juiste grootte van de electrolyser en/of konden een aantal vragen niet beantwoorden en/of reageerden niet op onze vragen.

Duidelijk is dat er een viertal fabrikanten voldoende ervaring hebben om het project Wagenborgen uit te kunnen voeren. Echter het geven van een complete offerte duurt in deze coronatijd zodanig lang dat er maar twee partijen een offerte hebben afgegeven. Beide offerte ontlopen elkaar zo weinig dat er gewerkt is met de offerte van Hydrogenics, een van de oudste fabrikanten en ook een bekende grote fabrikant met jarenlange ervaring. Hydrogenics was daarnaast de enige partij die alle vragen direct kon beantwoorden. Als extra plus is de Nederlandse taal en afstand tot België, al werken alle fabrikanen met lokale partnes voor installatie, service, onderhoud etc. De andere fabrikanten zitten in Italië, Noorwegen en Denemarken.

De fabrikanten met voldoende ervaring hebben ook allemaal nagenoeg dezelfde groottes van de electrolysers die op de boerderij van de familie van Tilburg voor de 45 woningen in Wagenborgen passen. Dit zijn de volgende 'standaardmaten, waarbij de electrolysers 'verpakt' worden in 20 en 40 ft 'standaard' containers:

1. Een productie van $30 \text{ nM}^3 \text{ H}_2$ per uur (ongeveer 150 kW stroomafname);
2. Een productie van $60 \text{ nM}^3 \text{ H}_2$ per uur (ongeveer 300 kW stroomafname);
3. Een productie van $100 \text{ nM}^3 \text{ H}_2$ per uur (ongeveer 500 kW stroomafname);
4. Een productie van $2 * 60 = 120 \text{ nM}^3 \text{ H}_2$ per uur (ongeveer 600 kW stroomafname). Twee electrolysers van $60 \text{ nM}^3 \text{ H}_2$ per uur naast elkaar;

Het maken van custom made groottes is wel mogelijk, maar dan lopen de kosten per $\text{nm}^3 \text{ H}_2$ en de levertijden snel op.

In dit rapport is dus gekozen voor de eerste drie standaardmaten.

1. Een productie van $30 \text{ nm}^3 \text{ H}_2$ per uur (ongeveer 150 kW stroomafname);
2. Een productie van $60 \text{ nm}^3 \text{ H}_2$ per uur (ongeveer 300 kW stroomafname);
3. Een productie van $100 \text{ nm}^3 \text{ H}_2$ per uur (ongeveer 500 kW stroomafname);



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

6. Welke leveranciers kunnen welke waterstofdiensten leveren.

Welke standaarddrukken leveren de electrolyzers en welke variaties zijn hierop mogelijk. Voor welke prijs kunnen leveranciers waterstof ophalen (en evt. ook brengen) en onder welke condities.

- A. De meeste fabrikanten zijn echte fabrikanten die puur apparatuur maken en ter plekke regionale onderhoudsmonteurs opleiden (veel electrolyzers worden ook geleverd aan grote bedrijven). Zelf komen ze 1 keer per jaar voor periodiek onderhoud.
- B. Full service contracten bieden ze (nog) niet aan.
- C. De Alkaline electrolyzers leveren een druk van 10 of 27 bar; er is ook een fabrikant die 35 bar levert.
- D. Het ophalen van groen waterstof is alleen mogelijk bij grote volumes anders is de kostprijs veel te hoog. In het project Wagenborgen is dit geen optie.
- E. Grijs waterstof gemaakt door een electrolyser wordt niet opgehaald, te duur.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

7. Financiële consequenties

Eerste uitgebreide businesscase geeft een indicatie van de exploitatie voor het maken van waterstof op de boerderij tot aan de erfgrens. Hierbij kan een onderscheid gemaakt worden tussen de exploitatie van de electrolyser inclusief de kosten voor de waterstofproductie en de ondergrondse lage-druk leidingbuffer. Er kan nog worden gekeken of er met de al ingediende subsidieaanvraag nog aanvullende fondsen mogelijk zijn.

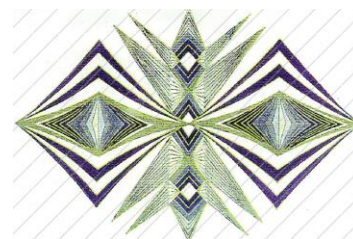
Voor de drie eerder genoemde opties is een berekening gemaakt per optie:



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Optie 1: lokale productie met buffer bij productie eenheid. (de berekeningen kosten per kg of nm³):

Met 10 jaar afschrijving en 3 dagen noodbuffer				
Optie 1: electrolyser inclusief noodbuffer, winterbuffer, energiekosten en locatiekosten				
Compleet overzicht:	Investering	Levensduur	Onderhoud	
		70.000 uur	4,5%	
Electrolyser die 30 nm ³ H ₂ per uur levert of 2,68 kg per uur	€ 535.000			
Hogere druk 27 bar met een rendement van 55 - 60%	€ 23.000			
Plaatsen en aansluiten	€ 20.000			
Totale investering:	€ 578.000			
14.000 kg per jaar, of een levensduur van 11 - 16 jaar				
Uitwisselen alleen Stack voor weer 60.000 - 80.000 uur 50%	€ 214.000			
		Jaarlijks		Totale jaarlijkse kosten:
Afschrijving op 10 jaar:	Investering	Afschrijving	Onderhoud	Electrolyser
Jaarkosten voor complete electrolyser	578.000	€ 55.800	€ 26.010	€ 81.810
Maximaal 176 kg per dag verbruik:				
Noodbuffer voor minimaal 3 dagen: 528 kg	Investering	Afschrijving	Onderhoud	
Optie 1: Ondergrondse noodbuffer voor 530 kg				
Eigen ondergrondsebuffer op 27 bar naar 100 mbar circa 530 kg (5 leidingen achter elkaar richting het dorp met 2 afsluiters)	€ 200.000		€ 2.000 1%	Noodbuffer
Kosten noodbuffer	€ 200.000	€ 20.000	€ 2.000	€ 22.000
Extra winterbuffer bovenop de noodbuffer:				
Gemiddelde winter, maximaal 2 buizen noodzakelijk	€ 60.000	€ 6.000	€ 600	€ 6.600
Koude winter 1x 3 jaar, 6 extra buizen noodzakelijk	€ 150.000	€ 15.000	€ 1.500	€ 16.500
Koude winter 1x 10 jaar, 8 extra buizen noodzakelijk	€ 200.000	€ 20.000	€ 2.000	€ 22.000
				Winterbuffer
Kosten voor noodbuffer en 'maximale winterbuffer'	€ 200.000	€ 20.000	€ 2.000	€ 22.000
(extra 8 leidingen achter elkaar richting het dorp)				
				Besparing leiding
13 buizen in serie zorgt dat leiding naar dorp 200 meter korter	€ -20.000	€ -2.000	€ -200	€ -2.200
Stroomkosten exclusief aansluiting per jaar:				
Stroomkosten met 57.5% rendement (gegarandeerd):	57,5%			
Door grote buffer stroom voor 2/3 in laagtarief, prijs per kWh	€ 0,075			
Stroomkosten per kg H ₂	€ 4,30			Stroomkosten
Gemiddeld per jaar 14.000 kg H₂:	€ 60.261			€ 60.261
				Pachtkosten
Pachtgrond, huur, en beheerskosten locatie boer:				€ 2.400
				+
Totale jaarlijkse kosten met eigen electrolyser voor 14.000 kg H₂:				€ 186.271
(incl. (nood)buffer, electrolyser, stroomkosten en onderhoud)				
Kosten per kg H₂	€ 13,31			
Kosten per nm³ H₂	€ 1,19			



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Er blijkt ook nog de mogelijkheid te zijn om voor de ondergrondse lage-druk buffer een subsidie te ontvangen. Hieronder de berekeningen met subsidie:

Met 10 jaar afschrijving en 3 dagen noodbuffer			Met 25% subsidie, innovatieve lage-druk buffer:		
Optie 1: electrolyser inclusief noodbuffer, winterbuffer, energiekosten en locatiekosten					
Compleet overzicht:	Investering	Levensduur	Onderhoud		
		70.000 uur	4,5%		
Electrolyser die 30 nm ³ H ₂ per uur levert of 2,68 kg per uur	€ 535.000				
Hogere druk 27 bar met een rendement van 55 - 60%	€ 23.000				
Plaatsen en aansluiten	€ 20.000				
Totale investering:	€ 578.000				
14.000 kg per jaar, of een levensduur van 11 - 16 jaar					
Uitwisselen alleen Stack voor weer 60.000 - 80.000 uur 50%	€ 214.000				
		Jaarlijks		Totale jaarlijkse kosten:	
Afschrijving op 10 jaar:	Investering	Afschrijving	Onderhoud	Electrolyser	
Jaarkosten voor complete electrolyser	578.000	€ 55.800	€ 26.010	€	81.810
Maximaal 176 kg per dag verbruik:					
Noodbuffer voor minimaal 3 dagen: 528 kg	Investering	Afschrijving	Onderhoud		
Optie 1: Ondergrondse noodbuffer voor 530 kg					
Eigen ondergrondsebuffer op 27 bar naar 100 mbar circa 530 kg (5 leidingen achter elkaar richting het dorp met 2 afsluiters)	€ 200.000		€ 2.000	1%	
					Noodbuffer
					-25%
Kosten noodbuffer	€ 200.000	€ 20.000	€ 2.000	€	22.000
					€ 16.500
Extra winterbuffer bovenop de noodbuffer:	Investering	Afschrijving	Onderhoud		
Gemiddelde winter, maximaal 2 buizen noodzakelijk	€ 60.000	€ 6.000	€ 600	€	6.600
Koude winter 1x 3 jaar, 6 extra buizen noodzakelijk	€ 150.000	€ 15.000	€ 1.500	€	16.500
Koude winter 1x 10 jaar, 8 extra buizen noodzakelijk	€ 200.000	€ 20.000	€ 2.000	€	22.000
					Winterbuffer
					-25%
Kosten voor noodbuffer en 'maximale winterbuffer'	€ 200.000	€ 20.000	€ 2.000	€	22.000
(extra 8 leidingen achter elkaar richting het dorp)					€ 16.500
					Besparing leiding
13 buizen in serie zorgt dat leiding naar dorp 200 meter korter	€ -20.000	€ -2.000	€ -200	€	-2.200
Stroomkosten exclusief aansluiting per jaar:					
Stroomkosten met 57.5% rendement (gegarandeerd):	57,5%				
Door grote buffer stroom voor 2/3 in laagtarief, prijs per kWh	€ 0,075				
Stroomkosten per kg H ₂	€ 4,30				Stroomkosten
Gemiddeld per jaar 14.000 kg H ₂ :	€ 60.261			€	60.261
					Pachtkosten
Pachtgrond, huur, en beheerskosten locatie boer:				€	2.400
					+
Totale jaarlijkse kosten met eigen electrolyser voor 14.000 kg H ₂ :				€	186.271
(incl. (nood)buffer, electrolyser, stroomkosten en onderhoud)					€ 175.271
Kosten per kg H ₂	€ 13,31	€ 12,52			
Kosten per nm ³ H ₂	€ 1,19	€ 1,12			



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Optie 2, Levering met trailer:

Optie 2: transport met trailer inclusief noodbuffer, winterbuffer, energiekosten en transportkosten					
	Investering	Afschrijving	Onderhoud	Totale jaarlijkse kosten:	
Trailer, 441 kg inclusief transport	€ 315.000		€ 9.450 3%		
(noodzaak, wisselen na 2 dagen en 12 uur, dus extra buffer)					
Lukt niet in een keer, extra flessenrek 245 kg inclusief transport	€ 135.000		€ 5.400 4%		
Kosten noodbuffer	€ 450.000	€ 45.000	€ 14.850	€	59.850
Kosten buffers voor het aanvoeren van waterstof in optie 2:					
2 trailers met transport:	€ 610.000	€ 61.000	€ 18.300 3%	€	79.300
				Buffers	
Kosten voor noodbuffer en 'maximale winterbuffer'	€ 1.060.000	€ 106.000	€ 33.150 3%	€	139.150
Transport- en vulkosten waterstof exclusief kosten stroom	Transport met trailers				
	Ritten	Kosten			
Zachte winter (4x 10 jaar) 12.500 kg H ₂	29	€ 51.330			
Gemiddelde winter (2x 10 jaar) 14.000 kg H ₂	32	€ 56.640			
Extra buffer totaal 750 kg voor koude winter (1x 3 jaar) 15.500 kg H ₂	35	€ 61.950			
Extra buffer voor koude winter (1x 10 jaar) 17.000 kg H ₂	39	€ 69.030 +			Transport en vullen
Gemiddeld transportkosten voor 10 jaar opgeteld:	€ 573.480			€	57.348
Stroomkosten op basis van tarief Hystock:					
Prijs per kWh	€ 0,083				
nodig 58,82 kWh per kg H ₂	€ 4,88				Stroomkosten
Gemiddeld per jaar 14.000 kg H₂:	€ 68.320,00			€	68.320
					+
Totale jaarlijkse kosten met trailer voor 14.000 kg H₂:				€	264.818
(incl. (nood)buffer, trailer, transport, stroomkosten en onderhoud)					
Kosten per kg H₂	€	18,92			
Kosten per nm³ H₂	€	1,69			



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Optie 3, levering met flessenrekken:

Optie 3: transport met flessenrek inclusief noodbuffer, winterbuffer, energiekosten en transportkosten					
	Investering	Afschrijving	Onderhoud	Totale jaarlijkse kosten:	
Flessenrek, 244 kg, inclusief transport (noodzaak wisselen na 1 dag en 9 uur)	€ 130.000		€ 5.200 4%		
Lukt niet in een keer, extra groot flessenrek + klein	€ 135.000		€ 5.400 4%		
Kosten noodbuffer	€ 265.000	€ 26.500	€ 10.600		€ 37.100
Kosten buffers voor het aanvoeren van waterstof in optie 3: 2 flessenrekken met transport:	€ 235.000	€ 23.500	€ 9.400 4%	€	32.900
				Buffers	
Kosten voor noodbuffer en 'maximale winterbuffer'	€ 500.000	€ 50.000	€ 20.000 3%	€	70.000
		Wisselen jaarlijks			
Transport- en vulkosten waterstof exclusief kosten stroom	Transport met flessenrekken				
	Ritten	Kosten			
Zachte winter (4x 10 jaar) 12.500 kg H ₂	51	€ 68.850			
Gemiddelde winter (2x 10 jaar) 14.000 kg H ₂	57	€ 76.950			
Extra buffer totaal 750 kg voor koude winter (1x 3 jaar) 15.500 kg H ₂	63	€ 85.050			
Extra buffer voor koude winter (1x 10 jaar) 17.000 kg H ₂	70	€ 94.500 +			Transport en vullen
Gemiddeld voor 10 jaar opgeteld:	€ 778.950			€	77.895
Stroomkosten op basis van tarief Hystock:					
Prijs per kWh	€ 0,083				
nodig 58,82 kWh per kg H ₂	€ 4,88				Stroomkosten
Gemiddeld per jaar 14.000 kg H ₂ :	€ 68.320,00			€	68.320
Totale jaarlijkse kosten met trailer voor 14.000 kg H ₂ :				€	216.215
(incl. (nood)buffer, trailer, transport, stroomkosten en onderhoud)					
Kosten per kg H ₂	€ 15,44				
Kosten per nm ³ H ₂	€ 1,38				



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Conclusie vergelijking 3 opties:

Deze berekeningen verschillen van eerdere aannames en onderzoeken. Met als belangrijkste verschillende uitgangspunten:

- De kosten om de zelfgeproduceerde waterstof naar 300 bar te brengen (kosten compressoren, tussenbuffer en de hierbij horende hoge stroomkosten) waren niet meegenomen in eerdere aannames en onderzoeken;
- Er was geen noodbuffer meegenomen in eerdere aannames en onderzoeken.

Het produceren van waterstof op de boerderij is financieel zeker competitief met aanvoer door derden en heeft daarnaast een aantal voordelen:

1. Levenszekerheid is groter;
2. Het aantal draaiende componenten is geminimaliseerd;
3. Het project is modulair uit te breiden, waarbij een groot deel van de nu gemaakte eenmalige kosten hergebruik kunnen worden (zie hiervoor bijlage B);
4. Door het innovatieve karakter is er een grote mogelijkheid op subsidie.
5. Er zijn wellicht nog besparingen te behalen door nog eens kritisch te kijken naar de behoefte aan waterstof (per woning) en de daaraan gerelateerde kosten van de buffer. Hier is uitgegaan van ruwe aannames en gemiddelden, zoals in beschikbare literatuur beschreven.

Er is additioneel ook nog gekeken naar de mogelijkheid van opschaling, zie hiervoor bijlage B.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

8. Contact met de boer

- A. Uitleggen wat een electrolyser op zijn bedrijf inhoudt;
- B. Er zullen diverse mensen (onderhoud, PR etc.) verschijnen op de locatie;
- C. Draagvlak creëren voor het hele project, ook bij de burens;
- D. Risico's voor de boer (financieel, maar ook mogelijke vervuiling);
- E. Samen met Enexis project helder maken met voorbereiding en de mogelijkheden om sommige financiële risico's mee af te dekken.

Rob Jacobs van L'orèl heeft contact gezocht met de familie van Tilburg, eigenaren van melkveebedrijf VOF Eelshof en aangegeven dat Enexis voor een wijk in Wagenborgen waterstof wil gaan produceren en ze hiervoor een boerderij zoekt. Omdat de familie van Tilburg vooruitstrevend is in duurzaamheid zijn ze door L'orèl benadert; daarnaast kent Rob de familie inclusief vader en broer al een jaar of acht en begeleidt hij de familie met al hun energievraagstukken.

Na de nadere uitwerking van het plan (grootte electrolyser, grootte buffer, grootte container e.d.) heeft Rob een afspraak gemaakt met de familie van Tilburg en de volgende punten besproken:

- a. Uitgelegd wat het plan inhoudt, wat een electrolyser doet en wat dit voor hun bedrijf zal betekenen. Ze zijn enthousiast over de verduurzamingsstap en willen er graag een bijdrage aan leveren. Er wordt veel gepraat en geschreven over waterstof; nu wordt het concreet en toegepast op hun boerderij. Van deze verduurzaming willen ze graag deel uitmaken.
- b. Dat er een container met geluid (electrolyser, compressoren et.) op het erf komt en er onderhoud gepleegd moet worden aan de apparatuur is voor hen geen probleem; ze gaan ervan uit dat Enexis hier een net contract voor opstelt die dit regelt.
- c. Het draagvlak voor de omgeving zal geen groot probleem zijn omdat indien gewenst de container uit het zicht geplaatst kan worden met een aantal struiken eromheen en verder van de weg af. De omliggende boerderijen weten ook dat de agrarische sector moet verduurzamen en zoeken ieder voor zich ook naar mogelijkheden. Hier worden geen problemen verwacht.
- d. Duidelijk is dat het melkveebedrijf te allen tijde door moet blijven functioneren en dat er geen financiële risico's genomen gaan worden die het voortbestaan van het bedrijf in gevaar kunnen brengen. De risico's zitten voor de familie niet alleen op het financiële vlak; ze willen ook geen risico's lopen met mogelijke vervuiling. Ook hier verwachten ze een net contract van Enexis die dit keurig regelt.
- e. Ze zijn bereid en hebben ondertussen een intentieverklaring ondertekend. Omdat het project nog in een te vroeg stadium is om de financiële risico's te kunnen inschatten is dit niet verder uitgewerkt. Ze gaan er wel van uit dat ze geen onverantwoorde risico's nemen; hiervoor is hun uitdrukkelijke wens (staat ook in mails aan Jan Flonk) dat L'orèl betrokken blijft bij het project, onder de vlag van Enexis is of als hun eigen adviseur.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

9. Uitgewerkt businessplan

Opleveren van een uitgewerkt businessplan voor de exploitatie van een electrolyser op adres van de boer, die als hoofddoel heeft het leveren van voldoende waterstof om 45 woningen in Wagenborgen in een strenge winter te kunnen verwarmen.

Er is een financieel plaatje gemaakt over de kosten voor het maken van 14.000 kg waterstof met bijhorende buffers op de boerderij, waterstofproductie tot aan de erfgrens.

Daar komen nog de diverse kosten bij, die Enexis zelf aanlevert:

1. Kosten voor extra stroomaansluiting;
2. Kosten voor vastrecht stroomaansluiting;
3. Kosten voor transportkosten van gemiddeld 800.000 kWh per jaar;
4. Gasleiding naar het dorp,
5. Gasleiding naar de woningen;
6. Aanpassingen voor de woningen.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@loreel.nl

10. Opleveren van intentieverklaring van de betreffende boer

De familie van Tilburg staat positief tegenover het idee om met een electrolyser waterstof op zijn erf te produceren waarmee het naastgelegen dorp Wagenborgen van het aardgas af kan.

Hiervoor is een intentieverklaring door beide partijen ondertekend.

11. Go/No Go overleg met voorbereiding

Een Go/No Go volgt mede afhankelijk van de al dan niet toegekende subsidie.

Deze keuze ligt bij Enexis, waarbij L'orèl Consultancy indien gewenst de berekeningen ten alle tijden zal uitleggen en in een vervolg verder zal specificeren.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

12. Aanbevelingen voor het vervolg

Fase 2: Voorbereiding (van minder grof naar fijn), wordt later naar gekeken.

1. Gedetailleerde en overzichtelijke berekeningen maken in basisbestand in Excel om vraag en aanbod verder uit te werken met verschillende opties en diverse keuzemogelijkheden: o.a. aantal woningen (20, 30, 40 en 50), verbruik woningen, productie, buffervaten, opslag (druk) en afname:
 - a. Alles opvangen in de piekproductie en zonder buffer, 50 woningen, 100 mbar;
 - b. Alles opvangen in piekproductie en zonder buffer, 50 woningen, 8 bar met reduceer bij het dorp;
 - c. a. & b. maar dan met buffer in de woningen;
 - d. c. met verschillende groottes buffers in de woningen;
 - e. 50 woningen is het maximale, maar bij heel groot succes ook meenemen of de grens mogelijk is van het successscenario, overcapaciteit evt. door drukverhoging (100 mbar en 8 bar standaard);
 - f. Opslag op het terrein van de boer, welke drukken en welke buffergrootte. Al dan niet in combinatie met diverse drukken, buffers in de woningen e.d.;
 - g. Wel of niet aanvoer via trailer als buffer is mogelijk ook een optie (algemeen, Air Liquide, Linde Gas, Gasunie, Holthausen en).
2. Gesprek met de gemeente:
 - a. Overleg vanuit de sommetjes en de technische achtergrond;
 - b. Wat mag er wel en wat niet op basis van huidige vergunning;
 - c. Welke aanpassingen op de vergunning zijn noodzakelijk;
 - d. Welke kosten hiermee gemoeid zijn;
 - e. Wat is het bijhorende tijdsplan.
3. Consequenties gemeente voor electrolyser op het erf voor de boer;
4. Welke opties zijn realistisch, op basis hiervan wordt er een aantal keuzes gemaakt en deze worden compleet uitgewerkt;
5. Welke kosten worden door wie gedragen en welke opties zijn mogelijk;
6. Aanvragen (te ondertekenen) offertes voor project ter plekke;
7. Overleg met gemeente voor realisatie;
8. Definitieve financiële plaatje, tweede businesscase;
9. Financiering en aanvullende fondsen regelen;
10. Definitieve aanvraag bank;
11. Go/No Go.

Fase 3: Uitvoering en beheer (van fijn naar nog fijner)

1. Begeleiding opstart project;
2. Coördinatie realisatie;
3. Aansluiten en opstart waterstofproductie;
4. Monitoren opwek en verbruiken.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Bijlage A: Uitgevoerde berekeningen.

Berekeningen groottes winterbuffers voor verschillende electrolyzers (groottes en types, los van de standaardmaten en uitgegaan van kW)

De standaardgroottes van de grote electrolyser fabrikanten zijn ongeveer 150, 300 en 500 kW en de optie 2*300 = 600 kW. De opties ongeveer 100, 200 en 400 kW zijn additioneel verkrijgbaar (wel tegen meerprijs en langere levertijden).

Er zijn verschillende fabrikanten die kleinere PEM electrolyzers kunnen leveren, echter doorvragen leverde onbevredigde antwoorden. Er is in ieder geval nauwelijks praktijkervaring. Om deze reden adviseren we deze techniek op dit moment niet. Bij de definitieve uitvoering de komende tijd kan deze optie alsnog bekeken worden.

De berekening is uitgevoerd voor uurpiek, dagpiek, max. 10 koude dagen achter elkaar (winter 2012) en 10 koude & 10 half koude dagen achter elkaar (winter 2017).

De opties 150, 300 en 500 kW zijn omcirkeld omdat deze het beste passen en standaardmaten zijn met de laagste prijzen en kortste levertijden.

Piekvraag per uur:

Piekvraag 12,1 kg						
Berekening kg H ₂ per uur	Rendement PEM electrolyser			Rendement Alkaline		
Vermogen electrolyser in kW	60%	65%	70%	50%	55%	60%
600	10,9	11,8	12,7	9,1	10,0	10,9
500	9,1	9,8	10,6	7,6	8,3	9,1
400	7,3	7,9	8,5	6,1	6,7	7,3
300	5,5	5,9	6,4	4,5	5,0	5,5
200	3,6	3,9	4,2	3,0	3,3	3,6
150	2,7	3,0	3,2	2,3	2,5	2,7
100	1,8	2,0	2,1	1,5	1,7	1,8
	Kan zonder aparte buffer op koudste uur, zelfs op 1.100 mBar					
	Kan zonder aparte buffer op koudste uur, maar dan wel op 8 bar					

De tabel laat zien dat zonder buffer geen Alkaline zonder leiding buffer kan werken.

Voor de drie standaard electrolyzers is een extra buffer noodzakelijk om de piekvraag per uur te kunnen leveren. Afhankelijk van de grootte van de electrolyser is deze buffer groter of kleiner.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Piekvraag per dag:

Piek dagvraag 176 kg 1 dag						
Berekening kg H₂ per dag						
	Rendement PEM electrolyser			Rendement Alkaline		
Vermogen electrolyser in kW	60%	65%	70%	50%	55%	60%
600	261,8	283,6	305,5	218,2	240,0	261,8
500	218,2	236,4	254,5	181,8	200,0	218,2
400	174,5	189,1	203,6	145,5	160,0	174,5
300	130,9	141,8	152,7	109,1	120,0	130,9
200	87,3	94,5	101,8	72,7	80,0	87,3
150	65,5	70,9	76,4	54,5	60,0	65,5
100	43,6	47,3	50,9	36,4	40,0	43,6
	Kan zonder aparte buffer op koudste dag, zelfs op 1.100 mBar					
	Kan zonder aparte buffer op koudste dag, maar dan wel op 8 bar					
Cilinderpakket, 245 kg	Extra buffer voor op koudste dag					

De tabel laat zien dat alleen de 500 kW electrolyser zonder buffer de maximale dagvraag kan leveren. De 150 en 300 kW electrolyser hebben ook een (grotere) buffer nodig om de maximale dagvraag te kunnen leveren. Afhankelijk van de grootte van de electrolyser is deze buffer groter of kleiner.

Als deze buffer extern wordt aangevoerd dan is een standaard flessenrek van 14 flessenrekken ruim voldoende met een inhoud van 245 kg. Voor de 300 kW volstaan 4 flessenrekken en voor de 150 kW volstaan 8 flessenrekken.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Piekvraag in koude periode in winter 2017:

Piekvraag 10 koudste dagen 1.408 kg (winter 2017)						
Berekening kg H₂ per 10 koudste dagen, 3x per 10 jaar						
Vermogen electrolyser in kW	Rendement PEM electrolyser			Rendement Alkaline		
	60%	65%	70%	50%	55%	60%
600	2.618,2	2.836,4	3.054,5	2.181,8	2.400,0	2.618,2
500	2.181,8	2.363,6	2.545,5	1.818,2	2.000,0	2.181,8
400	1.745,5	1.890,9	2.036,4	1.454,5	1.600,0	1.745,5
300	1.309,1	1.418,2	1.527,3	1.090,9	1.200,0	1.309,1
200	872,7	945,5	1.018,2	727,3	800,0	872,7
150	654,5	709,1	763,6	545,5	600,0	654,5
100	436,4	472,7	509,1	363,6	400,0	436,4
Kan zonder aparte buffer op koudste 10 dagen, zelfs op 1.100 mBar						
Kan zonder aparte buffer op koudste 10 dagen, maar dan wel op 8 bar						
Cilinderpakket, 245 kg	Extra buffer voor op koudste 10 dagen					
2x Cilinderpakket, 490 kg	2x Extra buffer voor op 10 koudste dag					
3x Cilinderpakket, 735 kg	3x Extra buffer voor op 10 koudste dag					
4x Cilinderpakket, 980 kg	4x Extra buffer voor op 10 koudste dag					
5x Cilinderpakket, 1.225 kg	5x Extra buffer voor op 10 koudste dag					

De tabel laat zien dat alleen de 500 kW electrolyser zonder buffer de maximale piekvraag gedurende de 10 koudste dagen in de winter van 2017 kan leveren. De 150 en 300 kW electrolyser hebben ook een grote buffer nodig om de maximale vraag in deze winter te kunnen leveren.

Afhankelijk van de grootte van de electrolyser is deze buffer groter of kleiner.

Als deze buffer extern wordt aangevoerd dan is een standaard van 14 flessenrekken voldoende met een inhoud van 245 kg voor de 300 kW. Voor de 150 kW zullen 4 standaard van 14 flessenrekken aangevoerd moeten worden in deze 10 dagen.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Piekvraag in koude periode in winter 2012:

Piekvraag 10 koudste en halfkoude dagen 2.112 kg (winter 2012)						
Berekening kg H₂ per 10 koudste en halfkoude dagen, 1x per 10 jaar						
Vermogen electrolyser in kW	Rendement PEM electrolyser			Rendement Alkaline		
	60%	65%	70%	50%	55%	60%
600	5.236,4	5.672,7	6.109,1	4.363,6	4.800,0	5.236,4
500	4.363,6	4.727,3	5.090,9	3.636,4	4.000,0	4.363,6
400	3.490,9	3.781,8	4.072,7	2.909,1	3.200,0	3.490,9
300	2.618,2	2.836,4	3.054,5	2.181,8	2.400,0	2.618,2
200	1.745,5	1.890,9	2.036,4	1.454,5	1.600,0	1.745,5
150	1.309,1	1.418,2	1.527,3	1.090,9	1.200,0	1.309,1
100	872,7	945,5	1.018,2	727,3	800,0	872,7
Kan zonder aparte buffer op koudste en halfkoude 10 dagen, zelfs op 1.100 mBar						
Kan zonder aparte buffer op koudste en halfkoude 10 dagen, maar dan wel op 8 bar						
Cilinderpakket, 245 kg	Extra buffer voor op koudste en halfkoude 10 dagen					
2x Cilinderpakket, 490 kg	2x Extra buffer voor op 10 koudste en halfkoude dag					
3x Cilinderpakket, 735 kg	3x Extra buffer voor op 10 koudste en halfkoude dag					
4x Cilinderpakket, 980 kg	4x Extra buffer voor op 10 koudste en halfkoude dag					
5x Cilinderpakket, 1.225 kg	5x Extra buffer voor op 10 koudste en halfkoude dag					
6x Cilinderpakket, 1.470 kg	6x Extra buffer voor op 10 koudste en halfkoude dag					

De tabel laat zien dat de 300 en 500 kW electrolyser zonder buffer de maximale piekvraag gedurende de 20 koudste dagen in de winter van 2012 kan leveren. De 150 kW electrolyser heeft ook een grote buffer nodig om de maximale vraag in deze winter te kunnen leveren.

Als deze buffer extern wordt aangevoerd dan zullen voor de 150 kW electrolyser 4 standaard van 14 flessenrekken aangevoerd moeten worden in deze 20 dagen.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorelnl.nl

Dit levert onderstaand overzichtskostenplaatje op voor externe buffer voor de piekvragen (naast de standaard productie door de electrolyzers):

	10 jaar	10 jaar	10 jaar	1 jaar	Noodvoorziening	Noodvoorziening
PEM, 60%	Basis buffer	ritjes	Kosten	per jaar	in uren koudste dag	in uren zomer
Bij 500 kW E.L. *	2	0	€ 35.996	€ 3.600	0,1	1
Bij 500 kW E.L. **	2	0	€ 85.996	€ 8.600	4	41
Bij 300 kW E.L.	2	3	€ 250.872	€ 25.087	21	147
Bij 200 kW E.L.	2	9	€ 268.272	€ 26.827	21	147
Bij 150 kW E.L.	2	12	€ 276.972	€ 27.697	21	147
Bij 100 kW E.L.	2	14	€ 282.772	€ 28.277	21	147
* = noodvoorziening met 2 flessenrekken en standaard 100 mBar						
** = noodvoorziening met 2 flessenrekken en als extra 8 bar leiding en GDS (€ 50.000)						

Hierbij is zichtbaar dat alleen bij de 500 kW electrolyser de buffer in de leiding verschil maakt op de kosten, voor alle andere opties is deze buffer zo klein tov de andere benodigde buffers dat het iets uitmaakt.

Deze tabel laat ook zien dat de wisselbare buffers in de winter maximaal 20 uur de piekvraag kunnen leveren, of 1 dag en 9 uur de piekvraag van de koudste dag als ze helemaal gevuld zijn. In de praktijk kan het voorkomen dat dit zelfs maar een paar uur is als de buffers bijna leeg zijn.

Er zullen additionele noodbuffers nodig zijn, voor alle uitgewerkte opties!

Alternatieve uitwerking om de benodigde winterbuffers te bepalen op basis van vermogens:

Alkaline	500 kW			Tekorten in verschillende situaties			
Regelbereik	200	500 kW					
Rendement :	55%			Per uur:	Per dag:	Per 10 koudste dagen:	Per 10 koudste & 10 halve koude dagen:
Productie in kg H2 per uur:	3,33	8,33 kg		-3,8	24	592	1.888 kg
Productie in kg H2 per dag:	80	200 kg					
Draaiuren vollast voor 14.000 kg:		1.680 Uren					
Alkaline	300 kW						
Regelbereik	120	300 kW					
Rendement :	55%						
Productie in kg H2 per uur:	2,00	5,00 kg		-7,1	-56	-208	288 kg
Productie in kg H2 per dag:	48	120 kg					
Draaiuren vollast voor 14.000 kg:		2.800 Uren					
Alkaline	150 kW						
Regelbereik	60	150 kW					
Rendement :	55%						
Productie in kg H2 per uur:	1,00	2,50 kg		-9,6	-116	-808	-912 kg
Productie in kg H2 per dag:	24	60 kg					
Draaiuren vollast voor 14.000 kg:		5.600 Uren					



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Berekening ondergrondse buffer

Buffering in stalen gasleidingen in de grond met beveiliging:

Voorbeeld 48 duims buis met 1,4 cm wanddikte en 16 meter lengte heeft een inhoud van bijna 18 m³ aardgas bij atmosferische druk of bijna 54 m³ H₂ of bijna 4,8 kg H₂.

Buffer aangesloten op 100 mbar leiding met onderdruk van 2,5 bar:

- Comprimeren naar 27 bar (onderdruk 2,5 bar) levert: 437 m³ aardgas of 1.311 m³ H₂ of ruim 117 kg H₂.
- Comprimeren naar 40 bar (onderdruk 2,5 bar) levert: 669 m³ aardgas of 2.006 m³ H₂. of ruim 179 kg H₂.

Stalen buizen (volume waterstof):

Aantal buizen:	27 bar	40 bar
1	117 kg	179 kg
2	234 kg	358 kg
4	468 kg	716 kg
6	879 kg	1.075 kg
8	936 kg	1.433 kg
10	1.170 kg	1.791 kg
12	1.404 kg	2.149 kg

Stalen buizen (noodzakelijk om altijd te kunnen leveren):

Vermogen electrolyser:	27 bar	40 bar	
500 kW	1 buis	1 buis	Opvangen uurpiek
300 kW	2 buizen	2 buizen	Opvangen uurpiek, dagpiek en 10 koudste dagen
150 kW	8 buizen	6 buizen	Opvangen uurpiek, dagpiek, 10 koudste dagen & 10 koudste dagen en 10 half koude dagen

Noodbuffer voor minimaal 3 dagen, 3* 176 = 528 kg:

- Minimaal 5 buizen op 27 bar. Netto 3 dagen en bijna 8 uur bij 100 mbar leiding.
- Minimaal 3 buizen op 40 bar. Netto 3 dagen en 1 uur bij 100 mbar leiding.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Bijlage B: Reproduceerbaarheid, opschaling en kostenverlaging.

Als we de berekeningen voor 45 woningen als basis nemen.

Voor 90 woningen wordt de kostprijs per nm^3 H_2 lager:

Kostenverlagende factoren:

- Er wordt een tweede (150 kW) electrolyser geplaatst die een aantal gebruik kan maken van diverse onderdelen van de al bestaande electrolyser. De nieuwprijs zal dan zakken naar circa € 450.000, dit levert winst voor de kostprijs.
- De noodbuffer is door de dubbele electrolysers met een kleine uitbreiding ook groot genoeg voor 90 woningen (beide electrolysers tegelijk stuk is nagenoeg uitgesloten), ook extra winst.
- De stroomkosten zullen ook nagenoeg verdubbelen, hier zal de winst minimaal zijn.
- De preventieve onderhoudskosten zullen lager zijn voor 2 dan voor 1 toestel.

Kostenverhogende factoren:

- *Zwaardere stroomaansluiting (echter nauwelijks verhogend).*

Een eerste voorzichtige berekening laat zien dat de prijs per nm^3 H_2 zal dan onder de € 1 zakken.

Voor 180 woningen wordt de kostprijs per nm^3 H_2 nog lager:

Kostenverlagende factoren:

- Er wordt een derde (300 kW) electrolyser geplaatst die gebruik kan maken van diverse onderdelen van de al bestaande electrolysers. De nieuwprijs zal dan zakken naar circa € 750.000, dit levert winst voor de kostprijs.
- De noodbuffer is door de driedubbele electrolysers met nogmaals een kleine uitbreiding ook groot genoeg voor 180 woningen (twee electrolysers tegelijk stuk is nagenoeg uitgesloten), ook extra winst.
- De stroomkosten zullen ook nagenoeg verdubbelen, hier zal de winst minimaal zijn.
- De preventieve onderhoudskosten zullen lager zijn voor 3 dan voor 2 toestellen.

Kostenverhogende factoren:

- *Zwaardere stroomaansluiting (echter nauwelijks verhogend).*

Een eerste voorzichtig berekening laat zien dat de prijs per nm^3 H_2 zal dan richting € 0,85 zakken.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Voor 360 woningen wordt de kostprijs per nm³ H₂ nog lager:

Kostenverlagende factoren:

- Er wordt een vierde (600 kW) electrolyser geplaatst die gebruik kan maken van diverse onderdelen van de al bestaande electrolyzers. De nieuwprijs zal dan zakken naar circa € 750.000, dit levert winst voor de kostprijs.
- De noodbuffer is door de vierdubbele electrolyzers met nogmaals een kleine uitbreiding ook groot genoeg voor 360 woningen (twee electrolyzers tegelijk stuk is nagenoeg uitgesloten), ook extra winst.
- De stroomkosten zullen ook nagenoeg verdubbelen, hier zal de winst minimaal zijn.
- De preventieve onderhoudskosten zullen lager zijn voor 4 dan voor 3 toestellen.

Kostenverhogende factoren:

- *Zwaardere stroomaansluiting (echter nauwelijks verhogend).*

Een eerste voorzichtige berekening laat zien dat de prijs per nm³ H₂ zal dan richting € 0,75 zakken.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Voor 720 woningen, maar dan vanaf de basis opnieuw opstarten.

Dan wordt de kostprijs per $\text{nm}^3 \text{H}_2$ nog lager:

Kostenverlagende factoren:

- Er worden twee elektrolyzers van 1.250 kW (samen 2.500 kW) electrolyser geplaatst. Dit worden dan PEM electrolyzers die goedkoper zijn bij de aanschaf, door de dubbele uitvoering worden de kosten ook lager door gezamenlijk gebruik van onderdelen, minder onderhoud nodig hebben, een 5-10% hoger rendement en 35 bar als einddruk leveren. Hierdoor zakt de nieuwprijs naar ruim € 3 miljoen. De jaarkosten zullen ongeveer € 400.000 zijn.
- Door de 35 bar overdruk neemt de buffercapaciteit per leiding met 1/3 toe, de kosten voor de noodbuffer zullen stijgen naar ongeveer € 1 miljoen. De jaarkosten ongeveer € 100.000.
- De stroomkosten zullen zakken naar € 3,50 per kg door het hoger rendement en de lagere stroomprijs of ruim € 780.000 per jaar.
- De kosten voor de winterbuffer zullen ook minder stijgen tot ongeveer € 2 miljoen. De jaarkosten zullen ongeveer € 200.000 per jaar.

Kostenverhogende factoren:

- *Zwaardere stroomaansluiting (echter nauwelijks verhogend).*

Een eerste voorzichtige berekening laat zien dat de prijs per $\text{nm}^3 \text{H}_2$ zal dan richting € 0,60 zakken.

Als we met de langere levensduur van de PEM en de leidingen gaan afschrijven op 20 jaar zakt de prijs per $\text{nm}^3 \text{H}_2$ zal dan richting € 0,50 zakken. Dubbel zo duur dan het huidige aardgas!

Als we kijken naar de steeds verder zakkende kostprijs van zonnepanelen, electrolyzers en windmolens per kW dan zal de bovengenoemde prijs in de toekomst nog verder zakken.



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Bijlage C: Uitgangspunten voor het berekenen van de kosten voor aangevoerd waterstof aangleverd door Enexis

Scenario's

Er zijn een drietal scenario's onderzocht voor de beschikbaarheid van waterstof in Wagenborgen. Voor een tweetal scenario's zijn twee varianten in beeld gebracht.

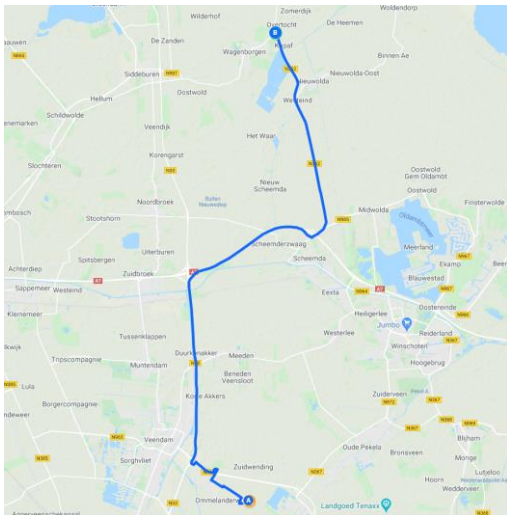
1. Aanvoer van groene waterstof van Hystock
 - a. Aanvoer door middel van trailers
 - b. Aanvoer door middel van cilinderpakketten
2. Ter plekke opwekking van groene waterstof door middel van elektrolyse
 - a. Productie alleen naar vraag van de woningen
 - b. Overschot aan productiecapaciteit inzetten voor externe verkoop
3. Waterstofleiding vanaf Delfzijl Chemiepark



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

C.1 Aanvoer van groene waterstof van Hystock

Gasunie produceert momenteel groene waterstof op de locatie Hystock in Zuidwending. Een marktpartij kan het waterstoftransport verzorgen van Zuidwending naar Wagenborgen waar het invoerpunt op het nieuw te maken waterstofnet is, zie figuur 1 voor de route. Hierbij zijn twee opties mogelijk, het gebruik maken van grote trailer die op de invoerlocatie gestald wordt. Of het gebruik van losse cilinderpakketten die afgeladen worden.



Figuur 1 Route van Hystock naar Wagenborgen



Figuur 2 Cilinderpakketten-trailer van een marktpartij



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Uitgangspunten

Een marktpartij heeft de volgende informatie verschaft:

- In de berekening van deze marktparij is de verhouding 1 kg waterstof is 11,2 m³ waterstof.

A. Wisseltrailer

- Een trailer heeft 5.500 mn³ waterstof bij zich op 300 bar.
- Een H₂ trailer heeft een inhoud van 5.500 mn³ (490 kg) en ik reken met 10% kussengas, dan is de 'netto' inhoud 4.950 mn³ (442 kg).
- Naast de trailer op het invoedpunt dienen ook er 4 cilinderpakketten van elks 218 mn³, totaal 872 mn³ (78 kg) geplaatst te worden om het omschakelen te kunnen doen.
- De vrachtkosten voor 1 trailerwissel (5.500mn³) incl. om koppeltijd zijn ca. € 610,-- per kg H₂ ongeveer € 1,24 per kg of € 0,11 per mn³ H₂
- Met tussengas: € 1,38 per kg of 0,12 per mn³ H₂
- Bij een jaarverbruik van ongeveer 14.000 kg H₂ is dit: € 19.321, ongeveer **€ 19.500**

B. Cilinder pakketten

- Gemakshalve is de verhouding aangehouden van 1 kg waterstof is 10 m³ waterstof.
- Voor het project dienen 2*14 cilinderpakketten te worden aangeschaft 28 *218 = 6.104 mn³, omgerekend met 10% kussengas, dan is de 'netto' inhoud 5.494 mn³ (490 kg, of 2* 245 kg)
- Hiervan worden 14 geplaatst op de invoedlocatie en 14 bij Hystock, 14 cilinders passen er ook op een trailer, zie onderstaande foto.
- De vrachtkosten voor 14 cilinderpakketten (3.050 mn³) incl. om koppel en lostijd zijn ca. €. 610,00, per kg H₂ ongeveer € 2,24 of € 0,20 per mn³
- H₂ per kg H₂ ongeveer € 2,49 of € 0,22 per nm³ H₂
- Bij een jaarverbruik van 14.000 kg H₂ is dit: € 34.857, ongeveer **€ 35.000**



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Informatie van Hystock-Gasunie voor het vullen:

- Hystock kan op dit moment maximaal 17 kg per uur produceren.
- De vultijd van een trailer is dan 495 kg/17 kg= circa 30 uur
- Voor het vullen van de trailer/flessen dient een conversieftee betaald te worden:

	kg H2 per vracht				
Conversie H2/maand	100	200	300	400	500
200 €	3,90	€ 3,10	€ 2,83	€ 2,69	€ 2,61
500 €	3,87	€ 3,06	€ 2,80	€ 2,66	€ 2,58
1000 €	3,82	€ 3,01	€ 2,75	€ 2,61	€ 2,53

- De conversie van waterstof kost 58,83 Kwh per kilo/ 5,88 Kwh per mn3.
- De elektriciteitsprijs is 0,0829 €/kwh, hierin is ook energiebelasting en ODE opgenomen.
- Kosten per kg = € 5,46 of € 0,49 per mn3
- Voor 1 trailer: € 2.414 en voor 28 flessenrekken € 1.340
- Bij een jaarverbruik van 14.000 kg H2 is dit: € 76.437, ongeveer **€ 76.500**
- Conversieftee voor het vullen van een trailer = 2,53 per kg of 35.420, ongeveer € 35.500
- Conversieftee voor het vullen van een trailer = 2,75 per kg of 38.500

Aanvullende uitgangspunten:

- Om in de winterperiode voldoende capaciteit te hebben dienen er twee wisseltrailers te worden aangeschaft. Eén wisseltrailer kan binnen 2,8 dag (495 kg /178 kg/dag) verbruikt worden op het invoedpunt. Het vullen duurt 30 uur (1,5 dag) bij Hystock.

Berekening investering- en exploitatiebegroting

- A. Simpel: Investering 2 trailers en cilinders: € 640.000 of € 64.000 per jaar (zonder rente)
- B. Jaarlijks € 19.500 + € 76.500 + 35.500 = € 131.500 of € 9,39 per kg flexibel of 0,83 per mn3 waterstof.
- C. Totaal € 64.000 + 131.500 = € 195.500 of € 13,96 per kg of 1,25 per mn3 waterstof!



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

1. Aanvoer door middel van trailers

Aanvoer van groene waterstof van Hystock				
Variant a: Aanvoer door middel van trailers				
Investeringsbegroting				€ 639.348
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Waterstoftrailer type t2 (40ft 300 bar)	2	550 kg per trailer	€ 292.076	€ 584.152
Cilinderpakkettype t2 (16x50lt x 300 bar)	4	21,8 kg per cilinder	€ 7.549	€ 30.196
Transportkosten eenmalig	1		€ 25.000	€ 25.000
Exploitatatiebegroting				€ 182.038
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Ritkosten	28	ritten	€ 610,00	€ 17.080
Kostprijs conversie aan Gasunie	13500	kg	€ 2,61	€ 35.235
Elektriciteitsprijs	58,82	kwh/kg waterstof	€ 0,0612	€ 48.629
Energiebelasting	58,82	kwh/kg waterstof	€ 0,0142	€ 11.284
ODE	58,82	kwh/kg waterstof	€ 0,0074	€ 5.876
Afschrijvingskosten investering	10	jaar	€ 639.348	€ 63.935
Exploitatiekosten per m3 waterstof				€ 1,35

2. Aanvoer door middel van cilinderpakketten

Simpel: Investering 28 cilinderpakketten: € 240.000 of € 24.000 per jaar (zonder rente)
 Jaarlijks € 35.000 + € 76.500 + 38.500 = € 150.000 of € 10,71 per kg flexibel of 0,96 per mn3 waterstof.
 Totaal € 24.000 + 150.000 = € 174.000 of € 12,43 per kg of 1,11 per mn3 waterstof!



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Aanvoer van groene waterstof van Hystock				
Variant B: Aanvoer door middel van cilinderpakketten				
Investeringskosten				€ 236.372
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Cilinderpakkettype t2 (16x50lt x 300 bar)	28	21,8 kg per cilinder	€ 7.549	€ 211.372
Transportkosten eenmalig	1		€ 25.000	€ 25.000
Exploitatiebegroting				€ 157.051
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Ritkosten	50	ritten	€ 610,00	€ 30.500
Kostprijs conversie aan Gasunie	13500	kg	€ 2,75	€ 37.125
Elektriciteitsprijs	58,82	kwh/kg waterstof	€ 0,0612	€ 48.629
Energiebelasting	58,82	kwh/kg waterstof	€ 0,0142	€ 11.284
ODE	58,82	kwh/kg waterstof	€ 0,0074	€ 5.876
Afschrijvingskosten investering	10	jaar	€ 236.372	€ 23.637
Exploitatiekosten per m3				€ 1,16



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

C.2 Ter plekke opwekking van groene waterstof door middel van elektrolyse

Een mogelijkheid is om ter plekke in Wagenborgen een elektrolyser te plaatsen. Voor de huidige onderzoek is de GOS-locatie als uitgangspunt genomen. Hiervoor zijn twee varianten onderzocht.

- a. Productie alleen naar vraag van de woningen
- b. Overschot aan productiecapaciteit inzetten voor externe verkoop

Compressie ivm opslag

Uitgangspunten

- In deze berekening is van de verhouding van 1 kg waterstof is 11,2 m³ waterstof uitgegaan.

Voor de investeringsbegroting zijn de volgende uitgangspunten genomen:

- Aansluitkosten voor de MSD-aansluiting zijn afkomstig van de Enexis-website⁴
- Klantzijde van de aansluiting is ingeschat op 27.500 euro op basis van beschikbare tarieven.
- De minimale productiecapaciteit van de elektrolyser moet 2000m² per dag zijn. Dit staat gelijk aan een (2000*0,089*58,82kwh/24uur) 436 kw, afgerond 450 kw elektrolyser.
- De kosten voor de elektrolyser zijn afgeleid uit prijsstellingen in het DNV-gl onderzoek. Hierin gaat het om grote vermogens en daardoor daalt de prijs, daarom is gebruik gemaakt van de stelregel een miljoen per megawatt.
- De vervanging van de stacks is in variant a niet noodzakelijk. De installatie zal jaarlijks ongeveer 1.600-1.700 vollasturen maken en daarmee binnen 10 jaar niet aan de maximale 60.000 vollasturen van de stacks komen.
- De kosten van de cilinderpakketten zijn afkomstig uit de kostenopgave van een marktpartij.

Voor de exploitatiebegroting zijn de volgende uitgangspunten genomen:

- Onderhoudskosten voor alle investeringen (m.u.v. de aansluitkosten) zijn gesteld op 2%, afgeleid uit het DNV-gl onderzoek.
- De maandelijkse tarieven voor de MSD -aansluiting zijn afkomstig van de Enexis-website⁵.
- Voor de productie van waterstof is van waterstof is dezelfde omzettingsfactor als Hystock gehanteerd, 58,82 kwh/kg waterstof. Hierin zit het rendement van de elektrolyser verwerkt.
- De kosten voor de elektriciteit zijn afkomstig uit de kostenopgave van een marktpartij, zie 2.1.

⁴ <https://www.enexis.nl/zakelijk/aansluitingen/tarieven/tarievenoverzicht/eenmalige-kosten>

⁵ <https://www.enexis.nl/zakelijk/aansluitingen/tarieven/netwerkkosten-berekenen-elektriciteit>



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

Variant b: Overschot aan productiecapaciteit inzetten voor externe verkoop

- De elektrolyser kan over het hele jaar waterstof produceren, uitgegaan is van 8.000 draaiuren bij de maximale capaciteit van 450kW. Dit levert op jaarbasis **612.000 m³** (of 54.650 kg) waterstof op. Per uur 6,8 kg of 225 kW. Rendement van 50%! Voor de overschotten in de zomer zal afzet gezocht moeten worden. Om deze afzet te faciliteren dient op de opweklocatie ook opslag gerealiseerd te worden, dit is vooralsnog niet meegenomen in de berekening.
- De elektrolyser zal bij volledig gebruik ongeveer 8.000 vollasturen per jaar maken, dit betekent dat na 7,5 jaar de stacks vervangen dienen te worden. Ervaringscijfers van DNV GL geven aan dat dit 40% van de nieuwwaarde van de elektrolyser kost, 180.000 euro. Deze kosten zijn nettocontant gemaakt tegen een WACC van 8%.

Compressie van waterstof na electrolyser ontbreekt volledig in de berekening!

Berekening investering- en exploitatiebegroting

a. Productie alleen naar vraag van de woningen

Ter plekke opwekking van groene waterstof door middel van elektrolyse				
Variant a: Productie alleen naar vraag van de woningen				
Investeringsbegroting				€ 565.359
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Aansluitkosten - MSD aansluiting - 630kva	1	st	€ 11.007	€ 11.007
Aansluitkosten - meerlengte	255	m	€ 64,55	€ 16.460
Klantzijde aansluiting - compactstation incl klanttrafo 630 kva	1	st	€ 27.500	€ 27.500
Electrolyser	450	kw	€ 1.000	€ 450.000
Vervanging stack na 60.000 draaiuren	nvt			
Cilinderpakkettype t2 (16x50lt x 300 bar), 21,8 kg per pakket	8	st	€ 7.549	€ 60.392
Exploitatiebegroting				€ 149.062
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Onderhoudskosten (muv aansluiting Enexis)	2%	procent	€ 537.892,00	€ 10.758
MSD aansluiting - vastrecht transportdienst	1	st	€ 441,00	€ 441
MSD aansluiting - vastrecht aansluitdienst	1	st	€ 679,00	€ 679
MSD aansluiting - gecontracteerd vermogen	450	kw/jaar	€ 12,2600	€ 5.517
MSD aansluiting - maximaal vermogen	450	kw/maand	€ 1,4200	€ 7.668
MSD aansluiting - transporttarief	732.897	kwh	€ 0,0092	€ 6.743
Elektriciteitsprijs	732.897	kwh/kg waterstof	€ 0,0612	€ 44.883
Energiebelasting	732.897	kwh/kg waterstof	€ 0,0142	€ 10.414
ODE	732.897	kwh/kg waterstof	€ 0,0074	€ 5.423
Afschrijvingskosten investering	10	jaar	€ 565.359	€ 56.536
Exploitatiekosten per m3 waterstof	139552,0	m3 waterstof		€ 1,07



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

IN DEZE BEREKENING ONTBREEKT DE COMPLETE INSTALLATIE OM WATERSTOF OP 300 BAR TE BRENGEN OM HET TE KUNNEN VERKOPEN!

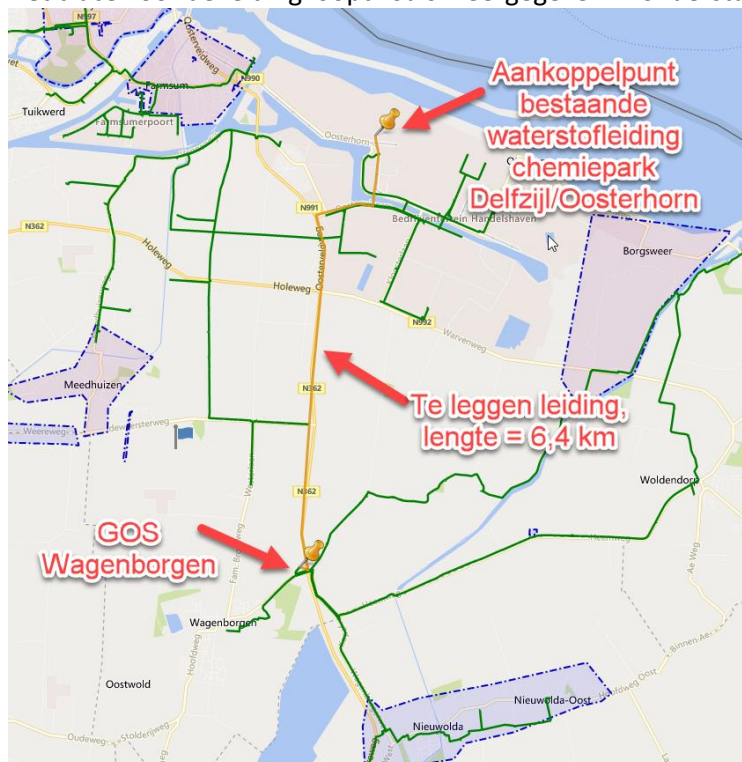
b. Overschot aan productiecapaciteit inzetten voor externe verkoop

Ter plekke opwekking van groene waterstof door middel van elektrolyse				
Variant b: Overschot aan productiecapaciteit inzetten voor externe verkoop				
Investeringsbegroting				€ 666.483
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Aansluitkosten - MSD aansluiting - 630kva	1	st	€ 11.007	€ 11.007
Aansluitkosten - meerlengte	255	m	€ 64,55	€ 16.460
Ruimte aansluiting	1	st	€ 27.500	€ 27.500
Electrolyser	450	kw	€ 1.000	€ 450.000
Vervanging stack na 60.000 draaiuren	0,562	NCW 7,5 jaar	€ 180.000	€ 101.124
Cilinderpakkettype t2 (16x50lt x 300 bar), 21,8 kg per pakket	8	st	€ 7.549	€ 60.392
Exploitatiebegroting				€ 425.114
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Onderhoudskosten (muv aansluiting Enexis)	2%	procent	€ 639.015,60	€ 12.780
MSD aansluiting - vastrecht transportdienst	1	st	€ 441,00	€ 441
MSD aansluiting - vastrecht aansluitdienst	1	st	€ 679,00	€ 679
MSD aansluiting - gecontracteerd vermogen	450	kw/jaar	€ 12,2600	€ 5.517
MSD aansluiting - maximaal vermogen	450	kw/maand	€ 1,4200	€ 7.668
MSD aansluiting - transporttarief	3.600.000	kwh	€ 0,0092	€ 33.120
Elektriciteitsprijs	3.600.000	kwh/kg waterstof	€ 0,0612	€ 220.464
Energiebelasting	3.600.000	kwh/kg waterstof	€ 0,0142	€ 51.156
ODE	3.600.000	kwh/kg waterstof	€ 0,0074	€ 26.640
Afschrijvingskosten investering	10	jaar	€ 666.483	€ 66.648
Exploitatiekosten per m3 waterstof	612036,7	m3 waterstof		€ 0,69



C.3 Waterstofleiding vanaf Chemiepark Delfzijl

Uitgangspunten



- Voor de kosten van aanleg zijn een aantal eenheidstarieven van Enexis gehanteerd, te weten voor de nieuwe aanleg van een 8 bar PE leiding 150 euro per meter, voor de plaatsing van een station tbv het aankoppelpunt met chemiepark 50.000 euro en voor het inbouwen van een afsluiter in het tracé of bij de stations 14.000 euro per stuk.

⁶ <https://www.gasunienewenergy.nl/projecten/djewels-20-mw-elektrolyse-installatie>



L'orèl Consultancy B.V.
www.Lorel.nl
info@lorel.nl

- Onderhoudskosten voor de assets zijn, net zoals in de DNV GL studie vastgesteld op 0,5% per jaar.
- De inkoopprijs voor waterstof van Chemiepark Delfzijl is
- Er is vanuit gegaan dat er geen opslag van waterstof nodig is in het tracé na het aankoppelpunt met Chemiepark Delfzijl.

Berekening investering- en exploitatiebegroting

Waterstofleiding vanaf Chemiepark Delfzijl				
Investeringsbegroting				€ 1.080.000
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Aanleg leiding	6400	meter	€ 150	€ 960.000
Inbouwen van een afsluiter	5	st	€ 14.000	€ 70.000
Plaatsen van druckbewakingstation	1	st	€ 50.000	€ 50.000
Exploitatiebegroting				€ 201.150
	Aantal	Eenheid	Bedrag per eenheid	Bedrag
Onderhoudskosten assets	0,5	procent	€ 1.080.000,00	€ 5.400
Inkoopprijs blauwe waterstof	13500	kg	€ 6,50	€ 87.750
Afschrijvingskosten investering	10	jaar	€ 1.080.000	€ 108.000
Exploitatiekosten per m3 waterstof				€ 1,49