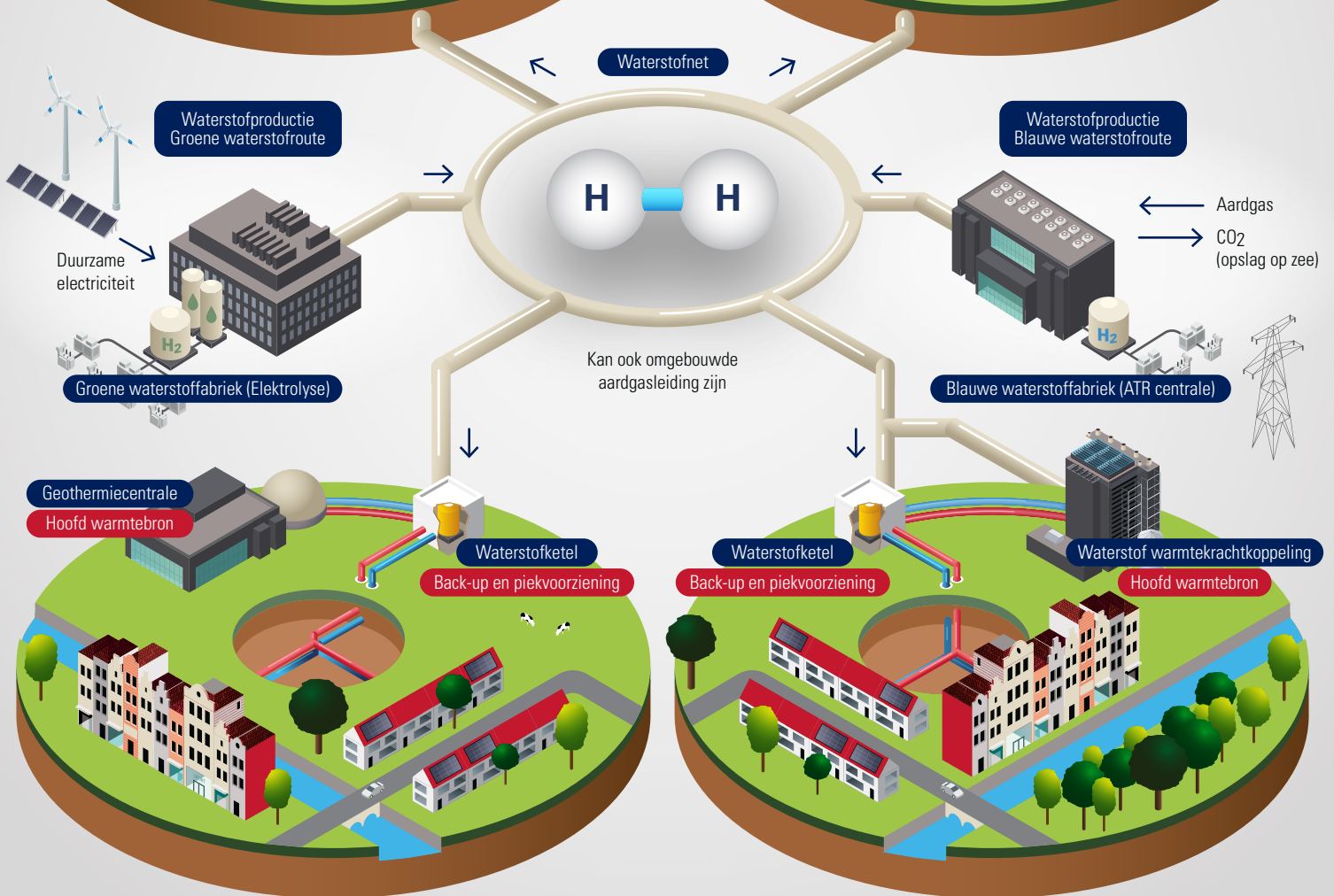
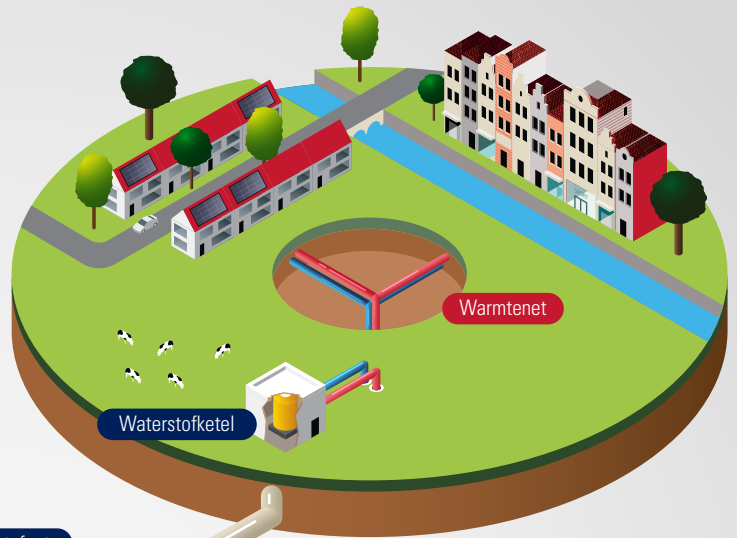


# Waterstof voor warmtenetten

Waterstof voor blokverwarming



Waterstofketel als primaire voeding voor een warmtenet



Geothermie baseload gecombineerd met een waterstofpiekkel

Waterstof WKK of brandstofcel gecombineerd met een waterstofpiekkel



# Waterstof voor warmtenetten

Waterstof als bron voor collectieve warmteketels, hulpketels en WKK

Eindrapportage, 16-10-2018

Bert den Ouden | Rob de Jeu | Rutger Bianchi | Aart Kooiman

**Berenschot**

## Inhoudsopgave



<b>Samenvatting .....</b>	<b>6</b>	<b>5. Casus 3 – Geothermie met waterstof Piekvoorziening warmtenet .....</b>	<b>18</b>
<b>1. Inleiding .....</b>	<b>8</b>	5.1 Voorziening van 5000 woningen; baseload geothermie in combinatie met een waterstofpiekketel .....	18
1.1 Het gebruik van waterstof voor een 100% CO <sub>2</sub> -vrije warmte-voorziening in de gebouwde omgeving .....	8	5.2 Positieve businesscases door combinatie baseload geothermie en piekvoorziening waterstof.....	18
1.2 Strategische verkenning naar de haalbaarheid van waterstof in warmtenetten .....	8	Conclusies en duiding .....	19
1.3 De businesscase voor vier casussen leidt tot een beeld van de financiële haalbaarheid van waterstof in waterstofwijkcentrales .....	9	<b>6. Casus 4 – Synergie waterstof-WKK en warmtepomp .....</b>	<b>20</b>
<b>2. De voorzieningsketen .....</b>	<b>10</b>	6.1 Een WKK of brandstofcel en piekketel draaiend op uitsluitend waterstof.....	20
2.1 De productiekosten van CO <sub>2</sub> -vrije blauwe en/of groene waterstof uitgesplitst in verschillende kostencomponenten .....	10	6.2 De WKK met H <sub>2</sub> piekketel op waterstof levert geen goede businesscase .....	20
2.2 Een waterstofinfrastructuur om waterstof op het juiste moment op de juiste plek te krijgen .....	11	6.3 Door verwachte kostendaling in PEM Fuel Cells komt een businesscase in de buurt .....	21
2.3 Door seizoensinvloeden in groene waterstofproductie, is de vraag naar opslag hier kleiner dan bij blauwe waterstofproductie .....	11	Conclusies en duiding .....	21
2.4 Met een ketel, WKK of brandstofcel wordt waterstof omgezet in warmte en mogelijk elektriciteit.....	12	<b>7. Verkenning praktijkcasussen en conclusies ..</b>	<b>22</b>
2.5 Warmtedistributie en NMDA.....	12	7.1 Wat is er nu al mogelijk? .....	22
2.6 De vier casussen ontstaan door verschillende uitgangspunten in waterstofproductie, de warmteproductie en warmtevraag .....	13	7.2 Uitgangspunten .....	23
<b>3. Casus 1 – Voorziening collectieve gebouwde omgeving .....</b>	<b>14</b>	7.3 Nieuw aan te leggen warmtenet Zwijndrecht.....	23
3.1 Voorziening van 100 appartementen; variatie in typen waterstof .....	14	7.4 Nieuw aan te leggen warmtenet Papendrecht/Sliedrecht .....	24
3.2 Er is een positieve businesscase voor blauwe waterstof en groene waterstof in 2050.....	14	7.5 Vervanging warmtebron bestaand warmtenet Zaanstad.....	24
3.3 De waterstofwijkcentrale leent zich goed voor warmtevoorziening van collectieve gebouwen.....	15	7.6 Vervanging warmtebron bestaand warmtenet Barendrecht .....	25
<b>4. Casus 2 – Primaire voeding warmtenet .....</b>	<b>16</b>	Conclusie casussen .....	25
4.1 Voorziening van 5000 woningen; variatie in mate van isolatie.....	16	7.7 Van aardgasnet naar waterstofnet, wat is daar voor nodig? .....	25
4.2 Minder goed geïsoleerde woningen hebben een betere businesscase, omdat er meer warmte per aansluiting geleverd kan worden .....	16	7.8 Van aardgasnet naar waterstofnet, mogelijke doorgroeipaden.....	26
Conclusies en duiding .....	17	7.9 Mogelijk scenario: Noord – Zuidleiding en ingroei vanuit randstad .....	26
		7.10 Gevoeligheden .....	27
		7.11 Afwegingskader .....	28
		7.12 Conclusies.....	28
		<b>Bronnen &amp; Appendix.....</b>	<b>30</b>
		Methode per casus beschrijven .....	30
		Bronnen .....	30
		Appendix A – samenvattend overzicht belangrijke aannames	31
		Appendix B – Kosteninschatting waterstofopslag in mijnschachten.....	32

## Leeswijzer

Deze rapportage bestaat uit zeven hoofdstukken. Het eerste hoofdstuk geeft de context en aanleiding van deze studie waar het verwachte strategisch inzicht wordt geduid. Hoofdstuk twee beschrijft de gehele voorzieningsketen van de productie van waterstof tot warmte in de woningen, hier wordt daarmee gelijk een aantal keuzes voor de modellering uitgelicht. In hoofdstuk drie tot en met zes worden respectievelijk vier verschillende casussen uiteengezet, de keuze voor de verschillende casussen is in hoofdstuk twee reeds toegelicht. Hoofdstuk zeven laat een verkenning zien van mogelijke praktijksituaties waar een waterstofwijkcentrale kan worden toegepast, in het laatste hoofdstuk wordt een korte toelichting op een mogelijke transitie van de gasinfrastructuur geschetst en staat de synthese.

## Samenvatting

Uit deze studie blijkt dat waterstof een belangrijke impuls kan zijn voor volledige CO<sub>2</sub>-neutrale warmtenetten.

Waterstof is vooral een goede optie om de piek- en back-upvoorziening van warmtenetten te dekken. De piek warmtevraag voor warmtenetten kan alleen door moleculen gedekt worden, gebruik van waterstof voor de piek- en back-upvoorziening van warmte is een slimme inzet van schaarse moleculen.

In deze studie is verkend wat het potentieel van waterstof is als duurzame bron voor warmtenetten. Hierbij is uitgegaan van een voorzieningsmodel waarin waterstof op wijkniveau wordt omgezet in warmte. De waterstof komt dus niet in de woningen zelf, die zijn aangesloten op het warmtenet. Hierdoor kan worden voortgebouwd op reeds opgedane ervaringen rondom warmtenetten en waterstof op industriële schaal. De studie laat voor vier verschillende type collectieve warmtevoorzieningen zien wat de integrale kosten zijn voor het gebruik van waterstof als CO<sub>2</sub>-neutrale brandstof. De onderzochte casussen zijn:

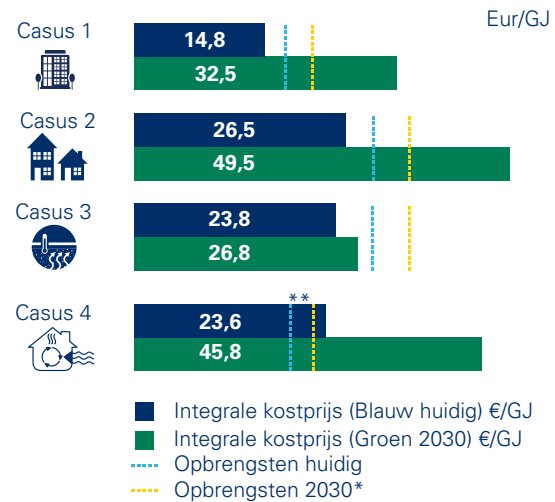
- waterstof voor blokverwarming (casus 1);
- waterstofketel als primaire voeding voor een warmtenet (casus 2);
- geothermie baseload gecombineerd met een waterstofpiekketel (casus 3);
- waterstof WKK of brandstofcel gecombineerd met een waterstofpiekketel (casus 4).

In alle situaties is uitgegaan van de huidige gasreferentie als criterium voor een businesscase, daarnaast is voor de lange termijn een grootschalige waterstofinfrastructuur aangenomen. (als ombouw van het huidige hogedruk gasnet)

De business cases zijn uitgerekend voor CO<sub>2</sub>-vrije waterstof, dat is “blauwe waterstof” (uit aardgas met CO<sub>2</sub>-afvang) of “groen waterstof” (uit duurzame elektriciteit met elektrolyse)

## Integrale kostprijs en opbrengsten per casus

Integrale kostprijs euro/GJ - Label C woningen



\* Deze belastingverhoging op aardgas werd voorgesteld in het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (17 juli 2018), en is in dit rapport als rekenmodel overgenomen. In de recente regeringsreactie (5 oktober 2018) is dit voorstel sterk afgezwakt.

\*\* De opbrengsten liggen bij casus 4 per gigajoule lager dan bij casus 2 en 3, dit komt doordat de opbrengsten van de elektriciteit uit de WKK de gemiddelde opbrengsten per gigajoule verminderen t.o.v. casus 2 en 3.

- In de huidige situatie zijn casus 1 t/m 3 rendabel, bij inzet van blauwe waterstof.
- Groene waterstof (met 2030 prijzen) biedt alleen perspectief bij inzet in de piekketel (casus 3), bij voldoende rendabele warmtenetten.
- Bij voorgenomen klimaatbeleid van belasting verhoging voor aardgas wordt ook waterstof i.c.m. een WKK mogelijk en laten andere casussen een gezonde(re) businesscase zien.

## Belangrijkste resultaten

De belangrijkste resultaten uit de studie zijn:

- In drie van de onderzochte cases is een positieve businesscase met blauwe waterstof:
  - waterstof voor blokverwarming (casus 1);
  - waterstofketel als primaire voeding voor een warmtenet (casus 2);
  - en 'geothermie gecombineerd met een waterstofpiekketel (casus 3). Deze zijn gebaseerd op de integrale kosten en het niet meer dan anders principe.
- Groene waterstof (in 2030) biedt perspectief wanneer ingezet in waterstofpiekketels.
- In twee van de vier onderzochte praktijkcasussen biedt blauwe waterstof nu al perspectief als duurzame warmtebron.
- Waterstof als baseload voorziening in een WKK of brandstofcel (casus 4) biedt momenteel geen businesscase. Onder andere vanwege een beperkte spark spread, waardoor opbrengsten van elektriciteit verhoudingsgewijs weinig opleveren. Met de impact van de mogelijke belastingverhoging<sup>\*1</sup> van aardgas wordt situatie WKK (brandstofcel) met waterstofpiek (casus 4b) een positieve case.
- Waterstof kan altijd de hoogste piek voorzien, dit betekent dat wanneer hoge temperatuur opslag (HTO, seizoenbuffering) mogelijk is, waterstof alleen de echte pieken (en back-up) hoeft te kunnen dekken. Dit heeft impact op de nood voor grote waterstofopslag en -leidingen naar het noorden.

## Infrastructuur

De studie gaat uit van een lange termijn situatie waarbij de huidige aardgas infrastructuur deels is omgezet in een grootschalige waterstofinfrastructuur. Voor de korte termijn is dus een opstart en doorgroeiscenario nodig om uit te stippelen hoe we dit in een aantal stappen kunnen bereiken. In de tijd neemt in ieder geval de vraag naar het aardgas af, dit biedt daarmee kansen voor het deel omzetten van het aardgasnet naar een waterstofnet. Afhankelijk van de mate en snelheid van het ontstaan van waterstofvraag/productie zijn er verschillende scenario's voor een switch van aardgas naar waterstof denkbaar zoals de Noord - Zuidleiding en ingroei vanuit bestaande netten in de randstad.

Daarom is er ook gekeken naar een viertal praktijkcases zonder de aanname van een grootschalige waterstofinfrastructuur. De voorwaarde is het gebruik van minimaal blauwe waterstof.

De volgende lessen worden getrokken:

- Net zoals in casus 3, komt een positieve business naar voren bij de inzet van een waterstofpiekketel i.c.m. een CO<sub>2</sub>-neutrale baseload.
- Een positieve case lijkt alleen mogelijk daar waar bestaande lokale waterstofinfrastructuur aanwezig is, of op termijn komt.

## Perspectieven

- Waterstof voor warmtenetten biedt perspectief en maakt in bepaalde gevallen, reeds nu al een businesscase mogelijk met blauwe waterstofproductie. Het gebruik van groene waterstof is vooralsnog alleen rendabel vanaf 2030 en alleen wanneer deze voor de piekvraag wordt ingezet.
- Daar waar nu al een waterstofinfrastructuur aanwezig is heeft waterstof een kans, vanuit hier kan het net dan wellicht uitgebreid worden naar naburige warmtevragen om zo de benodigde schaal van de infrastructuur te bewerkstelligen. Bestaande bijstookketels van warmtenetten bieden wellicht nu al perspectief om CO<sub>2</sub>-vrij te worden in de vorm van waterstofketels, door de branders te veranderen.
- De rentabiliteit van de warmtenetten is beter bij minder goed geïsoleerde woningen en gestapelde bouw. Dit kan gunstig zijn voor oude binnensteden en bestaande flats waar isolatie van panden moeizaam en kostbaar is, wat een 'all electric' oplossing veelal moeilijk inpasbaar maakt.
- Perspectief ligt in het in samenwerking met stakeholders verder onderzoeken van mogelijke praktijkcases. Hierbij is het van belang de juiste stakeholders te betrekken: warmtebedrijven staan open voor dialoog maar zijn op zoek naar waterstof aanbieders.

<sup>1</sup> In voorstel voor hoofdlijnen van het klimaatakkoord wordt voor 2030 een verhoging van de gasprijs voorgesteld van 20 ct. per kuub aardgas

# 1. Inleiding

## 1.1 Het gebruik van waterstof voor een 100% CO<sub>2</sub>-vrije warmte-voorziening in de gebouwde omgeving

Verschillende redenen vragen om een radicaal andere invulling van de huishoudelijke warmtevraag. Zo heeft Nederland zich middels het Parijsakkoord gecommitteerd aan een CO<sub>2</sub>-reductie van 80-95%. Dit vraagt om een aardgasloze of sterk aardgasarme gebouwde omgeving.

Hoewel er verschillende verduurzamingsopties voorhanden zijn om de gasvraag terug te dringen, leunt ieder van deze oplossingen nog op aard voor piekmomenten: Een 'all electric' warmtepomp heeft gascentrales nodig als back-up elektriciteitsvoorziening, hybride warmtepompen gebruiken deels gas en warmtenetten hebben hulpketels op gas. Voor dit gas wordt momenteel uitgegaan van groen gas, met beperkt binnenlands potentieel, of fossiel aardgas.

Waterstof heeft het voordeel 100% CO<sub>2</sub>-vrij te zijn. Dit onderzoek richt zich daarom op de vraag of het financieel haalbaar is om warmte in de gebouwde omgeving te voorzien.

Uitgangspunt van de studie is de waterstofwijkcentrale: een voorzieningsmodel waarin waterstof op wijkniveau wordt omgezet in warmte. Hierdoor kan worden voortgebouwd op reeds opgedane ervaringen rondom warmtenetten en waterstof op industriële schaal. Aspecten rondom de veiligheid van waterstof binnen de woning zijn niet van toepassing op deze studie.

Afhankelijkheid van verduurzamingsstrategieën van gas:

	STRATEGIE	PIEKVOORZIENING
	<b>Warmtenetten</b> ... op CO <sub>2</sub> -vrije warmte	<b>Hulpketels</b> ... op gas
	<b>'all electric' warmtepomp</b> ... op CO <sub>2</sub> -vrije stroom	<b>Back-up centrales</b> ... op gas
	<b>Hybride warmtepomp</b> ... op CO <sub>2</sub> -vrije stroom	<b>Ketel in woning</b> ... op gas

## 1.2 Strategische verkenning naar de haalbaarheid van waterstof in warmtenetten<sup>2</sup>

Een verkennend en casus gedreven karakter en gebruik van best beschikbare technologie en huidige regelgeving zijn uitgangspunten van dit onderzoek.

Karakter van dit onderzoek:

- Deze studie is een *verkennende studie*. Voor deze verkenning sluiten we aan bij het toekomstbeeld van zowel de haalbaarheidsstudie waterstof uit gas en de "Routekaart Waterstof" van het ministerie van Economische zaken. Daarin wordt een situatie beschreven waarin blauwe waterstof een brugfunctie heeft voor het realiseren van een waterstofinfrastructuur. Hierdoor ontstaat al op termijn een situatie met grootschalige en een goed functionerende transport en opslaginfrastructuur.
- Hiernaast is deze studie *casusgedreven*. Deze casussen representeren kansrijke marktsituaties voor het gebruik van een waterstofwijkcentrale. Om snel inzicht te krijgen worden deze hoog-over benaderd: er is gebruik gemaakt van kentallen voor verbruiken en efficiëntie van de geselecteerde marktsituaties.

Uitgangspunten:

- Uitgangspunt is dat in elke situatie gebruik wordt gemaakt van de best beschikbare technologie. Hierbij worden technieken meegenomen, waarvan redelijkerwijs een sterke leercurve verwacht kan worden. Onder meer voor groene waterstof is hier bandbreedte voor aangenomen. Doorbraak technologieën die momenteel nog helemaal niet marktrijp zijn (TRL niveau's <7) vallen buiten de scope van dit project.
- In deze studie zijn we uitgegaan van de huidige *spelregels* voor warmtelevering en hebben ook impact van de mogelijke belastingverhoging op aardgas inzichtelijk gemaakt, zoals beschreven in "voorstel voor hoofdlijnen van het klimaatakkoord". In de toekomst kunnen veranderende regels de businesscase zowel positief als negatief veranderen. Zo kan een stijging van de gasprijs leiden tot een hoger NMDA tarief (positief op de businesscase), terwijl de heffing van energiebelasting op duurzame warmte leidt tot meer kosten (negatief voor de businesscase).

<sup>2</sup> Bronnen: Berenschot (2017), TKI Nieuw Gas (2018), ACM (2018)

### 1.3 De businesscase voor vier casussen leidt tot een beeld van de financiële haalbaarheid van waterstof in waterstofwijkcentrales

#### Doel van dit onderzoek

Bepalen van de financiële haalbaarheid, voor de warmtevoorziening van de gebouwde omgeving op waterstof middels waterstofwijkcentrales. Hierbij wordt zowel gefocust op de algemene haalbaarheid, als het bepalen van interessante kenmerken en marktsegmenten waarvoor een waterstofwijkcentrale van belang is.

#### Methodiek

Om dit doel te bereiken wordt hoog-over de businesscase opgemaakt voor vier casussen uitgewerkt. Hierdoor wordt modelmatig geschat hoe goed waterstof als transitie maatregel financieel presteert.



#### Casus 1

Collectieve voorziening gestapelde bouw



#### Casus 2

Primaire voeding van een warmtenet



#### Casus 3

Back-up voeding voor een duurzaam gevoed warmtenet met geothermie



#### Casus 4

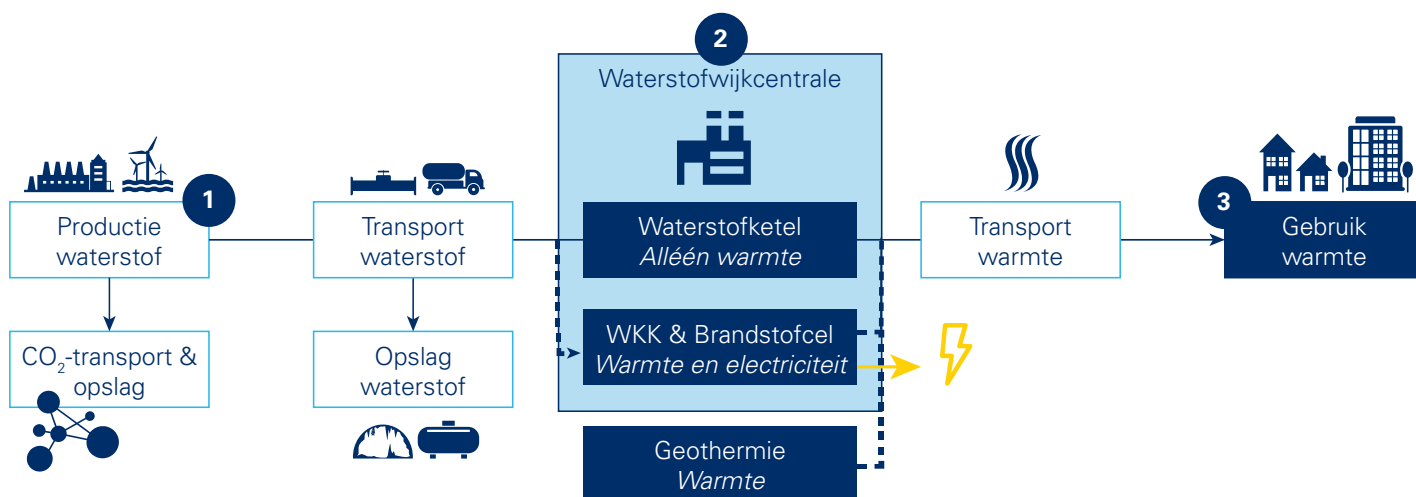
Waterstof in a: WKK (1) en b: brandstofcel

(1) Warmtekrachtkoppeling

## 2. De voorzieningsketen

De voorzieningsketen bestaat uit verschillende schakels; binnen drie schakels in de keten wordt gevarieerd voor de cases

De voorzieningsketen met een waterstofwijkcentrale:



**1** Binnen alle scenario's wordt het onderscheid gemaakt tussen blauwe en groene afhankelijkheid waterstof. In casus 1 wordt de van de kostenreductie van groene waterstof meegenomen.

**2** Binnen scenario 3 wordt geothermie als warmtebron toegevoegd. Binnen scenario 4 wordt naast warmte ook elektriciteit geproduceerd in de waterstofwijkcentrale.

**3** Binnen de scenario's wordt gevarieerd aan welk type woningen wordt geleverd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in gestapelde bouw en de isolatiegraad van woningen.

### 2.1 De productiekosten van CO<sub>2</sub>-vrije blauwe en/of groene waterstof uitgesplitst in verschillende kostencomponenten<sup>3</sup>

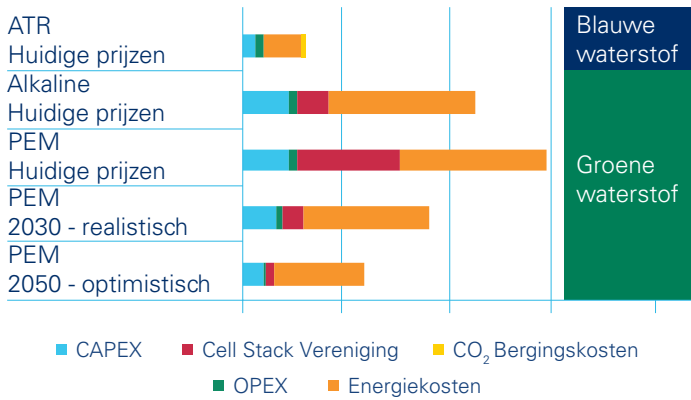
#### Productie van waterstof

In de toekomst zijn er drie bronnen van waterstof in beeld voor deze studie:

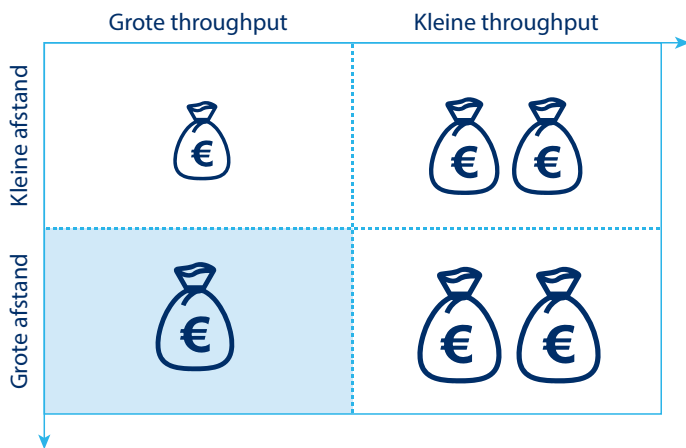
- Groene waterstof. Dit is waterstof die door elektrolyse van water wordt geproduceerd met groene windstroom. Deze waterstof is op grote schaal nu niet concurrerend, maar er worden grote kostenreducties verwacht richting 2030-2050. Aan de ene kant wordt stroom uit wind op zee (momenteel 35 - 45% v.d. kosten) steeds goedkoper. Daarnaast wordt verwacht dat PEM-installaties veel goedkoper worden, waardoor het Alkaline vervangt als best beschikbare technologie.
- Blauwe waterstof. Dit is waterstof die wordt geproduceerd door reforming van aardgas i.c.m. de afvang van CO<sub>2</sub>. Reforming is een nagenoeg uitontwikkelde technologie door toepassing in ammoniakproductie, chemie en raffinage. Door gebruik van AutoThermal Reforminginstallaties (ATR) in plaats van Steam Methane Reformers (SMR) kan 100% van de CO<sub>2</sub> worden afgevangen. Voor het bepalen van de kosten van CO<sub>2</sub>-berging is aangesloten bij die uit het Porthos project in de Rotterdamse haven.
- Internationale import. In de toekomst zou het mogelijk kunnen zijn dat waterstof geïmporteerd wordt uit andere landen. Een denkbare situatie is dat waterstof met goedkope zonnestroom in de woestijn wordt geproduceerd en over de wereld geëxporteerd wordt.

<sup>3</sup> Bronnen: NTNU (2016), Platform Geothermie (2018), ENEA (2016), FCHJU (2014), Kalavasta (2018), Berenschot (2017), Berenschot (2018a), Berenschot (2018b), RVO (2018)





## 2.2 Een waterstofinfrastructuur om waterstof op het juiste moment op de juiste plek te krijgen



Uitgangspunt: grootschalige waterstofinfrastructuur

Uitgangspunt van de studie is de beschikbaarheid van een grootschalige waterstofinfrastructuur. In een dergelijke situatie is het, met het oog op de kosten, aan te nemen dat transport leiding gebonden plaatsvindt en niet over de weg. In demonstratieprojecten zou dit anders uit kunnen pakken, hiervoor zijn in hoofdstuk zeven een aantal casussen verkent.

Belangrijk ook is dat een mogelijk toekomstig net zowel blauwe als groene waterstof kan vervoeren.

### Uitgangspunten transport van waterstof

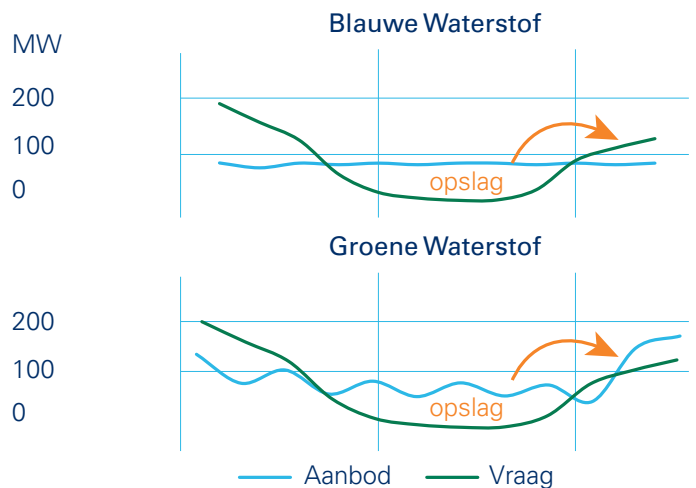
Verschillende bronnen geven aannames voor kosten van leidingtransport van waterstof:

- In het SBC factbook (2014) variëren de kosten tussen 1,70 en 8,50 €/MWh voor een throughput van 25-250 MW en leiding van 50 km.
- Een studie van Roads2Hy (2009) rapporteert 0,79 – 3.24 €/MWh voor een throughput van 100 – 1500 MW en een leiding van 250 km.

Er is uitgegaan van 1,70 €/MWh. Om 2 redenen denken wij dat dit een conservatieve schatting is:

- Het SBC factbook houdt voor de kosten van waterstoftransport geen rekening met kostenefficiëntie door gebruik te maken van een geheel leidingnetwerk in plaats van alleen een leiding van 1 bron naar 1 afnemer.
- De optie om delen van de huidige aardgasinfrastructuur te gebruiken zijn nog niet meegenomen, omdat deze lastig te kwantificeren zijn. Dit is een trend die kan leiden tot een sterke kostenreductie.

## 2.3 Door seizoensinvloeden in groene waterstofproductie, is de vraag naar opslag hier kleiner dan bij blauwe waterstofproductie



De behoefte aan opslag ontstaat door de ongelijktijdigheid van productie en vraag naar waterstof, de vraag naar waterstof is afhankelijk van het gebruik in huishoudens. Het produceren van blauwe waterstof is CAPEX gedreven en wordt daarom baseload geproduceerd, de productiecapaciteit en benodigde opslag van groene waterstof is afhankelijk van het aanbod van windenergie en de overlappende vraag.

### Seizoensopslag van waterstof

Seizoensopslag door een verhoogde warmtevraag van huishoudens is dominant in de dimensionering van opslag. In de winter is er meer groene waterstof beschikbaar dan in de zomer. Daardoor is de opslagbehoefte, met 20% tegenover 31,5% van de waterstofvraag, significant kleiner bij gebruik van groene- t.o.v. blauwe waterstof.

Vier technieken zijn beschouwd om deze opslagbehoefte in te vullen. Uiteindelijk wordt in alle casussen uitgegaan van het gebruik van zoutcavernes, omdat het de best beschikbare en kostenefficiëntste technologie is: Line packing is te klein in volume om invloed te hebben op seizoensopslag, over de geschiktheid van uitgeputte gasvelden onder de Noordzee is nog geen professionele consensus en hogedruktanks zijn minder kostenefficiënt dan opslag in zoutcavernes.

#### Uitgangspunten opslag in zoutcavernes

Opslag in zoutcavernes kost tussen de 2.54 en 3.39 €/MWh, als uitgangspunt kiezen wij de middenwaarde.<sup>4</sup>

### 2.4 Met een ketel, WKK of brandstofcel wordt waterstof omgezet in warmte en mogelijk elektriciteit

#### Warmteproductie in waterstofwjkcentrale

Binnen dit onderzoek worden drie typen installaties beschouwd voor de productie van warmte uit waterstof.

- *Waterstofketel.* In een waterstofketel wordt waterstof verbrand en alleen omgezet in warmte, equivalent aan een gewone aardgasketel.
- *Waterstof-WKK.* In een waterstof-WKK wordt waterstof verbrand en omgezet in hoofdzakelijk warmte en gedeeltelijk elektriciteit, equivalent aan aardgas-WKK's uit de glastuinbouw.
- *Brandstofcel.* In een brandstofcel wordt waterstof omgezet in hoofdzakelijk elektriciteit en gedeeltelijk restwarmte. Deze verhouding verschilt per type brandstofcel.

De waterstofketel vraagt de laagste investeringen. Daarom is deze als uitgangspunt gekozen voor alleen warmtevoorziening en leent het zich goed als back-up met weinig draaiuren. De WKK en brandstofcel zijn duurder in aanschaf. In de laatste casus wordt onderzocht of deze meerkosten opwegen tegen de opbrengst van elektriciteit, welke op systeem niveau logischerwijs dan ook wordt ingezet in warmtepompen elders.

	KETEL	WKK	BRANDSTOFCEL
CAPEX [€/MW]	5.400	600.000	2.865.000
Vaste O&M [€/MW]	2000	11.300	42.975
Variabele O&M [€/uur]	5	16	-
Efficiëntie E	-	43%	32%
Efficiëntie W	93,4%	40%	40%
Efficiëntie totaal	93,4%	93%	72%



### 2.5 Warmtedistributie en NMDA

#### Warmtedistributie

Uitgangspunt is dat warmte op een centrale plaats in de wijk wordt geproduceerd en naar woningen wordt getransporteerd met een warmtenet. Behalve de bron van warmte, is dit warmtenet niet anders dan reeds gerealiseerde stadsverwarmingsprojecten. Daarom sluiten wij voor de kosten van de realisatie van een warmtenet aan bij ervaringsgetallen uit de praktijk. Allerhande factoren hebben invloed op deze kosten, zoals het type ondergrond en hoe ruimtelijk een woonwijk is opgezet.

WARMTENET NAAR:	LAAGBOUW
Investering per woning	6.000 euro
Levensduur	30 jaar
Warmteverliezen	25%

#### Waardering volgens NMDA-principe

Warmte wordt in dit project gewaardeerd volgens het niet-meer-dan-anders (NMDA) principe. Rationale is dat een eindgebruiker bij warmtelevering niet meer mag betalen dan bij verwarming op aardgas. De normering bestaat uit 3 belangrijke componenten:





- Een leveringstarief voor warmte. Deze verschilt voor individuele aansluitingen en grotere collectieve aansluitingen, omdat grote collectieve aansluitingen in een gunstiger staffel voor aardgas zitten. De tarieven zijn 19,88 €/GJ voor individuele aansluitingen en 15,89 €/GJ voor collectieve aansluitingen (2017).
- Een jaarlijks vastrecht voor een warmteaansluiting, equivalent aan het vastrecht wat betaald wordt voor een gasaansluiting. Dit is een vast tarief van 255,81 €/aansluiting.

<sup>4</sup> Bronnen: SBC Factbook (2014); Quintel (2018), ECN (2015)



- Een eenmalige aansluitbijdrage voor de realisatie van een warmteaansluiting op zowel een bestaand als een nieuw warmtenet, gaan wij uit van 4.000 €/aansluiting. Deze bijdrage varieert in praktijk tussen de 2.000 en 8.000 euro per aansluiting.<sup>5</sup>

## 2.6 De vier casussen ontstaan door verschillende uitgangspunten in waterstofproductie, de warmteproductie en warmtevraag

				
KETENSTAP	CASUS 1	CASUS 2	CASUS 3	CASUS 4
Productie waterstof	Blauw & groen verschillende zichtjaren		Blauw & groen	
Opslag waterstof			Zoutcavernes	
Transport waterstof	Grootschalig leidingnet			
Warmteproductie		Waterstofketel (wijkcentrale)	Geothermie, WP, buffer en waterstofpiekketel	Waterstof-WKK of brandstofcel i.c.m. waterstofpiekketel
Transport warmte	Geen	Fijnmazig net naar individuele woningen (eenmalig aansluittarief 4.000 € per woning)		
Vraag warmte	100 appartementen in de gestapelde bouw	Redelijk- en slecht geïsoleerde woonwijken, label C en F (3500 Rijtjeshuizen, 1500 2-onder-1 kap woningen)		
Vermeden piekvraag t.o.v. 'all electric' oplossing	200 KW (voor 100 appartementen)	8 - 15 MW, respectievelijk label C en F (bij 3500 Rijtjeshuizen, 1500 2-onder-1 kap woningen)		

<sup>5</sup> Bronnen: Platform Geothermie (2018), ACM (2018), CBS Statline (2018)

# 3. Casus 1 – Voorziening collectieve gebouwde omgeving

## 3.1 Voorziening van 100 appartementen; variatie in typen waterstof

Rationale: collectieve voorziening

Deze casus beschouwt een situatie waarin warmte wordt geleverd aan hoogbouw met een collectieve voorziening.

Voordeel is dat de waterstof tot in het ketelhuis van het gebouw wordt gebracht en er geen additionele warmte-infrastructuur nodig is.

KETENSTAP	UITGANGSPUNT
Productie waterstof	Blauwe waterstof Huidige prijzen Groene waterstof: Huidige prijzen 2030 realistisch 2050 optimistisch
Warmteproductie	Waterstofketel (730 kW)
Vraag warmte	100 appartementen met collectieve aansluiting

Variatie: huidige en toekomstige waterstofproductie

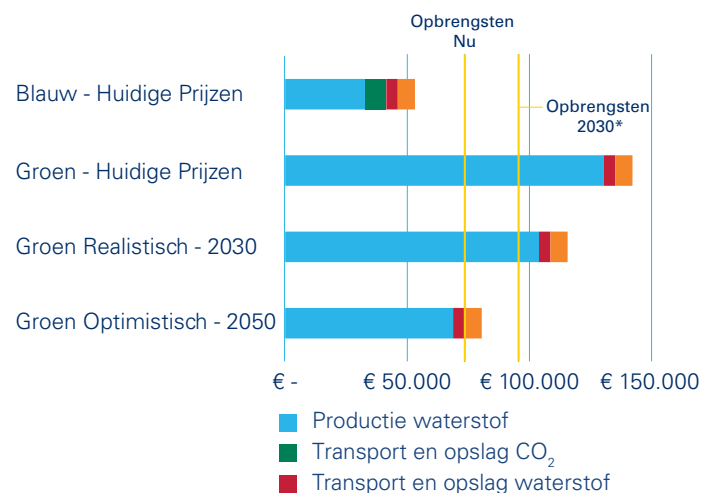
In deze casus zijn runs gedaan voor verschillende typen waterstof, om de afhankelijkheid van leercurves te laten zien. Aan de ene kant wordt blauwe waterstof gesimuleerd, en aan de andere kant groene waterstof met verschillende leercurves. Dit komt tot uiting in de productiekosten van waterstof.



Energetische ketenstappen voor blauwe waterstof tegen huidige prijzen: omzetverlies tijdens waterstofproductie is aanzienlijk aandeel.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Bronnen: RVO (2011)

## 3.2 Er is een positieve businesscase voor blauwe waterstof en groene waterstof in 2050



\* Deze belastingverhoging op aardgas werd voorgesteld in het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (17 juli 2018), en is in dit rapport als rekenmodel overgenomen. In de recente regeringsreactie (5 oktober 2018) is dit voorstel sterk afgezwakt.

Bronnen: ACM (2018), CBS

Resultaten businesscase - casus 1

Het volgende valt op aan de businesscase in casus 1:

- De productiekosten van waterstof maken een groot deel van de totale ketenkosten uit. Dit komt doordat, met het gebruik van een waterstofketel, geen andere kapitaalintensieve installaties zijn geïnstalleerd.
- Het gebruik van blauwe waterstof leidt voor het huidige NMDA tarief al tot een positieve businesscase.
- Deze positieve businesscases komen onder meer doordat er momenteel geen energiebelasting wordt gegeven op duurzame warmte uit waterstof.
- De toekomstige opbrengsten voor warmte worden sterk beïnvloed door de voorgestelde energiebelastingverhoging waardoor de businesscases positiever uitvallen.
- In het geval van zeer sterke kostenreductie voor groene waterstof is er een positieve businesscase, indien de voorgestelde energiebelasting doorgevoerd wordt.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Bronnen: ACM (2018), CBS

### 3.3 De waterstofwijkcentrale leent zich goed voor warmtevoorziening van collectieve gebouwen

	<b>BLAUW NU</b>	<b>GROEN NU</b>	<b>GROEN 2030</b>	<b>GROEN 2050</b>
CO <sub>2</sub> -opslag nodig	0.23 kton per jaar	-	-	-
Waterstof productiekosten	€ 1.16 per kg	€ 4.51 per kg	€ 3.59 per kg	€ 2.37 per kg
Integrale Kostprijs*	€ 14.75 per GJ	€ 39.50 per GJ	€ 32.08 per GJ	€ 22.31 per GJ
Rendement (ROI) - Huidig	26%	-98%	-61%	-12%
Rendement (ROI) – 2030 o.b.v. voorgestelde belasting verhoging klimaatakkoord	45%	-48%	-20%	17%

#### Observaties

Uit deze casus komt naar voren dat er een positieve businesscase is voor de voorziening van warmte bij gestapelde bouw in het geval van blauwe waterstofproductie. Voor groene waterstof ligt deze businesscase alleen in het eind perspectief in combinatie met een gestegen gasprijs (referentie).

# 4. Casus 2 – Primaire voeding warmtenet

## 4.1 Voorziening van 5000 woningen; variatie in mate van isolatie

Rationale: primaire voeding van een warmtenet  
Deze casus beschouwt een situatie waarin een warmtenet volledig gevoed wordt met een op waterstof gestookte ketel. Het gaat hier om individuele woningen waar ook de warmtedistributie dient te worden geregeld.

KETENSTAP	UITGANSPUNTEN
Productie waterstof	Blauwe waterstof Huidige prijzen Groene waterstof: 2030 realistisch
Warmteproductie	Waterstofketel (28 MW)
Vraag warmte	3500 rijtjeswoningen en 1500 2-onder-1-kaps. 2 typen isolatie: - Label C isolatie - Label F isolatie

Variatie: mate van isolatie

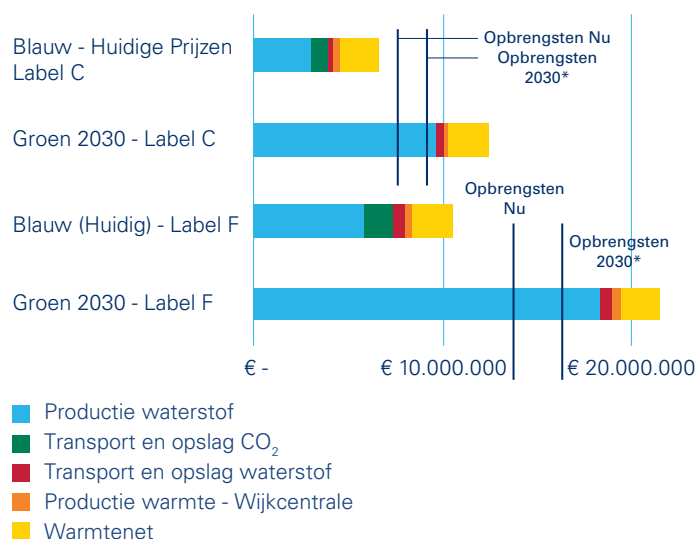
In deze casus doen we runs voor verschillende mate van isolatie. Dit representeert het type wijk wat wordt aangesloten; oude stadscentra zijn over het algemeen zeer slecht geïsoleerd (enkelsteens), terwijl naoorlogse dorpen in de regel beter geïsoleerd zijn. De energetische ketenstappen zijn vergelijkbaar voor groene en blauwe waterstof.



Energetische ketenstappen voor blauwe waterstof tegen huidige prijzen: omzetverlies tijdens waterstofproductie en transportverlies over het warmtenet beslaan een significant aandeel.<sup>8</sup>

## 4.2 Minder goed geïsoleerde woningen hebben een betere businesscase, omdat er meer warmte per aansluiting geleverd kan worden

Resultaten businesscase casus 2



\* Deze belastingverhoging op aardgas werd voorgesteld in het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (17 juli 2018), en is in dit rapport als rekenmodel overgenomen. In de recente regeringsreactie (5 oktober 2018) is dit voorstel sterk afgezwakt.

Het volgende valt op aan de businesscase in casus 2:

- Kosten per gigajoule zijn lager naarmate de warmtevraag per woning toeneemt (verschil label C en F).
- Naast de waterstofproductiekosten, zijn de meerkosten van een warmtenet significant in vergelijking met de overige kosten. Het maakt in de casus 11 - 33% van de kosten uit.
- Volgens de opbrengsten komt blauwe waterstof tot een case wanneer kosten voor een warmtenet worden meegenomen. Deze positieve businesscase komt onder meer doordat er momenteel geen energiebelasting wordt geheven op duurzame warmte uit waterstof. Voor de situatie met groene waterstof is geen positieve businesscase.
- Kanttekening is dat wij uitgaan van eenmalige aansluitkosten: 4.000 €/aansluiting op een te realiseren warmtenet. Dit naar aanleiding van marktconsultatie met bestaande warmtenet exploitanten.

## Conclusies en duiding

	<b>BLAUW (HUIDIG) LABEL C</b>	<b>GROEN (2030) LABEL C</b>	<b>BLAUW (HUIDIG) LABEL F</b>	<b>GROEN (2030) LABEL F</b>
CO <sub>2</sub> -opslag nodig	22 kton per jaar	-	42 kton per jaar	-
Waterstof productiekosten	€ 1.16 per kg	€ 3.59 per kg	€ 1.16 per kg	€ 3.59 per kg
Integrale Kostprijs*	€ 26.47 per GJ	€ 49.54 per GJ	€ 22.05 per GJ	€ 45.12 per GJ
Rendement (ROI) - Huidig	14%	-61%	14%	-76%
Rendement (ROI) – 2030 o.b.v. voorgestelde belasting verhoging klimaatakkoord	30%	-32%	32%	-39%

### Observaties

Deze voorbeeld casus laat alleen een gunstig rendement zien bij de inzet van blauwe waterstof, groene waterstofproductie is ook in 2030 vooralsnog te kostbaar. Daarnaast is zoals te verwachten de integrale kostprijs voor warmte per GJ bij slechter geïsoleerde woningen lager. Dit zou wellicht gunstig zijn voor oude binnensteden waar isolatie van monumentale panden moeizaam en kostbaar is, wat een 'all electric' oplossing veelal moeilijk inpasbaar maakt. Aan de andere kant is de aanleg van een warmtenet in oude binnensteden wellicht ingrijpender dan op andere locaties.

# 5. Casus 3 – Geothermie met waterstof Piekvoorziening warmtenet

## 5.1 Voorziening van 5000 woningen; baseload geothermie in combinatie met een waterstofpieksetel

Rationale: geothermie als hoofdbron met waterstof als piekbron

Deze casus beschouwt dezelfde woningsituatie als casus 2, maar nu waarin een warmtenet wordt gevoed met een geothermiebron, een warmtepomp, een buffer en een op waterstof gestookte ketel als piekbron.

KETENSTAP	UITGANSPUNTEN
Productie waterstof	Blauwe waterstof, huidige prijzen Groene waterstof: 2030 realistisch
Warmte-productie	Geothermie (11 - 14 MW), warmtepomp (0,5 MWe, COP 3) en Waterstofketel (38 MW) (ook back-up)
Vraag warmte	3500 rijtjeswoningen en 1500 2-onder-1-kaps. 2 typen isolatie: - Label C isolatie - Label F isolatie

Variatie: mate van isolatie

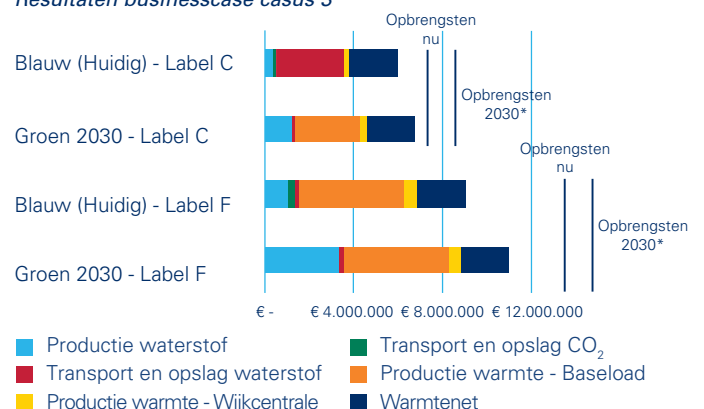
In deze casus doen we runs voor verschillende mate van isolatie. Dit representeert het type wijk wat wordt aangesloten; oude stadscentra zijn over het algemeen zeer slecht geïsoleerd (enkelsteens), terwijl naoorlogse dorpen in de regel iets beter geïsoleerd zijn.



Energetische ketenstappen voor blauwe waterstof tegen huidige prijzen: zichtbaar is de baseload geothermie ten opzichte van waterstof. Transportverlies over het warmtenet heeft een significant aandeel.

## 5.2 Positieve businesscases door combinatie baseload geothermie en piekvoorziening waterstof

Resultaten businesscase casus 3



\* Deze belastingverhoging op aardgas werd voorgesteld in het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (17 juli 2018), en is in dit rapport als rekenmodel overgenomen. In de recente regeringsreactie (5 oktober 2018) is dit voorstel sterk afgezwakt.

## Resultaten businesscase - casus 3

Het volgende valt op aan de businesscase in casus 3:

- In deze casus lijkt er in alle situaties een goede businesscase te zijn. Dit komt doordat waterstof alleen de piekvraag dekt.
- De geothermie i.c.m. een warmtepomp voor extra uitkoeling en de aangenomen thermische traagheid in het systeem als buffer biedt een degelijke businesscase. Kanttekening hierbij is dat de uiteindelijke geothermie opbrengst onzeker kan zijn.
- Deze case geeft ook voor groene waterstof een positieve case, dit komt doordat de baseload hier gegarandeerd is en waterstof alleen de piekvraag invult. Hiermee kan een volledig CO<sub>2</sub>-neutraal eindbeeld worden geschetst waarin er geen piekketel op aardgas meer nodig is.

## Conclusies en duiding

	<b>BLAUW (HUIDIG) LABEL C</b>	<b>GROEN (2030) LABEL C</b>	<b>BLAUW (HUIDIG) LABEL F</b>	<b>GROEN (2030) LABEL F</b>
CO <sub>2</sub> -opslag nodig	3 kton per jaar	-	8 kton per jaar	-
Waterstof productiekosten	€ 1.16 per kg	€ 3.59 per kg	€ 1.16 per kg	€ 3.59 per kg
Integrale Kostprijs*	€ 23.80 per GJ	€ 26.78 per GJ	€ 18.87 per GJ	€ 23.02 per GJ
Rendement (ROI) - Huidig	23%	13%	26%	10%
Rendement (ROI) – 2030 o.b.v. voorgestelde belastingverhoging klimaatakkoord	37%	29%	42%	29%

## Observaties

De businesscases zijn positief omdat waterstof alleen de piekvraag dekt. Door het inzetten van een baseload technologie (niet draaiend op waterstof), is het mogelijk om gaspiekketels door waterstofpiekketels te vervangen.

# 6. Casus 4 – Synergie waterstof-WKK en warmtepomp

## 6.1 Een WKK of brandstofcel en piekkel draaiend op uitsluitend waterstof

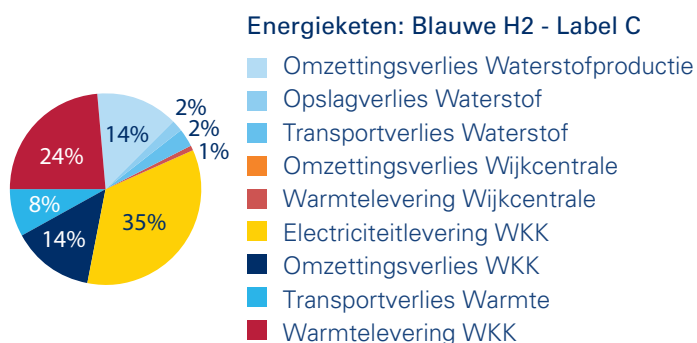
Rationale: WKK of brandstofcel als hoofdbron met een waterstofketel als piekbron

Deze casus beschouwt dezelfde woningsituatie als casus 2 en 3, maar nu is de baseload een WKK of brandstofcel die samen met een waterstofketel de warmtevraag invult, volledig gebaseerd op waterstof.

KETENSTAP	UITGANSPUNTEN
Productie waterstof	Blauwe waterstof Huidige prijzen Groene waterstof: 2030 realistisch
Warmteproductie	WKK (22MW) of Brandstofcel (25MW), Waterstofketel (38MW)
Vraag warmte	3500 rijtjeswoningen en 1500 2-onder-1-kaps met 2 typen isolatie: Label C en Label F

Variatie: mate van isolatie

In deze casus doen we runs voor verschillende maten van isolatie. Dit representeert het type wijk wat wordt aangesloten; oude stadscentra zijn over het algemeen zeer slecht geïsoleerd (enkelsteens), terwijl naoorlogse dorpen in de regel iets beter geïsoleerd zijn.

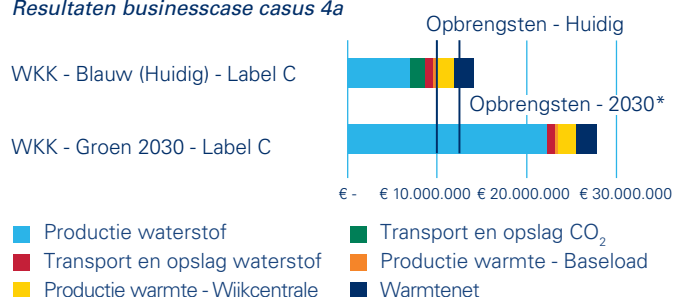


Energetische ketenstappen in de WKK laat zien dat naast een warmteleveringsdeel ook een zeer significant elektrische aandeel aanwezig is. Deze kan bijvoorbeeld tegelijkertijd weer gebruikt worden in (hybride) warmtepompen.<sup>9</sup>

## 6.2 De WKK met H2 piekkel op waterstof levert geen goede businesscase

Resultaten businesscase – casus 4a

Resultaten businesscase casus 4a



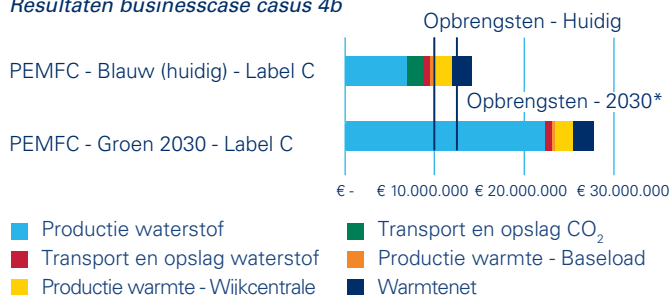
\* Deze belastingverhoging op aardgas werd voorgesteld in het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (17 juli 2018), en is in dit rapport als rekenmodel overgenomen. In de recente regeringsreactie (5 oktober 2018) is dit voorstel sterk afgezwakt.

- De WKK en waterstofpiekkel draaien in deze casus beiden op waterstof, waardoor de kosten ook voor deze technologieën hoog uitvallen. Eén van de oorzaken zijn de in verhouding beperkte baten uit elektriciteit, dit komt door een kleine spark spread.



### 6.3 Door verwachte kostendaling in PEM Fuel Cells komt een businesscase in de buurt

#### Resultaten businesscase casus 4b



\* Deze belastingverhoging op aardgas werd voorgesteld in het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (17 juli 2018), en is in dit rapport als rekenmodel overgenomen. In de recente regeringsreactie (5 oktober 2018) is dit voorstel sterk afgezwakt.

#### Resultaten businesscase – casus 4b

- De w (PEMFC) is een veelbelovende brandstofcel omdat er nog significante kostenreducties in de CAPEX, een hogere levensduur van de cellen en toename in de elektrische efficiëntie te behalen zijn. Het belooft een goede concurrent van de WKK (casus 4a) te worden.
- Echter, de businesscase blijkt ook voor de PEMFC in combinatie met een waterstofpiekketel lastig te zijn, vooral met groene waterstof tegen prijzen uit 2030 komen we niet in de buurt van een rendabele situatie.
- Wel zien we dat er perspectief is voor blauwe waterstof met de gas referentie voor 2030.

#### Conclusies en duiding

	WKK BLAUW (HUIDIG) LABEL C	WKK GROEN 2030 LABEL C	PEMFC BLAUW (HUIDIG) LABEL C	PEMFC GROEN 2030 LABEL C
CO <sub>2</sub> -opslag nodig	51 kton per jaar	-	51 kton per jaar	-
Waterstof productiekosten	€ 1.16 per kg	€ 3.59 per kg	€ 1.16 per kg	€ 3.59 per kg
Integrale Kostprijs*	€ 23.59 per GJ	€ 45.75 per GJ	€ 20.92 per GJ	€ 41.16 per GJ
Rendement (ROI) - Huidig	-21%	-134%	-9%	-115%
Rendement (ROI) – 2030 o.b.v. voorgestelde belasting verhoging klimaatakkoord	-5%	-104%	4%	-89%

#### Observaties

In dit geval wordt ook de baseload voorziening, de WKK (of brandstofcel), gevoed met waterstof, waardoor de kosten voor baseload al een hoog aandeel hebben door de productiekosten van waterstof. Hierdoor wordt duidelijk dat de rol van waterstof het meest gunstig is op piekmomenten. Eén van de oorzaken zijn de in verhouding beperkte baten uit elektriciteit, dit komt door een kleine spark spread.

# 7. Verkenning praktijkcasussen en conclusies

## 7.1 Wat is er nu al mogelijk?

Voor deze studie zijn een viertal algemene situaties uitgewerkt.

In al deze situaties is aangenomen dat er een grootschalige infrastructuur inclusief opslag voor waterstof aanwezig is. Transportkosten zijn ook voor een dergelijke schaalgrootte meegenomen. Deze aannames zorgen er echter voor dat de resultaten op dit vlak enigszins ver liggen van de huidige werkelijkheid. Daarom bestaat de behoefte om te kijken of er nu al locaties zijn waar een dergelijke waterstofwijkcentrale mogelijk is, waarbij gekeken wordt naar de huidige situatie inclusief transport en opslag op kleinere schaal. Hierdoor wordt het makkelijker voor partijen om hieruit lering te trekken voor concrete pilots en demonstratieprojecten.

In dit hoofdstuk onderzoeken we de volgende vragen:

- Is er nu al perspectief op demonstratie/pilot projecten zonder dat er nog een grootschalige waterstofinfrastructuur aanwezig is.
- Wat zouden mogelijke toekomstpaden van een grootschalige waterstofinfrastructuur kunnen zijn?

TYPE NET	MOGELIJKE PRAKTIJK-CASUSSEN:	WATERSTOF AANVOER OPSLAG:
Nieuw	<b>Zwijndrecht</b> Warmtevraag: 12.500 GJ Aansluitingen: 400 Installatie: waterstofketel	Transport van waterstof met bestaand net Airproducts; opslag waterstof in tanks 
Nieuw	<b>Papendrecht/ Sliedrecht</b> Warmtevraag: 240.000 Aansluitingen: 17.539 Installatie: geothermie, WP, buffer, waterstofpiekketel	Transport van waterstof met bestaand net Airproducts; opslag waterstof in tanks 
Bestaand	<b>Zaanstad</b> Warmtevraag: 35.000 GJ Aansluitingen: 1.180 Installatie: waterstofketel	Transport van waterstof met vrachtwagens; Opslag waterstof in zoutcaverne Groningen 
Bestaand	<b>Barendrecht</b> Warmtevraag: 45000 GJ Aansluitingen: 900** Installatie: WKK/waterstofketel	Transport van waterstof met bestaand net Airproducts; opslag in tanks 

\* Bovenstaande getallen en casussen zijn conceptueel en op basis van kengetallen.

## 7.2 Uitgangspunten

Voor de praktijkcasussen is uitgegaan van de warmtevraag karakteristiek van die locatie, hier zijn de juiste parameters bij gematched. Daarnaast hebben we aannames gedaan over de voordeligste combinatie van waterstoftransport en opslag afhankelijk van nabij gelegen infrastructuur. Het warmteprofiel is op basis van dezelfde geanonimiseerde praktijkprofielen zoals verkregen van HVC. Deze profielen zijn geschaald naar de warmtevraag. De kosten voor het eventueel aan te leggen warmtenet komen overeen met de andere casussen, op basis van kentallen en het aantal aansluitingen.

De uitkomsten hebben daarmee een indicatief/verkenkend karakter voor een mogelijke businesscase. Om uiteindelijk tot een echte businesscase te komen zal locatie specifieke detailinformatie noodzakelijk zijn voor betere inschatting voor de aanleg van verschillende assets. Daarnaast is er nu geen partij die al waterstof produceert i.c.m. afvang en opslag van CO<sub>2</sub>. Alle casussen zijn op basis van blauwe waterstof bij huidige prijzen voor installaties. Zie verder specificaties in de volgende tabel.

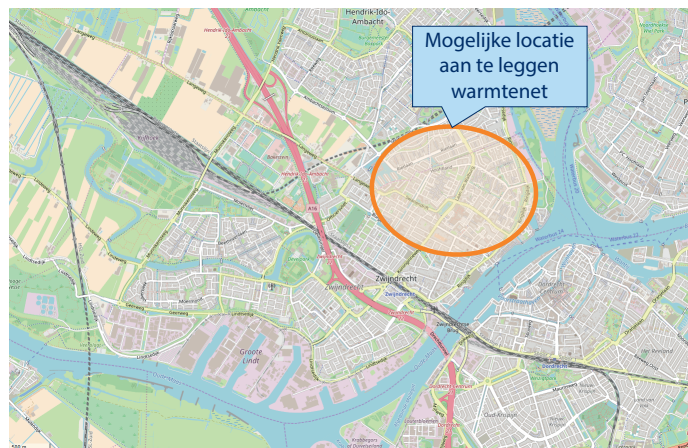
KETENSTAP	ZWIJDRECHT	PAPENDRECHT/ SLIEDRECHT	ZAA NSTAD (SAENDELFT)	BARENDRECHT
Productie waterstof			Blauw	
Opslag waterstof	Tanks	Zoutcavernes	Tanks	Tanks
Transport waterstof	Bestaand lokale leiding	Vrachtwagens	Bestaand lokale leiding	Bestaand lokale leiding
Warmteproductie	Waterstofketel	Geothermie, WP, buffer en waterstofpiekkel	Waterstofketel	Waterstof-WKK i.c.m. waterstofpiekkel
Transport warmte	Fijnmazig net naar individuele woningen (eenmalig aansluittarief 4.000 € per woning)			
Vraag warmte	12.500 GJ	240.000 GJ	35.000 GJ	45.000 GJ

## 7.3 Nieuw aan te leggen warmtenet Zwijndrecht

### Zwijndrecht

Warmtevraag: 12.500 GJ  
Aansluitingen: 400  
Installatie: waterstofketel

Transport van waterstof met  
bestaand net Airproducts  
+1 km; opslag waterstof in tanks



Integrale kosten: 36.74 €/GJ

Opbrengsten op basis van NMDA : 37.46 €/GJ

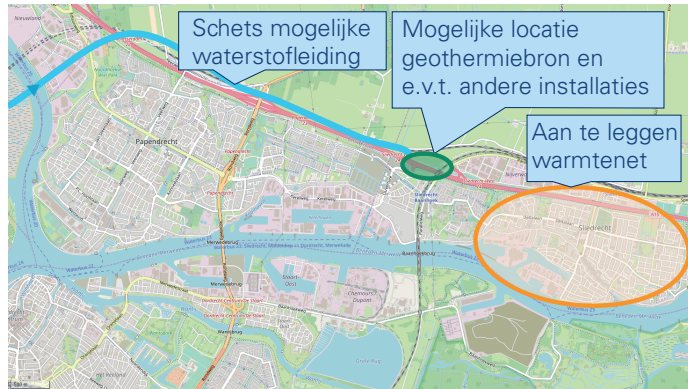


Deze casus laat zien dat wanneer een nieuw aan te leggen warmtenet nabij een waterstofinfrastructuur gesitueerd is dit nipt een businesscase kan bieden. (hier is wel 4.000 € eenmalige aansluitbijdrage gerekend). Hiermee kunnen warmtenetten bijvoorbeeld in volloop situaties al CO<sub>2</sub>-neutraal worden aangelegd.

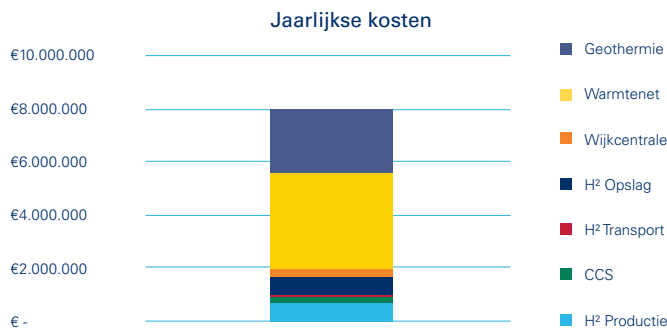
### 7.4 Nieuw aan te leggen warmtenet Papendrecht/Sliedrecht

**Papendrecht/Sliedrecht**  
 Warmtevraag: ~240.000 GJ  
 Aansluitingen: ~8400  
 Installatie: geothermie WP, buffer, waterstofpiekketel

Transport van waterstof met  
 bestaand net Airproducts;  
 +- 11 km extra aan te leggen.  
 Opslag waterstof in tanks



Integrale kosten: 32.02 €/GJ  
 Opbrengsten op basis van NMDA : 39.13 €/GJ

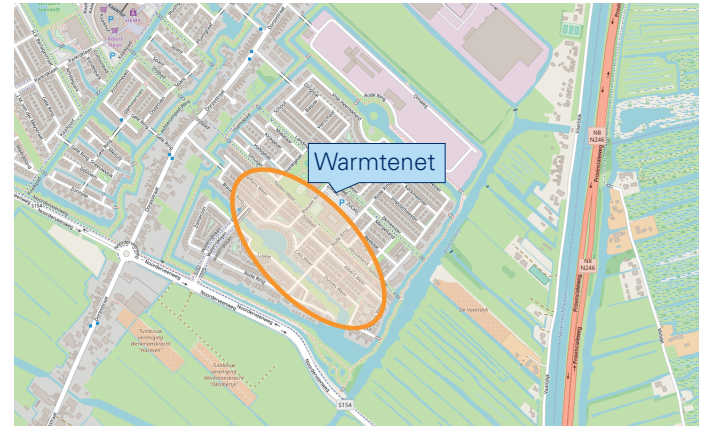


Deze casus toont dat een waterstofpiekketel nu al kan helpen bij het voorzien in een CO<sub>2</sub>-neutraal eindbeeld. De piekketel verbeterd de businesscase niet maar integraal is het net rendabel. Een beperkt aan te leggen extra infrastructuur geeft relatief lage meerkosten.

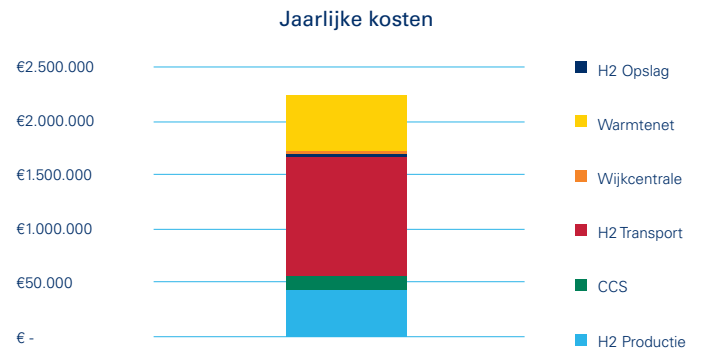
### 7.5 Vervanging warmtebron bestaand warmtenet Zaanstad

**Zaanstad (Saendelft) - HVC**  
 Warmtevraag: 35.000 GJ  
 Aansluitingen: 1.180  
 Installatie: waterstofketel

Transport van waterstof met  
 vrachtwagens; Opslag waterstof  
 in zoutcaverne



Kosten: 63.39 €/GJ  
 Opbrengsten: 38.42 €/GJ



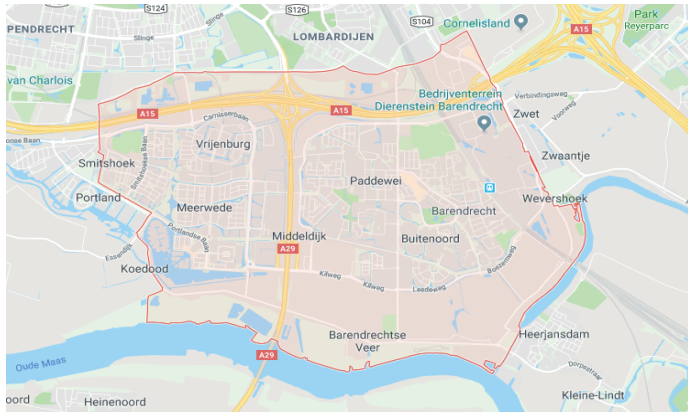
Deze praktijkcasus laat zien dat voor bestaande warmtenetten die ongunstig liggen voor het aansluiten op bestaande waterstofinfrastructuur, de businesscase nu nog niet te maken is. Hiermee is waterstof hier geen direct betaalbare optie voor verduurzaming. Transport over de weg is vooralsnog te kostbaar. Wanneer er een grootschalige waterstofinfrastructuur zou zijn biedt deze casus wel perspectief.

## 7.6 Vervanging warmtebron bestaand warmtenet Barendrecht

### Barendrecht-Eneco

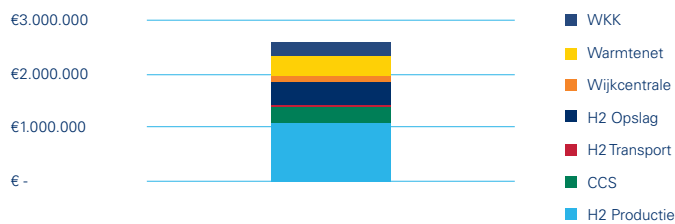
Warmtevraag: 45.000 GJ  
Aansluitingen: 900 (ook wat industrie)  
Installatie: waterstof, WKK, waterstofketel

Transport van waterstof met bestaand net Airproducts; +/- 2,5 km extra aan te leggen  
Opslag waterstof in tanks



Kosten: 27,23 €/GJ  
Opbrengsten: 20,76 €/GJ

Jaarlijkse kosten



Door de volledige gasgestookte WKK en ketelvoorziening over te zetten op waterstof komt de businesscase niet goed uit. De productiekosten van (blauwe) waterstof hebben hier een significant aandeel in. Daarnaast levert elektriciteit in verhouding weinig op vanwege een onvoordelige ratio tussen de kosten voor waterstof en de opbrengsten van elektriciteit.

### Conclusie casussen

- Een bestaand/nabij waterstofnetwerk kan de businesscase haalbaar maken.
- Een warmtenet volledig draaiend op een waterstofketel kan wellicht net aan een betaalbare verduurzaming bieden t.o.v. de huidige gasreferentie.
- Een waterstofpiekketel met een gegarandeerde baseload, niet draaiend op waterstof zoals geothermie, kan nu al helpen bij het voorzien in een CO<sub>2</sub>-neutraal eindbeeld. Echter, door de hoge onzekerheid in de daadwerkelijke kosten en baten van geothermie moet deze conclusie met voorzichtigheid genomen worden.
- Opslag in tanks onder hoge druk en een positieve businesscase is mogelijk.

- In de praktijk is een waterstofinfrastructuur over de weg in hoge druk tanks met behulp van vrachtwagentransport een dure aangelegenheid.
- Door de volledige gasgestookte WKK en ketel voorziening over te zetten op waterstof komt de businesscase niet goed uit. De productiekosten van (blauw) waterstof hebben hier een significant aandeel in.

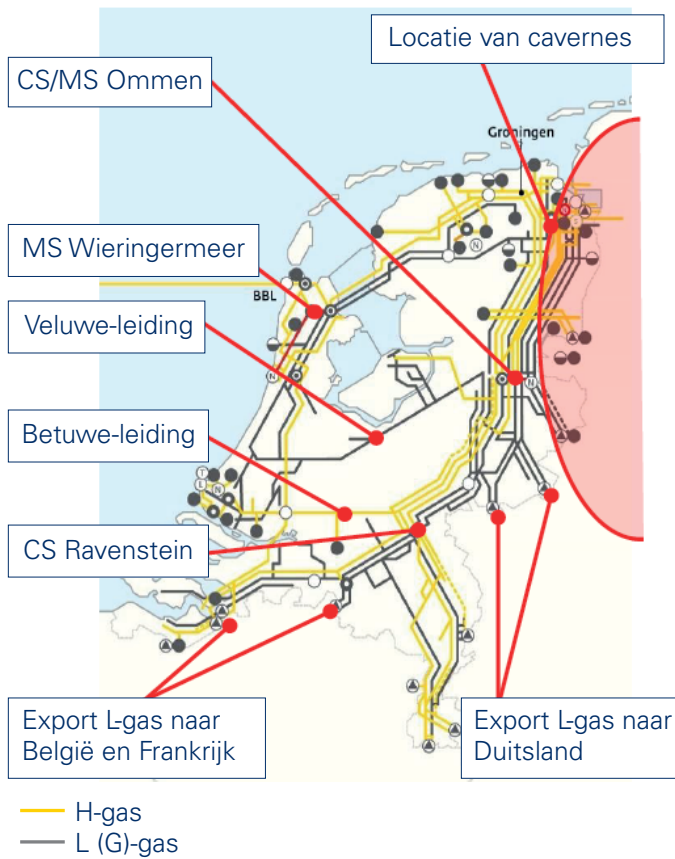
De verkenning biedt perspectief. Vervolgstappen moeten zitten in het in samenwerking met stakeholders verder onderzoeken van mogelijke praktijkcases. Hierbij is het van belang de juiste stakeholders te betrekken waarbij vooral een aanbieder van blauwe waterstof en CO<sub>2</sub>-opslag nu nog mist. Warmtebedrijven staan open voor dit dialoog maar zijn op zoek naar iemand die kan voorzien in de (blauwe dan wel groene) waterstof.

## 7.7 Van aardgasnet naar waterstofnet, wat is daar voor nodig?

Het huidige aardgasnet kent een *G-gas*, *L-gas* en een *H-gas* variant. Het *G-gas* is afkomstig uit het Groninger gasveld, dit gas wordt voornamelijk verbruikt door woningen, gebouwen en tuinders. Het *H-gas* met een hoogcalorische waarde wordt vooral in de industrie en energiesector gebruikt. Door deze splitsing zijn er ook twee afzonderlijke transportnetten (zie figuur rechts). Deze dubbele uitrol biedt extra perspectief voor het mogelijk deels omzetten van het net naar een waterstofnet. In technische zin is op netniveau het meest impactvol het aanpassen van compressoren. Om het net op druk te brengen worden momenteel zogenaamde centrifugaal compressoren gebruikt welke ongeschikt zijn voor waterstof, deze zouden vervangen moeten worden door zuiger-compressoren. Verder moet het net op een andere manier geopereerd worden en zijn er nog te overzien andere aanpassingen van leidingen, een omschakeling is technisch waarschijnlijk goed mogelijk.

In de tijd neemt de vraag naar het *G-gas* en de export van *L-gas* af, dit biedt daarmee kansen voor het (gedeeltelijk) omzetten van het *G-gas*net dan wel *L-gas*net naar een waterstofnet. Afhankelijk van de mate en snelheid van het ontstaan van waterstofvraag/productie zijn er verschillende scenario's voor een switch van aardgas naar waterstof denkbaar.





DNV GL, Verkenning waterstofinfrastructuur (2017)

### 7.8 Van aardgasnet naar waterstofnet, mogelijke doorgroeipaden

Nieuwe vraag naar waterstof kan voortkomen uit:

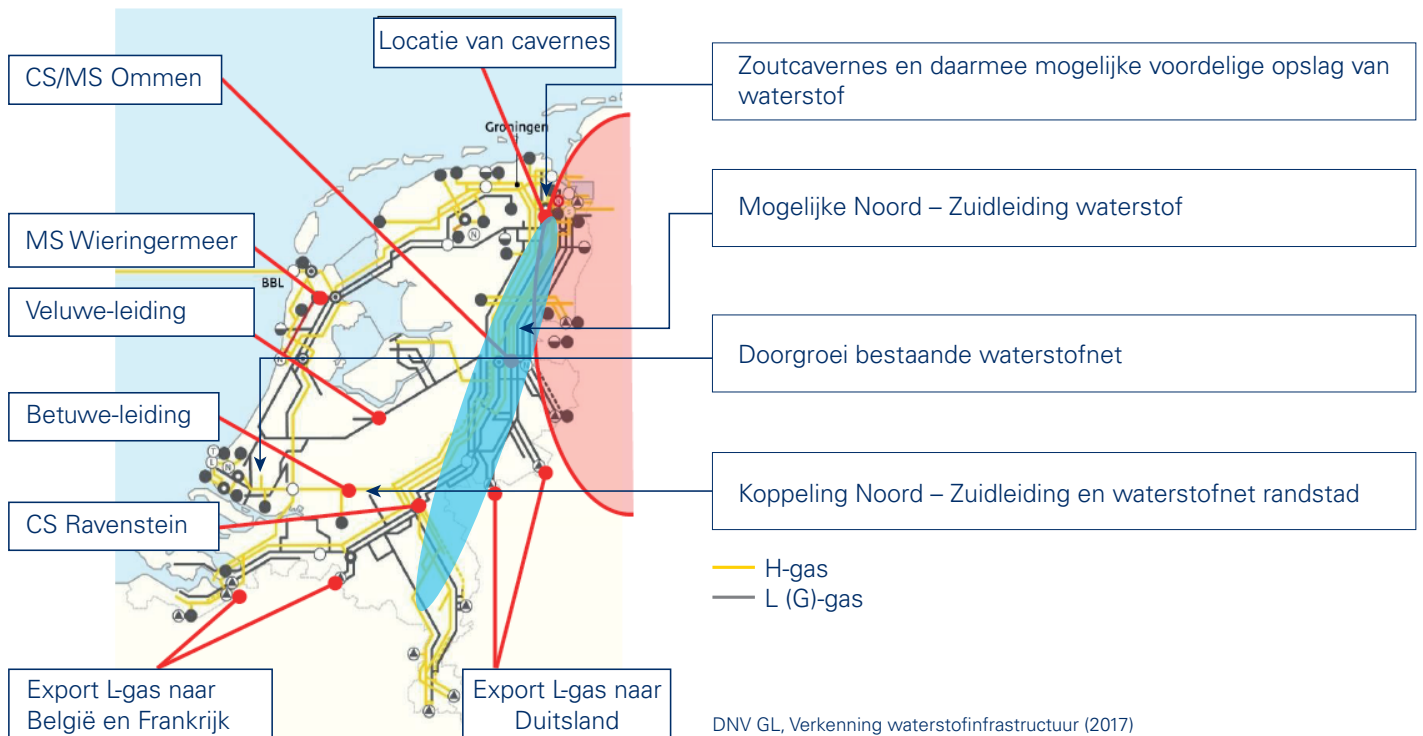
- Kleine industrie en tuinders die gebruik maken van G-gas
- Grote industrie die nu gebruik maakt van H-gas
- Warmtenetten gebouwde omgeving met waterstof
- Verkeer
- Switch L-gas naar H-gas

Voor elk van deze sectoren betekent het een transitie van aardgas naar waterstof met technische implicaties en omvangrijke investeringen/projecten.

#### Geleidelijke ingroei van waterstof door bijmenging.

Waterstof kan tot op bepaalde hoogte worden bijgemengd in het net afhankelijk van de ruimte die de gaskwaliteit biedt. Hiermee kan de huidige gasmix een lagere emissiefactor krijgen maar wordt nog niet voorzien in een volledig waterstofnet. Voor sommige partijen kan dit echter problematisch zijn vooral wanneer gasmotoren op zeer nauwkeurige specificaties draaien.

### 7.9 Mogelijk scenario: Noord – Zuidleiding en ingroei vanuit randstad



DNV GL, Verkenning waterstofinfrastructuur (2017)

*Uitbreiding van bestaande waterstofnetten* en bij voldoende vraag (welke eerst tijdelijk voorzien kan worden met transport over de weg) stapsgewijze omzetting delen bestaande aardgasnet naar waterstof. Richting 2030 wordt de export van aardgas afgebouwd; dit betekent dat mogelijk L-gas leidingen die van Noord naar Zuid lopen deels vrijkomen. Hierdoor zou het op relatief korte termijn mogelijk zijn deze over te zetten naar waterstof. Dit betekent wel voor bedrijven die nu putten uit die leiding, dat ze tegen die tijd ook motoren dan wel branders moeten aanpassen of op een andere manier van gas moeten worden voorzien. Hiermee wordt een waterstofnet van Noord naar Zuid gecreëerd hetgeen perspectief biedt voor waterstofwijken in de regio hiervan. Logischerwijs wordt een groot deel van de warmtenetten voorzien in de randstad, hier is wellicht geleidelijke doorgroei van het bestaande waterstofnet van Airproducts voor de hand liggend met bij voldoende omvang een koppeling met de Noord - Zuidleiding waarmee opslag voor seizoensvraag uit de randstad in de zoutcaverne in Noord Nederland ook mogelijk wordt.

## 7.10 Gevoeligheden

### Waterstof

- Er is op dit moment geen energiebelasting op geleverde warmte uit waterstof. Dit kan mogelijk in de toekomst veranderen.
- De keuze van waterstofopslag is niet voor elke situatie te kiezen waardoor er onrendabele businesscases in specifieke contexten kunnen ontstaan.
- Blauwe waterstof is een nog niet algemeen geaccepteerde energietransitiebrandstof, beeldvorming hierover komt nu op gang.
- Prijsontwikkelingen in brandstofcellen zijn onzeker.
- Groene waterstofprijs is nog volop in ontwikkeling, grote invloed is de toekomstige prijs uit windenergie.

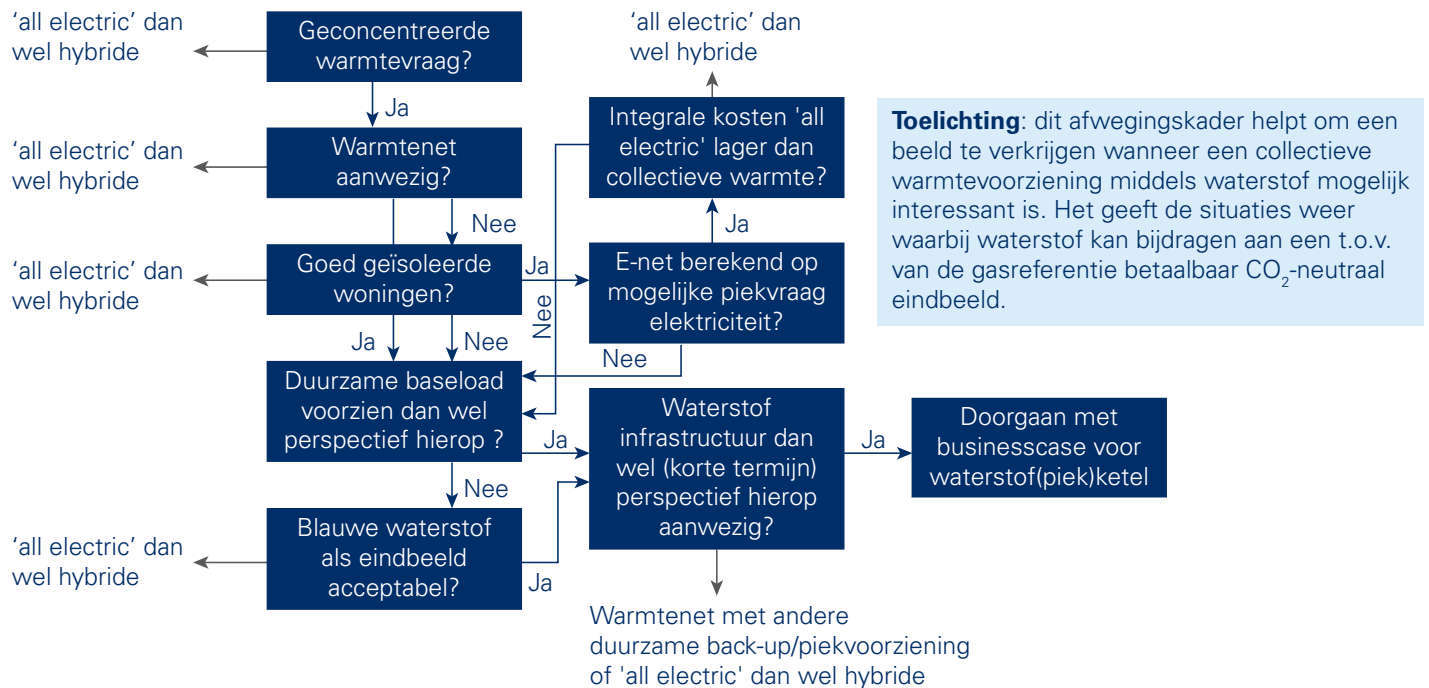
### Warmtenetten

- Een baseload warmtebron e.g. geothermie in combinatie met een waterstofpiekketel (geen back-up) biedt een rendabel potentieel mits er voldoende baseload volume gegarandeerd kan worden.
- In de aanloopfase bij de aanleg van warmtenetten ontstaan opbrengsten risico's
- De businesscase voor warmtenet is gevoelig voor de hoogte van de eenmalige aansluittarieven (opbrengsten). Deze kunnen sterk variëren door e.g. druk bewoners, woningcorporaties, projectontwikkelaars en/of lokale/regionale overheden.
- NMDA tarieven zijn onzeker in de toekomst aangezien deze afhankelijk zijn van de gasprijsontwikkeling.
- Aan de andere kant is een 'all electric' referentie in de toekomst ook niet uitgesloten.
- Utiliteitsbouw/grootverbruikers hebben het grootverbruikerstarief, wat de businesscases kan verslechteren.

### Gedrag en draagvlak

- Beloftes van dalende kostentrends in technologische ontwikkeling zoals de brandstofcellen en elektrolyzers kan afwachtende houding bij beleidsmakers en investeerders veroorzaken.
- Perceptie van waterstof 'in de wijk' kan negatief opgevat worden als ongewenst of zelfs gevaarlijk.

## 7.11 Afwegingskader



## 7.12 Conclusies

- Waterstof biedt perspectief als warmtebron van warmtenetten en kan voorzien in CO<sub>2</sub>-neutrale warmte, in twee van de vier onderzochte praktijkcasussen biedt blauwe waterstof nu al perspectief als CO<sub>2</sub>-neutrale warmtebron.
- In vrijwel alle situaties is een businesscase met blauwe waterstof sluitend, voor groene waterstof alleen wanneer deze wordt ingezet als piekvoorziening en integraal beschouwd in het systeem.
- Groene waterstof (met 2030 prijzen) biedt perspectief voor casus 1 en 3.
- Bij voorgenomen klimaatbeleid van belasting verhoging<sup>10</sup> voor aardgas wordt ook waterstof i.c.m. een WKK interessant en laten andere casussen een gezonde businesscase zien.
- Rentabiliteit van waterstofpiekketel is alleen haalbaar wanneer de baseload gegarandeerd is.
- Praktijk pilots zijn wellicht nu al mogelijk mits (lokaal) waterstoftransport door leidingen beschikbaar is.
- Waterstof als baseload voorziening in een WKK of brandstofcel (casus 4) biedt momenteel geen businesscase. Onder andere vanwege een beperkte spark spread, waardoor opbrengsten van elektriciteit verhoudingsgewijs weinig opleveren. Met de impact van de mogelijke belastingverhoging van aardgas wordt situatie WKK (brandstofcel) met waterstofpiek (casus 4b) een positieve case.
- Waterstof kan altijd de hoogste piek voorzien, dit betekent dat wanneer hoge temperatuur opslag (HTO, seizoenbuffering) mogelijk is, waterstof alleen de echte pieken (en back-up) hoeft te kunnen dekken. Dit heeft impact op de nood voor grote waterstofopslag en -leidingen naar het noorden. Wanneer de volume/leveringscapaciteit ratio van piekinstallaties wordt beperkt is het wellicht wel mogelijk om te werken met gedistribueerde plaatselijke tanks, om in de nodige opslagvolumes te voorzien
- In veel van de onderzochte gevallen is blauwe waterstof nu al rendabel, en groene waterstof pas in de verdere toekomst. Omdat de beslissingstechnieken gelijk zijn voor beide is het goed mogelijk om een project te beginnen met "blauw" en later over te schakelen op "groen".

<sup>10</sup> Deze belastingverhoging op aardgas werd voorgesteld in het Voorstel voor hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (17 juli 2018), en is in dit rapport als rekenmodel overgenomen. In de recente regeringsreactie (5 oktober 2018) is dit voorstel sterk afgezwakt.



- Daar waar nu al een waterstofinfrastructuur aanwezig is heeft waterstof een kans, vanuit hier kan het net dan uitgebreid worden naar naburige warmtevragen om zo de benodigde schaal van de infrastructuur te bewerkstelligen. Bestaande bijstookketels van warmtenetten bieden wellicht nu al perspectief om CO<sub>2</sub>-vrij te worden in de vorm van waterstofketels, door de verbranders te veranderen.

Bij de toepassing van groene waterstof in het systeem ligt het vanuit energetisch oogpunt meer voor de hand om de elektriciteit direct d.m.v. een warmtepomp om te zetten in warmte en de overschotten aan opwek om te zetten in groene waterstof voor gebruik in piekketels. Hierbij speelt waterstof een sleutelrol in termen van afstemming van vraag en aanbod.

De rentabiliteit van de warmtenetten is beter bij minder goed geïsoleerde woningen en gestapelde bouw. Dit kan gunstig zijn voor oude binnensteden en bestaande flats waar isolatie van panden moeizaam en kostbaar is, wat een 'all electric' oplossing veelal moeilijk inpasbaar maakt. Aan de andere kant is de aanleg van een warmtenet in oude binnensteden wellicht ingrijpender dan op andere locaties.

Wanneer de volume/leveringscapaciteit ratio van piekinstallaties wordt beperkt, is het wellicht wel mogelijk om te werken met gedistribueerde plaatselijke tanks, om in de nodige opslagvolumes te voorzien.

# Bronnen & Appendix

## Methode per casus beschrijven

### Casus 1

Op basis van de totale warmtevraag wordt de hoeveelheid waterstof bepaald die nodig is om aan de warmtevraag van de 100 appartementen te voldoen via een waterstofbrander. Per stap worden de omzettingsverliezen meegenomen. Overtollig waterstof aanbod wordt opgeslagen om seizoensfluctuaties te overbruggen.

### Casus 2

Op basis van de totale warmtevraag wordt de totale hoeveelheid benodigde energie uit waterstof berekend. Daarnaast gaan we in de simulatie uit van een fijnmazig warmtenet in een bestaande bouw woonwijk van 5000 woningen (mix rijtjes en twee onder één kap woningen). Er is hier wel uitgegaan van een eenmalige aansluitbijdrage van 4.000 Euro.

### Casus 3

Dit keer wordt de warmtevraag ingevuld door een baseload bron: geothermie met behulp van een warmtebuffer en (hulp) warmtepomp. De pieken worden aangevuld door de waterstofbrander. De configuratie van opgestelde vermogens wordt berekend door de Return of Investment van de hele keten te optimaliseren.

### Casus 4

De warmtevraag ingevuld door een baseload bron: waterstof WKK gevoed met waterstof. De pieken worden aangevuld door een waterstofpiekkel. De configuratie van opgestelde vermogens wordt (net als in casus 3) berekend door de Return of Investment van de hele keten te optimaliseren. Echter voor de PEMFC en de groene waterstofcombinatie is dit niet mogelijk.

## Bronnen

- ACM (2018) - Besluit tot vaststelling van de maximumprijs en de berekening van de eenmalige aansluitbijdrage en het meettarief warmteverbruik per 1 januari 2018
- Berenschot (2017) - CO<sub>2</sub>-vrije waterstofproductie uit gas
- Berenschot (2018a) - Restwarmte uit Datacenters
- Berenschot (2018b) - Gesprek met AkzoNobel
- CBS Statline (2018) - Aardgas en elektriciteit, gemiddelde prijzen van eindverbruikers, bezocht op
- Danish Energy Agency (2018) - Technology Data for Energy Plants for Electricity and District heating generation
- EBN (2018) - Interview met Thijs Huijskes, 21-6-2018
- ECN (2015) - Monitoring Warmte 2015
- ECN (2017) - Kostenonderzoek geothermie SDE+ 2018
- FCHJU (2014) - Development of Water Electrolysis in the European Union
- GTS (2018) - Interview met René Schutte 4-9-2018
- Kalavasta (2018) - Interview met Rob Terwel, 22-6-2018
- NEV (2017) - <http://www.pbl.nl/publicaties/nationale-energieverkenning-2017>
- DNVGL, (2017) - Verkenning waterstofinfrastructuur
- NTNU (2016) - Concepts for large scale hydrogen production
- Platform Geothermie (2018) - Interview met Frank Schoof, 5-7-2018
- Quintel (2018) - Interview met Michiel den Haan, 11-6-2018
- Roads2Hy (2009) - Deliverable 4.3, well to tank
- RVO (2011) - Voorbeeldwoningen bestaande bouw 2011
- RVO (2018) - <https://english.rvo.nl/subsidies-programmes/sde/sde-offshore-wind-energy/borssele-wind-farm-sites-iii-iv>, bezocht op 25-6-2018
- SBC factbook (2014) - SBC Energy Institute - Hydrogen based energy conversion - FactBook
- TKI Nieuw Gas (2018) - Contouren van een Routekaart Waterstof

**Appendix A – samenvattend overzicht belangrijke aannames**

<b>ELEKTROLYSERS</b>	<b>AEC 2015</b>	<b>PEMEC 2015</b>	<b>PEMEC 2030</b>	<b>PEMEC 2050</b>
Capex Installatie per kW	1000 Eur / kW	1000 Eur / kW	850 Eur / kW	500 Eur / kW
Capex Gebouw per kW	150 Eur / kW	150 Eur / kW	150 Eur / kW	150 Eur / kW
Fixed O&M cost %Capex	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%
Vervangingskosten Cell Stack %Capex	30%	30%	30%	30%
WACC	8%	8%	8%	8%
Levensduur systeem (jaar)	25	25	25	30
Levensduur cell stack (uren)	60000	40000	60000	90000

<b>OVERIGE TECHNOLOGIEËN</b>	<b>GEOthermie</b>	<b>WARMTENET</b>	<b>WKK</b>
Capex	1.6 MEur/MW	6000 Eur /aansluiting	600 kEur / MW
Vaste Opex	60 000 Eur/MW	5% Capex	11300 Eur/MW
Variabele Opex	8 Eur / MW	-	16 Eur / FLH
WACC	8%	7%	10%
Levensduur systeem (jaar)	30	30-50	20

<b>BRANDSTOFCELLEN</b>	<b>PEMFC 2015</b>	<b>PEMFC 2030</b>
Capex Installatie per kW	2715 Eur / kW	679 Eur / kW
Capex Gebouw per kW	150 Eur / kW	150 Eur / kW
Fixed O&M cost %Capex	1.5%	1.5%
Vervangingskosten Cell Stack %Capex	30%	30%
WACC	8%	8%
Levensduur systeem (jaar)	25	25
Levensduur cell stack (uren)	10000	80000
Elektrische efficiëntie	32%	50%
Thermische efficiëntie	40%	40%

<b>PRIJZEN EN TARIEVEN</b>	<b>HOEVEELHEID</b>
Max. leverprijs warmte - vast deel	255.81 Eur
Max. leverprijs warmte - variabel deel	19.88 Eur / GJ
Max. meettarief	20.96 Eur
Aansluittarief	4000 Eur
Elektriciteitsprijs 2015	40.81 Eur / GJ
Elektriciteitsprijs 2030	43.81 Eur / GJ

## Appendix B – Kosteninschatting waterstofopslag in mijnschachten

ITEM	HOEVEELHEID
Nieuwe mijnschacht Capex (700 meter)	4.2 MEuro
Bestaande mijnschacht Capex (700 meter)	2.8 MEuro
Opex per jaar %Capex	5%
Energie H2 in de shaft (700 meter)	3140 MWh
WACC	10%
Afschrijving	50 jaar
Nieuwe mijnschacht Capex (700 meter)	204 Euro / MWh
Bestaande mijnschacht Capex (700 meter)	186 Euro / MWh

### Toelichting

Op verzoek van de opdrachtgever is er op basis van aangeleverde informatie een korte berekening gemaakt op de haalbaarheid van opslag in waterstof in ondergrondse kolommen in verlate mijnschachten. Een initiële schatting komt uit op 186 – 204 Euro / MWh. Aangezien de mijnschachten sterk geconcentreerd zijn is hier ook een grootschalig netwerk of het gebruik van hoge druk tanks met vrachtwagens nodig voor het transport van de waterstof. Naast de hoge kosten voor waterstofopslag in de verlate mijnschachten dienen zich ook andere belemmeringen aan: de mogelijke herbestemming van de schachten die concurreert met die van opslag.













# Berenschot

Berenschot is een onafhankelijk organisatieadviesbureau met 350 medewerkers wereldwijd. Al 80 jaar verrassen wij onze opdrachtgevers in de publieke sector en het bedrijfsleven met slimme en nieuwe inzichten. We verwerven ze en maken ze toepasbaar. Dit door innovatie te koppelen aan creativiteit. Steeds opnieuw. Klanten kiezen voor Berenschot omdat onze adviezen hen op een voorsprong zetten.

Ons bureau zit vol inspirerende en eigenwijze individuen die allen dezelfde passie delen: organiseren. Ingewikkelde vraagstukken omzetten in werkbare constructies. Door ons brede werkterrein en onze brede expertise kunnen opdrachtgevers ons inschakelen voor uiteenlopende opdrachten. En zijn we in staat om met multidisciplinaire teams alle aspecten van een vraagstuk aan te pakken.

## **Berenschot Groep B.V.**

Europalaan 40, 3526 KS Utrecht

Postbus 8039, 3503 RA Utrecht

030 2 916 916

[www.berenschot.nl](http://www.berenschot.nl)

[in /berenschot](https://www.linkedin.com/company/berenschot)