DNV·GL

EINDRAPPORT

Haalbaarheid waterstof in bijstookketels voor warmtenetten

In opdracht van: Energiebeheer Nederland

Rapport nr.: OGNL.192904
Datum: 10-09-2020

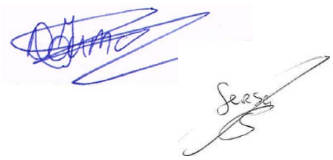
DOCUMENTINFORMATIE

Rapport:	Eindrapport
Rapport titel:	Haalbaarheid waterstof in bijstookketels voor warmtenetten
Klant:	In opdracht van: Energiebeheer Nederland
Datum:	10-09-2020
Project nr.:	10178845
Organisatie unit:	Energy Market & Transaction Advisory
Rapport nr.:	OGNL.192904

DNV GL
Energieweg 17
9743 AN Groningen
Netherlands
Tel: +31 (0)6 1528 9995

Applicable contract(s) governing the provision of this Report: -

Doel: Onderzoek naar de technische haalbaarheid voor het gebruik van waterstof in bijstookketels voor warmtenetten.

Prepared by:	Verified by:	Approved by:
		
Jochum Douma Sander Gersen	Albert van den Noort	Johan Knijp

Copyright © DNV GL 2020. All rights reserved. Unless otherwise agreed in writing: (i) This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise; (ii) The content of this publication shall be kept confidential by the customer; (iii) No third party may rely on its contents; and (iv) DNV GL undertakes no duty of care toward any third party. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited. DNV GL and the Horizon Graphic are trademarks of DNV GL AS.

Inhoudsopgave

DOCUMENT INFORMATIE 1

SAMENVATTING 1

1 INLEIDING 2
1.1 Achtergrond 2
1.2 De opdracht 3
1.3 Leeswijzer 4
1.4 Aanpak 4

2 UITGANGSPUNTEN 6
2.1 Waterstoflevering 6
2.2 Inzet waterstofketel 8
2.3 Warmtevraag 8

3 TECHNISCHE ANALYSE 11
3.1 Waterstoftransport per leiding 11
3.2 Waterstoftransport met een tube-trailer 13
3.3 Waterstofketel 16

4 RUIMTELIJKE ASPECTEN 23
4.1 Tube-trailers 23
4.2 Waterstofketel 23
4.3 Terreinindeling 25

5 FINANCIELE ASPECTEN 26
5.1 Waterstoftransport per leiding 26
5.2 Waterstoftransport met een tube-trailer 27
5.3 Waterstofketel 28

6 CONCLUSIE 30
6.1 Aanbevelingen en vervolgstappen 31

REFERENTIES 33

SAMENVATTING

Waterstof is een potentiele energiedrager die kan worden ingezet voor de verduurzaming van warmtenetten. Als aanvulling op andere duurzame bronnen zoals aardwarmte, die veelal enkel worden ingezet in de basislast, zou waterstof ingezet kunnen worden om de back-up en piekvoorziening te leveren. EBN heeft zich jarenlang ingezet om het belang van de overheid in de Nederlandse bodem te vertegenwoordigen en heeft sinds vorig jaar (2019) van de overheid opdracht gekregen om te investeren in aardwarmteprojecten. In opdracht van EBN heeft DNV GL daartoe een haalbaarheidsstudie uitgevoerd naar de technische (on)mogelijkheden van de inzet van waterstof in warmtenetten. De studie baseert zich op een concreet voorbeeldproject in Zwijndrecht van een te ontwikkelen warmtenet. HVC werkt samen met de gemeente en de plaatselijke woningcorporatie toe naar meerdere duurzame warmtenetten die op termijn verbonden kunnen worden. Er zijn drie cases gedefinieerd; 805, 3000 en 8000 appartementen, waarbij is onderzocht hoe waterstof naar Zwijndrecht kan worden geleverd en wordt technisch inzicht gegeven in de back-up en piekinstallatie, de waterstofketel.

Waterstoflevering

In de buurt van Zwijndrecht, in het havengebied van Rotterdam, wordt grootschalig grijze waterstof geproduceerd wat mogelijk in een eerste fase kan worden ingezet. Voor de levering van waterstof is gekeken naar een waterstofleiding, die aansluit op een waterstofnetwerk in de buurt van Zwijndrecht, of naar tube-trailers die waterstof aanvoeren vanuit het havengebied. Beide opties zijn technisch mogelijk, echter is waterstoflevering door middel van tube-trailers bij grotere warmtevraag (in de cases met 3000 en 8000 appartementen) nadelig in verband met kosten en de grote hoeveelheid tube-trailers die nodig zijn (met mogelijke overlast en benodigde ruimte op de ketellocatie in Zwijndrecht). Daarnaast geven de huidige veiligheidsnormen onvoldoende flexibiliteit om de tube-trailers op het beoogde terrein in Zwijndrecht op te stellen. Deze normen schrijven een minimale (externe) veiligheidsafstand van 35 m tot de perceelgrens voor waarbij een veiligheidsanalyse, die mogelijk tot kleinere afstanden kan leiden, wordt uitgesloten. In 2021 wordt de wetgeving vernieuwd en het toevoegen van een veiligheidsanalyse wordt op dit moment voorgelegd.

Waterstofketel

De inzet van waterstof voor de back-up en piekvoorziening lijkt op korte termijn haalbaar. Er wordt op dit moment gewerkt aan de ontwikkeling van waterstofketels welke in 2023 worden verwacht beschikbaar te zijn. Uit gesprekken met fabrikanten blijkt dat de huidige (technische) obstakels voor de waterstofketel relatief gemakkelijk zijn op te lossen. Met enkele systeemaanpassingen zoals een ander type brander, een grotere condensator en het toepassen van rookgasrecirculatie voor het terugdringen van NO_x, is het mogelijk om binnen de systeemeisen en milieurichtlijnen te blijven en kunnen vergelijkbare rendementen worden behaald als met aardgasketels. De kosten voor een waterstofketel worden daarbij geschat op zo'n 0.7-0.9 M€ voor een 10 MW-installatie.

De inzet van waterstof in het nog te ontwikkelen warmtenet in Zwijndrecht is technisch op korte termijn haalbaar en biedt kansen voor de verduurzaming van de warmtelevering.

1 INLEIDING

De winning van olie en gas uit Nederlandse ondergrond heeft jarenlang een belangrijke rol gespeeld in de landelijke, maar ook internationale energievoorziening. Nu tot het besef wordt gekomen dat deze grondstoffen niet oneindig zijn en een zware belasting hebben op de natuur en het klimaat wordt gezocht naar alternatieve energiebronnen en wordt er in Nederland volop ingezet op een energietransitie naar een duurzaam systeem. Hierbij wordt er gekeken naar zon, wind en biomassa, maar kan ook de bodem nog een belangrijke rol blijven spelen in de verduurzaming van de energievoorziening. Aardwarmte kan worden ingezet, daar waar warmte de benodigde vorm van energie is. Eén van de toepassingen wordt gezocht in ruimteverwarming waar aardwarmte als primaire bron kan worden ingezet in warmtenetten.

Aardwarmte kan gebruikt worden om de basislast van het warmtenet te voorzien en kan worden aangevuld door andere energiedragers om ook de fluctuerende pieken te voorzien. Waterstof (groen of blauw) biedt hierbij een duurzame of klimaat-neutrale oplossing.

1.1 Achtergrond

Waterstof in de gebouwde omgeving - Eind 2018 heeft Berenschot een rapport [1] uitgebracht over het gebruik van waterstof om de gebouwde omgeving van warmte te voorzien. Uit deze studie blijkt dat waterstof in combinatie met aardwarmte een belangrijke impuls kan zijn voor volledige CO_2-neutrale warmtenetten. Daarbij is duurzame of klimaat neutrale waterstof voornamelijk een veelbelovende optie voor de piek- en back-up voorziening van warmtenetten. Aardwarmte kan worden ingezet voor de warmtelevering, maar kan maar beperkt reageren op schommelingen en pieken in de warmtevraag en wordt daarom voornamelijk ingezet voor basislast. Een snel reagerend system, zoals een waterstofketel, kan worden ingezet om in deze schommelingen en pieken te voorzien en kan tevens als back-up systeem fungeren.

Visie EBN en HVC - EBN heeft zich als staatsdeelneming jarenlang ingezet om het belang van de Staat te vertegenwoordigen bij de winning van olie en gas uit Nederlandse ondergrond. Daarmee heeft het bedrijf veel kennis en ervaring opgedaan van de Nederlandse ondergrond, wat een belangrijke bijdrage kan leveren aan de ontwikkeling van aardwarmte. EBN is daarom de laatste jaren betrokken geweest bij deze ontwikkelingen en heeft sinds vorig jaar (2019) van de overheid opdracht gekregen om te investeren in aardwarmteprojecten [2]. Aardwarmte kan een belangrijke rol spelen in het verduurzamen van warmtenetten en zoals uit de studie van Berenschot blijkt kan ook waterstof hieraan bijdragen [1].

Hierbij is het belangrijk samen te werken met partijen actief in het verduurzamen van de warmtevoorziening, zoals HVC. HVC is een duurzaam energie- en afvalbedrijf en wil de mogelijkheden (en onmogelijkheden) van de inzet van waterstof in warmtenetten helder laten uitzoeken. Zij heeft plannen in de komende jaren om verschillende warmtenetten te bouwen en uit te breiden.

Voorbeeld studie: Warmtenet Zwijndrecht - In Zwijndrecht werkt HVC samen met de gemeente en de plaatselijke woningcorporatie toe naar meerdere duurzame warmtenetten die op termijn verbonden kunnen worden. Als basislast wordt hier gekeken naar aquathermie (TEO) en ondiepe geothermie. Er is dus een voorziening nodig voor piek- en back-up functie. Daarnaast lopen meerdere industriële waterstofleidingen vanaf het havengebied langs Zwijndrecht. Vanwege deze combinatie is dit project een geschikte casus om de mogelijke inzet van (in eerste instantie grijze) waterstof op basis van een praktijkvoorbeeld te onderzoeken.

1.2 De opdracht

Op basis van het voorbeeld in Zwijndrecht willen EBN en HVC de technische haalbaarheid naar de mogelijke inzet van waterstof in bijstookketels onderzoeken. Het resultaat moet kennis genereren op basis waarvan het wel of niet gebruiken van waterstof in een bijstookinstallatie kan worden overwogen. Het project moet inzicht bieden in de praktische aspecten die relevant zijn voor de inzet van waterstof in een piek- en back-up voorziening van warmtenetten. Hierbij dient vooral ingezoomd te worden op de technische en ruimtelijke aspecten, andere aspecten zoals kosten worden op hoofdlijnen in kaart gebracht.

De studie baseert zich op de aanleg van een warmtenet voor 805 appartementen in de wijk Walburg in Zwijndrecht. De appartementen zijn verdeeld over een tiental appartementencomplexen in het noordoosten van Zwijndrecht en zullen van duurzame warmte worden voorzien. De locatie voor de duurzame warmtebron is nabij de watertoren aan de Ringdijk en is in onderstaande figuur aangeduid in het rode blok "opwek".

De casus met 805 appartementen wordt gebruikt als uitgangspunt voor de capaciteitsbepaling van de waterstofketel en de benodigde infrastructuur. De ketellocatie is door EBN en HVC aangewezen op dezelfde plek als de warmtebron. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de appartementencomplexen en de locatie voor de warmtebron.

Figuur 1: overzicht van de appartementencomplexen en de locatie van de duurzame warmtebron (aangeduid met opwek).

Bron: HVC

Naast de uitgangssituatie, zoals hierboven beschreven, worden er ook nog twee andere cases doorgerekend. Deze cases worden doorgerekend om inzicht te krijgen in de impact van hogere capaciteiten. In overleg met EBN is besloten om ook een casus met 3.000 en een casus met 8.000 appartementen te beschouwen. Daarmee wordt een indicatie gegeven van de verwarming voor (i) een wijk (805 appartementen), (ii) een klein dorp (3.000 appartementen) en (iii) een groot dorp (8.000).

1.3 Leeswijzer

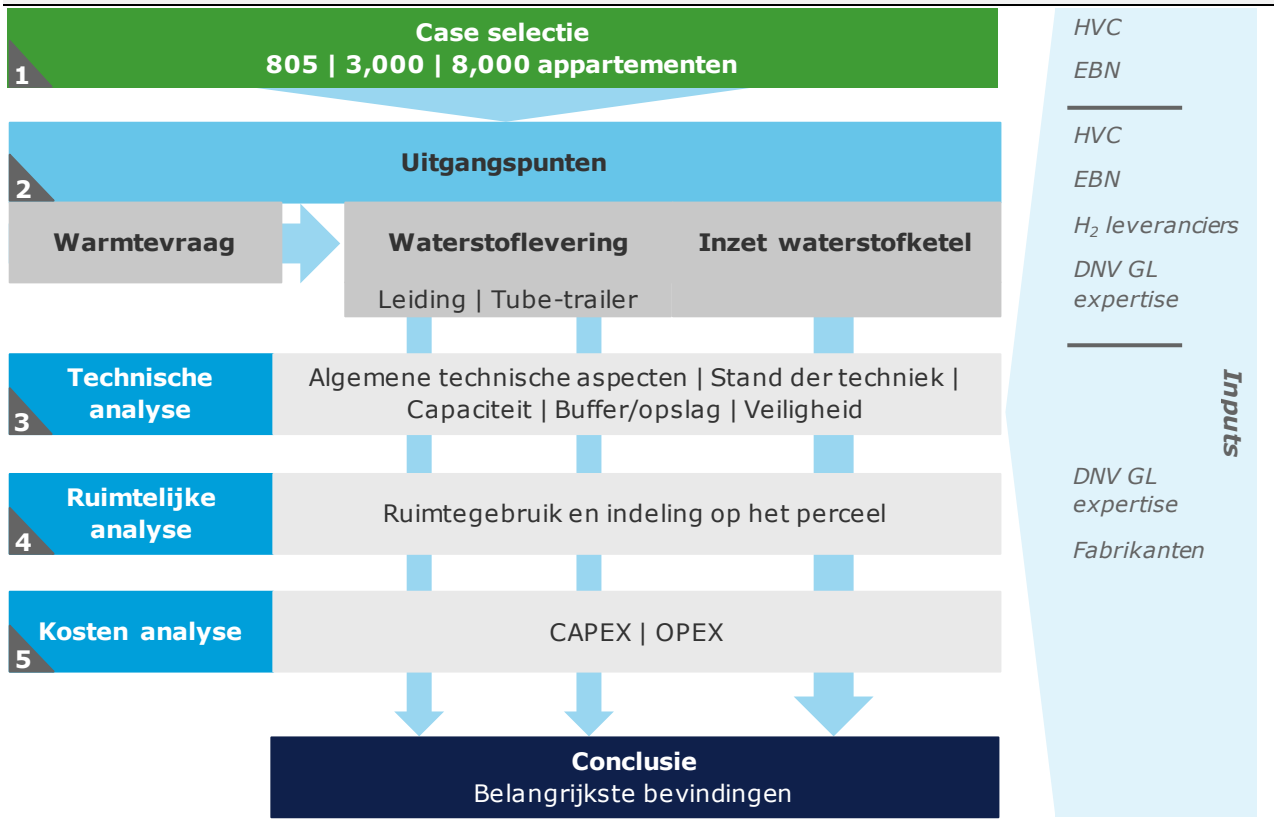
Dit rapport is ingedeeld in zes hoofdstukken. In dit hoofdstuk introduceren we het doel en de achtergrond van deze studie en wordt een beschrijving gegeven van de caseselectie. Hoofdstuk 2 geeft inzicht in de gehanteerde uitgangspunten met betrekking tot de levering van waterstof, de inzet van de waterstofketel, de warmtevraag en de systeemeisen. In de daaropvolgende hoofdstukken worden de verschillende analyses uitgevoerd. Hoofdstuk 3 omvat de technische analyse en geeft voor zowel een waterstofleiding, tube-trailers en de waterstofketel inzicht in de stand van techniek, de benodigde capaciteiten, eventuele opslag of buffering en worden relevante veiligheidsaspecten beschreven. In hoofdstuk 4 wordt de installatie op het perceel ingepast en geeft dit inzicht in de dimensies van de installatie. In hoofdstuk 5 wordt de economische analyse beschreven waarbij inzicht wordt gegeven in de CAPEX en OPEX van de verschillende systeemonderdelen. En tot slot wordt in hoofdstuk 6 een opsomming gegeven van de belangrijkste aspecten die in deze studie naar voren zijn gekomen.

De structuur van dit rapport volgt grotendeels de aanpak welke hieronder in meer detail wordt beschreven.

1.4 Aanpak

De aanpak volgt een vijftal opeenvolgende stappen waarbij input is aangeleverd door zowel HVC, EBN, waterstofleveranciers en verschillende fabrikanten. Daarnaast is gebruik gemaakt van de kennis en ervaring uit andere projecten, uitgevoerd door DNV GL. Een schematische weergave van de aanpak is in onderstaande figuur afgebeeld en wordt hieronder verder toegelicht.

Figuur 2: schematische weergave van de gehanteerde aanpak.



Bron: DNV GL

1. In de eerste stap zijn drie cases gedefinieerd, gebaseerd op de plannen van HVC en opschalingsvraagstukken van EBN.
2. In stap twee worden de uitgangspunten voor de verschillende systeemonderdelen inzichtelijk gemaakt; de warmtevraag, de waterstoflevering en de inzet van de waterstofketel. Hierbij worden de relevante lokale aspecten behandeld en wordt de basis gevormd voor de technische, ruimtelijke en kostenanalyse. Voor de warmtevraag is gebruik gemaakt van eigen kennis en ervaring, maar is ook gebruik gemaakt van kennis en analyses van HVC en EBN. Daarnaast is een waterstofleverancier benaderd voor de mogelijkheden van waterstoflevering
3. In stap drie wordt inzicht gegeven in de technische aspecten van het transport en verbranden van waterstof voor de piekvoorziening en als back-up systeem voor het warmtenet. In samenwerking met diverse fabrikanten is voor zowel een waterstofleiding, tube-trailers en de waterstofketel inzicht verkregen in de huidige stand van techniek. Op basis van deze technische inzichten en de in stap 2 veronderstelde uitgangspunten zijn de benodigde capaciteiten berekend. Daarnaast zijn de huidige veiligheidsrichtlijnen beschreven en wordt benoemd welke veiligheidsmaatregelen van belang zijn voor de toepassing van waterstof.
4. In stap 4 wordt op basis van de technische aspecten en berekende capaciteiten een inschatting gemaakt van de dimensies van het systeem en wordt dit ter indicatie op het beoogde perceel ingepast.
5. Om inzicht te geven in de kosten en als voorbereiding op een eventuele economische haalbaarheidsstudie en/of demonstratieproject worden in stap 5 op basis van DNV GL kennis en input van de fabrikanten op hoofdlijnen CAPEX- en OPEX-getallen gegeven voor de verschillende cases.

De belangrijkste bevindingen en aspecten uit de vijf stappen worden aan het eind benoemd in de conclusie.

2 UITGANGSPUNTEN

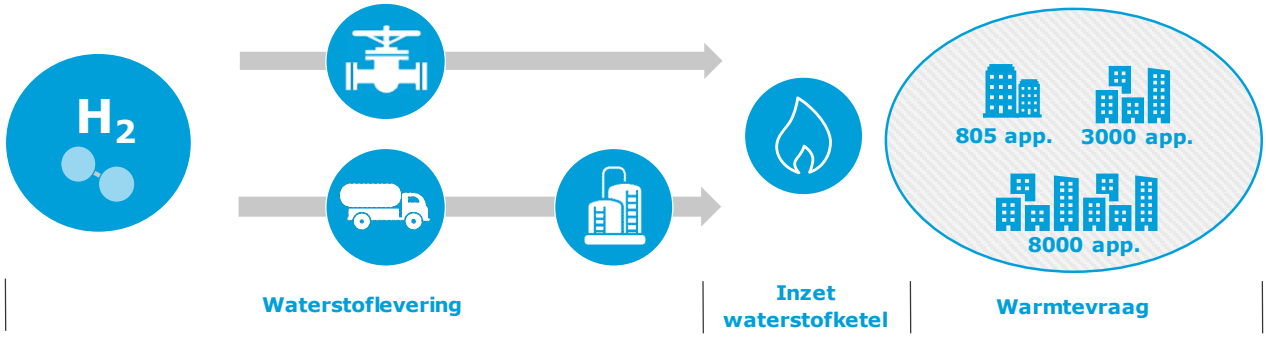
In dit hoofdstuk worden de uitgangspunten voor de verschillende systeemonderdelen toegelicht. Hierbij worden de relevante lokale aspecten behandeld en wordt de basis gevormd voor de technische, ruimtelijke en kostenanalyse.

De systeemonderdelen die hierbij aan bod komen zijn:

- De waterstoflevering – *Wat zijn de mogelijkheden voor de levering van waterstof?*
- De inzet van de waterstofketel – *Welke functie gaat de waterstofketel vervullen?*
- De warmtevraag – *Wat is de warmtevraag voor de verschillende cases?*

Onderstaand overzicht geeft een visueel beeld van hoe de keten en verschillende systeemonderdelen zijn opgebouwd.

Figuur 3: Systeemonderdelen voor het gebruik van waterstof in het warmtenet.



Bron: DNV GL

2.1 Waterstoflevering

Het havengebied van Rotterdam is één van de grootste waterstofclusters van Nederland waar jaarlijks zo'n 479 kton waterstof wordt geproduceerd voor de industrie [3]. Waterstof is voornamelijk afkomstig van industriële reststromen of wordt geproduceerd uit aardgas via "Steam Methane Reforming" (SMR). Dit wordt "grijze" waterstof genoemd waarbij ook CO_2 vrijkomt die dus zonder het afvangen van deze CO_2 niet duurzaam is. In de visie van het havengebied wordt wel gesproken over het afvangen en opslaan van de CO_2, wat ook wel "blauwe" waterstof wordt genoemd. Daarnaast zijn er plannen voor de productie van waterstof uit duurzame elektriciteit, waarbij men spreekt van "groene" waterstof. Op dit moment is echter alleen nog grijze waterstof beschikbaar.

In het havengebied zijn meerdere leveranciers van (grijze) waterstof die voornamelijk aan de industrie leveren. Voor deze studie is één van hen benaderd voor de leveringsmogelijkheden van waterstof. Hierbij is met name gekeken naar de mogelijkheid om in te spelen op de wisselende vraag en waterstoflevering middels leidingen en wegtransport.

2.1.1 Levering bij wisselende vraag

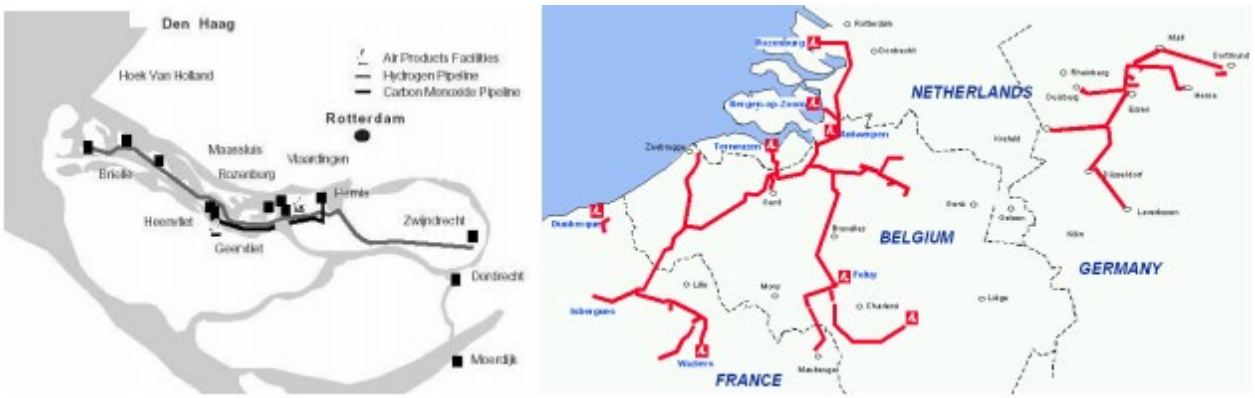
De benaderde leverancier beschikt over een eigen waterstofopslag welke kan worden ingezet wanneer een spoedlevering noodzakelijk is. Daarnaast is het mogelijk om de productie binnen enkele uren op of af te schakelen en kan vooraf worden ingespeeld op een wisselende vraag. In de technische analyse wordt verder ingegaan op de implicaties voor de leveringsmethodes.

2.1.2 Leveringsmethodes

In en rondom het havengebied zijn waterstofleidingen aanwezig van meerdere leveranciers. Daarnaast bestaat er ook de mogelijkheid om waterstof te leveren via de weg.

Leidingnetwerk – In het gebied rondom Zwijndrecht liggen meerdere waterstofleidingen. Voor de studie is aangenomen dat er binnen een straal van 5 km kan worden aangesloten op een waterstofleiding. Daarnaast is op basis van gesprekken met een waterstofleverancier aangenomen dat de capaciteit voldoende is voor de case in Zwijndrecht.

Figuur 4: Bestaande waterstofleidingen (links Air Products, rechts: Air Liquide)



Bron: Road2hycom, "D2.1 European Hydrogen Infrastructure Atlas", 2007

Wegtransport - Een andere optie is het aanleveren van waterstof via de weg. Hierbij wordt de waterstof rechtstreeks vanaf een productielocatie naar het eindpunt getransporteerd. In de volgende hoofdstukken wordt nader ingegaan op de twee transportopties.

Er is in dit onderzoek geen analyse gedaan naar de productie van waterstof. Er wordt in deze studie verondersteld dat er binnen een straal van 5 km een koppelpunt met een leiding mogelijk is en dat waterstof via wegtransport mogelijk is vanuit het havengebied (40 km).

2.1.3 Andere mogelijkheden voor waterstoflevering

Enkele andere mogelijkheden voor toekomstige waterstoflevering worden hieronder benoemd, maar worden niet verder uitgewerkt in dit onderzoek.

Gasunie Backbone - Gasunie is voornemens een deel van het aardgasnetwerk over te schakelen naar waterstof. Een deel van de backbone komt mogelijk langs Zwijndrecht en is zo'n 5 km van de beoogde locatie van de waterstofketel verwijderd. De backbone wordt echter pas tussen 2025 en 2030 gerealiseerd en de investeringsbeslissing is nog niet genomen.

Andere waterstoflevering uit havengebied - Er zijn mogelijk ook andere waterstofproducenten in het havengebied waarvan waterstof kan worden afgenomen. Een concreet voorbeeld is de toekomstige 250 MW elektrolyser zijn waarvan een consortium van Nouryon, Port of Rotterdam en BP momenteel de haalbaarheid onderzoekt [4].

Garantie van oorsprong (GvO) - Om de (grijze) waterstoflevering vanuit het havengebied te vergroenen zijn GvO's een mogelijke oplossingsrichting. Hoewel grijze waterstof wordt gebruikt, kunnen er mogelijk in de toekomst Garanties van Oorsprong (GvO's) gekocht worden. Via toekomstige groene waterstofcertificaten is het mogelijk om de fysieke productie van groene waterstof los te koppelen van het gebruik ervan. Een waterstofproducent verkoopt eigen geproduceerde groene waterstof aan een bedrijf dat in gas handelt. Daarbij krijgt de handelaar de certificaten ter beschikking. Een verbruiker kan deze certificaten kopen om zo zijn grijze waterstof te "vergroenen" om eigen duurzame energiedoelstellingen te behalen. In Nederland bestaat dit systeem al voor groen gas en groene elektriciteit, echter nog niet voor groene waterstof.

2.2 Inzet waterstofketel

Eind 2018 heeft Berenschot een rapport [1] uitgebracht over het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving. Eén van de belangrijkste conclusies was een mogelijke positieve businesscase voor het gebruik van groene waterstof in de piekvoorziening en als back-up systeem van warmtenetten. Voortbordurend op deze uitkomst en conform de opdracht wordt de inzet van waterstofketel in deze studie aan de hand van een praktijkvoorbeeld onderzocht. De nadruk wordt hierbij voornamelijk gelegd op de inzet als back-up, aangezien dit maatgevend is voor de dimensionering en technische aspecten.

2.3 Warmtevraag

Voor de bepaling van de warmtevraag, het benodigde ketelvermogen en de capaciteit van de infrastructuur wordt gebruik gemaakt van de input van HVC en van algemene kentallen die DNV GL hanteert voor warmtenetten en verwarming van appartementen. Hierbij wordt aandacht besteed aan (i) de verwarmingscapaciteit van een appartement, (ii) de gelijktijdigheid van de warmtevraag van alle appartementen en (iii) de verliezen in het warmtenet.

Verwarmingscapaciteit - Voor de benadering van de benodigde verwarmingscapaciteit is gebruik gemaakt van de interne kennis en ervaring van DNV GL die bij andere projecten is opgedaan. Voor de bepaling van het benodigde verwarmingsvermogen wordt veelal uitgegaan van een situatie waarbij het buiten -10 ^{o}C is. Dit kan worden gezien als een "worst-case" situatie, maar is ook afhankelijk van de grootte van het appartement, de isolatiegraad en het stookgedrag. Veelgebruikte getallen voor de benodigde verwarmingscapaciteit van appartementen variëren tussen de 7 en 11 kW per appartement. Hierbij is echter al rekening gehouden met de gelijktijdigheid van meerdere woningen en is ook rekening gehouden met de vraag naar warm tapwater.

Gelijktijdigheid - Doordat niet alle appartementen tegelijk de verwarming aan zetten is het in veel gevallen niet nodig om de volledige capaciteit van alle appartementen van warmte te voorzien. Naarmate het aantal appartementen toeneemt is het aannemelijk dat er verhoudingsgewijs minder appartementen zijn die tegelijk de verwarming aanzetten. Dit wordt gelijktijdigheid genoemd, wat in een percentage wordt uitgedrukt. De ervaring van DNV GL is dat de gelijktijdigheid meestal tussen de 50-80% ligt en dat die bij meer dan 100 appartementen vooral richting de 50% gaat. Dit wordt ook bevestigd in de literatuur [5]. Uiteindelijk is de keuze afhankelijk van het risico dat men bereid is te nemen voor de leveringszekerheid van warmte. Hierbij kan 50% als optimistisch worden beschouwd en 80% als conservatief. Dit correspondeert grotendeels met de eerdergenoemde verwarmingscapaciteit van 7-11 kW per appartement.

Leidingverlies - Het warmteverlies van de leidingen is sterk afhankelijk van het ontwerp van het warmtenet. Een aantal belangrijke aspecten hierbij zijn de leidingdiameter, de isolatiedikte, het materiaal, de leidinglengte, de watertemperatuur en de stroomsnelheid. Deze aspecten zijn in de huidige fase nog onbekend, maar een veelgebruikt kengetal voor warmteverlies is 20%. Dit is vastgesteld op basis van ervaring en wordt ook teruggevonden in de literatuur [5].

2.3.1 Maximale verwarmingscapaciteit

Voor de verschillende aantallen appartementen, de drie cases, is de totaal benodigde verwarmingscapaciteit (back-up) berekend op basis van de verwarmingscapaciteit per appartement, de gelijktijdigheid en het leidingverlies. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen optimistische en conservatieve inschattingen voor de verwarmingscapaciteit en de gelijktijdigheid. Voor 805 appartementen komt dit neer op een ketelvermogen van 7-11 MW. In onderstaande tabel wordt ook voor de andere cases het benodigde vermogen weergegeven in MW en de hoeveelheid waterstof in kg per uur. De berekende capaciteiten vormen de basis voor verdere berekeningen in dit onderzoek.

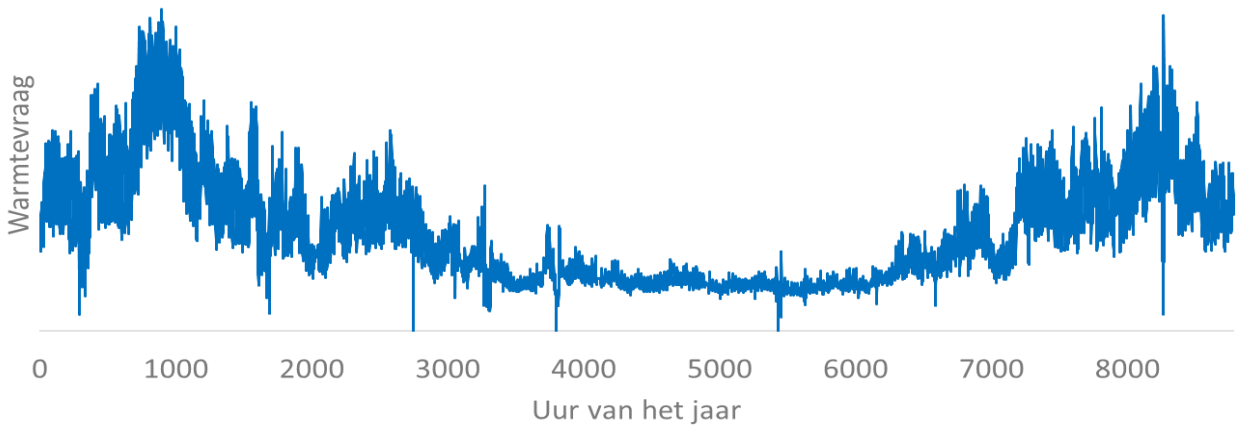
Tabel 1: Overzicht van benodigde totale verwarmingscapaciteit (back-up).

Appartementen	**Capaciteit**			
	laag (7kW)		***hoog (11kW)***	
805	7 MW	180 kg/h	11 MW	283 kg/h
3.000	26 MW	670 kg/h	41 MW	1053 kg/h
8.000	70 MW	1787 kg/h	110 MW	2809 kg/h

2.3.2 Seizoensgebonden verwarmingscapaciteit

De bovengenoemde verwarmingscapaciteit is bepaald op een maximale warmtevraag, een "worst-case situatie", wanneer het buiten -10°C is. Aangezien deze temperatuur maar zelden voorkomt wordt ook inzicht gegeven in de situatie wanneer meer gebruikelijke temperaturen worden gehanteerd. Hiervoor wordt een voorbeeld van een stookprofiel voor een ander warmtenet gebruikt en wordt er onderscheid gemaakt in een winter- en zomersituatie. Dit profiel is weergegeven in onderstaande figuur.

Figuur 5: Warmteprofiel van een warmtenet.



Bron: DNV GL

Op de verticale as wordt de (geanonimiseerde) warmtevraag weergegeven en op de horizontale as de uren van het jaar. De eerste 1,950 en laatste 240 uur vallen in de winter waar de warmtevraag ook duidelijk het hoogst is. De piek in de winter is zo'n 80% van het opgestelde vermogen. De piek in de zomerperiode (tussen 4,140 en 6,330 uur) is grofweg 20% van het totale vermogen. Deze warmtevraag bestaat voornamelijk uit de vraag naar warmtapwater.

2.3.3 Warmtevraag en piekvoorziening

Op basis van de hierboven berekende capaciteit en het warmtevraag profiel, zoals in Figuur 5 weergegeven, wordt de totale warmtevraag voor 805 appartementen geschat op 40 TJ/jaar, oftewel 11.2 GWh. Dit wordt aangeduid als de finale warmtevraag waarbij nog niet is gecorrigeerd voor de

leidingverliezen. Met inachtneming van 20% verlies is de hoeveelheid (primaire) energie die moet worden opgewekt zo'n 50 TJ/jaar (14 GWh).

Volgens HVC wordt 80% van de totale energievraag geleverd vanuit de basislast, in dit geval door de warmtebron, en wordt 20% van de energievraag geleverd door de piekvoorziening. Voor 805 appartementen is daarmee 10 TJ/ per jaar nodig voor de piekvoorziening (3 GWh). Onderstaande tabel geeft voor de verschillende cases een overzicht van de primaire warmtevraag en de benodigde hoeveelheid energie en waterstof voor de piekvoorziening.

Tabel 2: Overzicht van de primaire warmtevraag en de benodigde hoeveelheid energie en waterstof voor de piekvoorziening

Appartementen	**Primaire warmtevraag**		**Piekvoorziening**	
805	50 TJ/j	14.0 GWh/j	2.8 GWh/j	71 ton H_2/j
3.000	188 TJ/j	52.1 GWh/j	10.4 GWh/j	266 ton H_2/j
8.000	500 TJ/j	138.9 GWh/j	27.8 GWh/j	709 ton H_2/j

In tegenstelling tot de verbranding van aardgas wordt met waterstof, mits duurzaam of klimaatneutraal geproduceerd, geen CO_2 uitgestoten. Bij de verbranding van 1 GJ aardgas komt zo'n 50-60 kg CO_2 vrij. Als voorbeeld komt dit voor de totale warmtevraag van 805 appartementen neer op 2,500-3,000 ton CO_2 voor de totale warmtevraag en 500-600 ton CO_2 voor alleen de piekvoorziening.

3 TECHNISCHE ANALYSE

In dit hoofdstuk wordt inzicht gegeven in de technische aspecten van waterstoftransport en het verbranden van waterstof voor piek- en back-up voorziening voor een warmtenet. Voor waterstoftransport wordt inzicht gegeven in zowel transport middels een daar voor bestemde waterstofleiding en middels zogenaamde tube-trailers. Daarnaast wordt ook inzicht gegeven in voor waterstof bestemde ketels. Hierbij komen de volgende aspecten aan bod:

- De algemene technische aspecten en de stand der techniek
- De benodigde capaciteit voor de verschillende cases (met een lage en hoge inschatting)
- Eventueel benodigde buffer of opslag
- En veiligheidsaspecten

3.1 Waterstoftransport per leiding

Voor waterstoftransport per leiding wordt een aansluiting verondersteld dat er binnen een straal van 5 km rondom de ketellocatie in Zwijndrecht kan worden aangesloten op een waterstofleiding. Hierbij worden de uitgangspunten uit hoofdstuk 2 gehanteerd voor de technische beoordeling en voor de capaciteitsberekeningen. Voor een technisch overzicht van waterstoflevering via een leiding is gebruikgemaakt van de door DNV GL opgedane kennis en ervaring met gastransport en de meer recente onderzoeken en projecten met waterstoftransport. Daarnaast is ook een fabrikant benaderd om beter inzicht te krijgen in waterstoftransport in polymeer leidingen en huidige ontwikkelingen op het gebied van waterstoftransport.

3.1.1 Huidige stand der techniek en ontwikkelingen

In de grootschalige industrie is er is al lange tijd ervaring met waterstoftransport in pijpleidingen. Hier worden zowel stalen leidingen als polymeer (PE) leidingen toegepast voor transport van waterstof.

Staal - Waterstof kan, anders dan bij aardgas, zorgen voor waterstofverbrossing. Daarnaast kan waterstof in vergelijking met aardgas ook een sterkere invloed hebben op het vermoeiingsgedrag onder wisselende drukken. Om de effecten hiervan te mitigeren wordt bij stalen leidingen veelal een staalsoort toegepast met een lage hardheid (<X52) [6]. Staal met een lagere hardheid bevat minder koolstof en heeft daardoor een hogere plasticiteit wat zorgt voor minder brosheid en minder gevoeligheid voor vormveranderingen ten gevolge van drukwisselingen (Vermoeiingsgedrag).

Bestaande stalen leidingen zijn mogelijk ook geschikt voor waterstof[1], mits de staalsoort geschikt is en dat de wanden van de leiding dik genoeg zijn[2].

Polymeer - Ook PE-leidingen kunnen worden toegepast, maar dit zijn voornamelijk kleinere diameters (<8”) en lagere drukken (<10 bar). Hogere drukken zijn mogelijk door de PE-leidingen te versterken met glasvezel en hars (composiet). De benaderde fabrikant gaf aan dat hun (composiet) leidingsystemen voor waterstof zijn gecertificeerd voor drukken tot zo’n 40 bar, maar dat deze mogelijk wel hogere drukken aan kunnen. Ook het weglekken “de permeatie” van waterstof door de leidingwand is bij PE hoger dan bij staal. Dit kan nog steeds binnen de acceptatiegrenzen passen, maar door een aluminium laag toe te passen kan de permeatie tot vrijwel niets worden gereduceerd.

[1] De toepassing van waterstof wordt door o.a. Gasunie overwogen voor de ontwikkeling van een landelijk waterstofnetwerk. Uit een eerdere studie van DNV GL blijkt dat de leidingen over het algemeen geschikt lijken, maar dat iedere situatie individueel moet worden beoordeeld [6].

[2] Wanneer de staalsoort of de wanddikte van het staal niet geschikt lijkt voor waterstoftransport kan er ook voor worden gekozen om de druk te verlagen. Hierdoor neemt de materiaalstress af en is er minder risico op waterstofverbrossing. Zo blijkt uit kennis en ervaring uit andere DNV GL projecten, waaronder Hyready, een joint undertaking begeleid door DNV GL.

Het voordeel van een PE-leiding ten opzichte van staal is voornamelijk dat die veelal goedkoper is. PE-leidingen zijn flexibel en kunnen opgerold worden aangeleverd in lange lengtes (enkele honderden meters). Hierdoor zijn er minder las of flensverbindingen nodig in vergelijking met staal. Eenmaal geïnstalleerd is er daarnaast weinig tot geen onderhoud nodig wat voornamelijk kosten bespaard in de exploitatiefase.

Om te boordelen welk materiaal geschikt is, is het nodig om de benodigde leidingdiameter uit te rekenen.

3.1.2 Capaciteit

De keuze van de diameter is afhankelijk van de benodigde capaciteit, de druk, en de afstand. Er is gerekend met een druk van 25 bar, een afstand van grofweg 5 km, zoals besproken in 2.1 en de capaciteit is overgenomen uit Tabel 1. Op basis van deze gegevens zijn berekeningen gemaakt met interne DNV GL rekentools. Hiermee worden de benodigde leidingdiameters ingeschat tussen de 4 en 8 inch, afhankelijk van de case. Onderstaande tabel geeft per case en capaciteit de benodigde leidingdiameter.

Tabel 3: Overzicht van capaciteiten en de benodigde leidingdiameter.

Appartementen	**Capaciteit en benodigde leidingdiameter**			
	laag (7kW)		***hoog (11kW)***	
805	180 kg/h	4 inch (102 mm)	283 kg/h	4 inch (102 mm)
3.000	670 kg/h	6 inch (153 mm)	1053 kg/h	6 inch (153 mm)
8.000	1787 kg/h	6 inch (153mm)	2809 kg/h	8 inch (203 mm)

Zowel staal als composiet is geschikt voor dergelijke diameters en drukken. In hoofdstuk 5 wordt inzicht gegeven in de verschillen in kosten voor beide opties.

De capaciteit van de leiding is hiermee bepaald op basis van het benodigde vermogen om als back-up te kunnen dienen. Aangezien de inzet als back-up enkel in uitzonderlijke gevallen plaats zal vinden wordt waterstof voornamelijk geleverd voor de piekvoorziening. Terwijl de dimensionering en de kosten gelijk zullen blijven wordt de capaciteit van de leiding meestal dus maar voor een klein deel benut. In vergelijking met een constante inzet van de leiding wordt de leiding bij de piekvoorziening jaarlijks maar voor zo'n 5% benut.

3.1.3 Buffer

Naast waterstoftransport kan de leiding ook gebruikt worden als buffer. De leiding zelf heeft een bepaald volume en door de druk op te voeren kan er meer gas in de leiding worden opgeslagen. Dit wordt ook wel "line-pack" genoemd en wordt door netbeheerders ingezet om wisselingen in de gasvraag op te vangen. Dit geeft enkele uren speling, wat voldoende tijd is om de waterstofproductiecapaciteit te verhogen. Gezien de korte afstand van de nieuwe leiding zelf schatten wij in dat deze maar een beperkte line-pack heeft, maar zal het grotere leidingnetwerk waar op wordt aangesloten wel voldoende buffercapaciteit kunnen bieden.

3.1.4 Veiligheid

De veiligheid voor gastransport via leidingen is vastgelegd in het Besluit Externe Veiligheid Buisleidingen (BEVB). Dit besluit is ook van toepassing op waterstof en beschrijft de minimaal benodigde veiligheidsafstand waarbij de kans op een dodelijk incident minimaal is (10^{-6}). Deze mag maximaal 5 meter vanaf het hart van de leiding zijn. Echter kan lokale regelgeving anders voorschrijven. De beoordeling of de leiding aan de voorschriften voldoet wordt tijdens de meer gedetailleerde ontwerpfase

meegenomen. Enkele mogelijkheden voor het verkleinen van het risico zijn door, de druk te verlagen, de leidingwand dikker uitvoeren, de leiding dieper in de grond te leggen of de leiding af te schermen met een lint of een betonnen plaat om zo de kans op een incident bij graafwerkzaamheden te verkleinen.

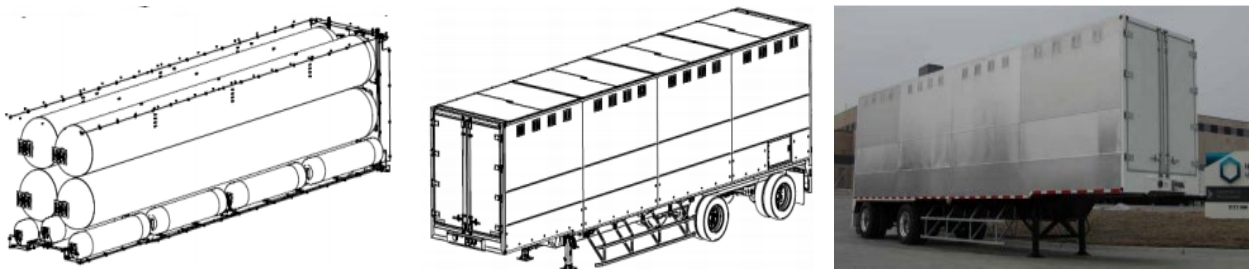
3.2 Waterstoftransport met een tube-trailer

Voor waterstoftransport met tube-trailers wordt aangenomen dat waterstof in het havengebied wordt getankt en via de weg naar de beoogde ketellocatie in Zwijndrecht wordt getransporteerd, een traject van zo'n 40 km. Hierbij worden de uitgangspunten uit hoofdstuk 2 gehanteerd voor de technische beoordeling en voor de capaciteitsberekeningen. Voor de waterstoflevering middels tube-trailers is een fabrikant benaderd om te achterhalen wat de huidige stand der techniek is en welke technische aspecten van belang zijn. De technische aspecten zijn meegenomen in de berekeningen en er wordt inzicht gegeven in de waterstoflevering onder verschillende omstandigheden. Daarnaast is voor waterstoflevering middels tube-trailers extra aandacht besteed aan veiligheid gezien de huidige onzekerheden in regelgeving en de verwachtte gevoelige publieke perceptie.

3.2.1 Huidige stand der techniek en ontwikkelingen

Een veelgebruikte methode voor waterstoftransport over de weg is middels tube-trailers. Cilindervormige tanks, gemaakt van staal of bij hogere drukken van vezel versterkt composiet, worden onder hoge druk met een vrachtwagen vervoerd. De drukken variëren veelal tussen de 200 en 600 bar waarbij de transportcapaciteit afhankelijk is van de druk. Bij 200 bar is de transportcapaciteit rond de 450-600 kg en bij 500 bar, 800-1200 kg. Om de capaciteit te vergroten kan er worden gedacht aan hogere drukken of transport van vloeibaar waterstof. Transport van vloeibaar waterstof is al mogelijk, maar is erg kostbaar aangezien het waterstof tot extreem lage temperaturen moet worden gekoeld en gekoeld moet blijven. In dit onderzoek wordt enkel gekeken naar waterstoftransport middels tube-trailers. Onderstaande afbeelding geeft een beeld van hoe een tube-trailer wordt ingericht.

Figuur 6: Weergave tube-trailer.



Bron: Hexagon-Lincoln

Wanneer een tube-trailer wordt gevuld en geleegd treden er grote drukverschillen op die mogelijk kunnen zorgen voor materiaalstress. Om dit te voorkomen wordt de tube-trailer niet volledig tot atmosferische druk geleegd. Meestal wordt er een minimale druk van zo'n 50-100 bar gehanteerd en blijft er dus nog waterstof achter in de tube-trailer, het zogenaamde kussengas. Daarnaast wordt rekening gehouden met de tijd van het vullen en legen van de tube-trailer. Ook dit is om grote drukschommelingen te voorkomen, maar ook om te voorkomen dat de temperaturen te hoog oplopen. Door de fysische eigenschappen ("Joule-Thomson") van waterstof warmt het gas op bij zowel compressie als bij decompressie. Voor het vullen van de tube-trailer wordt daarom zo'n twee uur gehanteerd en voor het legen een uur. Dit is echter afhankelijk van de druk.

3.2.2 Capaciteit

Als veel voorkomend voorbeeld is een 350 bar tube-trailer gekozen voor de waterstoflevering aan het warmtenet in Zwijndrecht. De tube-trailer heeft een effectieve capaciteit van 900 kg waterstof. Wanneer de tube-trailer leeg is duurt het grofweg 3 uur en 20 minuten om de tube-trailer weer te hervullen, 2 uur voor het vullen en twee keer 40 minuten rijden[3]. Om deze tijd te overbruggen is er in de worst-case situatie bij volledige back-up een buffer nodig van 540-850 kg waterstof voor de case met 805 appartementen. Een tweede tube-trailer is een mogelijke oplossingen. Hierbij dienen de tube-trailers zelf als buffer en wordt er vanuit de tube-trailer rechtstreeks aan de waterstofketel geleverd. Andere mogelijke opties zijn een vaste waterstofopslag van 540-850 kg waterstof of een warmtebuffer van 21-33 MWh. Deze opties worden niet verder behandeld in deze studie.

Voor de cases met 3.000 en 8.000 appartementen zijn twee tube-trailers niet meer voldoende door de hogere waterstofvraag. Voor 3.000 appartementen zijn 4-7 tube-trailers nodig en 9-16 voor de 8.000 appartementen. Hierbij wordt rekening gehouden met de vultijd van minimaal 2 uur en de leegtijd van minimaal 1 uur. De grote aantallen benodigde tube-trailers lijken in deze laatste cases te zorgen voor een onrealistische situatie. Onderstaande tabel geeft inzicht in de tijdsduur waarbij de waterstofketel op maximale capaciteit kan worden voorzien van waterstof uit een tube-trailer voordat die moet worden verwisseld en wordt ook aangegeven hoeveel tube-trailers er in totaal nodig zijn.

Tabel 4: Tijd voordat de tube-trailer moet worden verwisseld en benodigd aantal tube-trailers (350 bar en volledige back-up)

Appartementen	***laag (7kW)***		***hoog (11kW)***	
	Levertijd uit 1 tube-trailer	*Aantal tube-trailers*	*Levertijd uit 1 tube-trailer*	*Aantal tube-trailers*
805	5 h/25 m	2	3 h/12 m	2
3.000	1 h/21 m	4	52 m	5
8.000	30 m	9	19 m	12

Voor bovenstaande getallen wordt een worst-case situatie verondersteld, maar in een meer gebruikelijke situatie ligt de maximaal benodigde capaciteit lager (zoals in hoofdstuk 2.3 is besproken). Voor back-up wordt het benodigde vermogen in de winter en zomer op 80% en 20% van het totale vermogen geschat. Voor de back-up levering van 805 appartementen zijn er in de winter zo'n 4-6 tube-trailers per dag nodig en in de zomer 1 per dag. Tabel 5 geeft voor de verschillende cases inzicht in het aantal benodigde tube-trailers per dag voor de back-up in de winter en in de zomer.

De inzet als back-up komt echter maar incidenteel voor. Bij de inzet van waterstof voor de piekvoorziening wordt de warmtelevering voor een groot deel ingevuld door de duurzame warmtebron die de basislast levert en wordt alleen de resterende energievraag ingevuld door de waterstofketel. In hoofdstuk 2.3 was de energievraag voor de piekvoorziening gesteld op 20% van de totale jaarlijkse energievraag. Voor de 805 appartementen zijn daarvoor 79 tube-trailer leveringen per jaar nodig. Het aantal tube-trailers per jaar voor de piekvoorziening wordt eveneens in onderstaande tabel weergegeven.

[3] In de route wordt om veiligheidsredenen de Botlektunnel vermeden. Deze is verboden voor gevaarlijke vaste stoffen, vloeistoffen en gassen (zoals waterstof). Dit is aangeduid met ADR-gevarenklasse D.

Tabel 5: Aantal tube-trailers per dag of per jaar voor back-up in een winter- of zomersituatie of als piekvoorziening					
Appartementen	**Back-up winter (80%)**		**Back-up zomer (20%)**		**Piekvoorziening**
	laag (7kW)	*hoog (11kW)*	*laag (7kW)*	*hoog (11kW)*	
805	4 /d	6 /d	1 /d	1 /d	79 /j
3.000	14 /d	22 /d	4 /d	6 /d	293 /j
8.000	38 /d	59 /d	9 /d	15 /d	782 /j

3.2.3 Opslag

Bij de inzet van de waterstofketel als back-upsysteem is leveringszekerheid een belangrijk aspect. Afhankelijk van het niveau van leveringszekerheid kan een opslag nodig zijn wanneer de waterstoflevering wordt belemmerd. Bij waterstoflevering via de weg is dit risico redelijkerwijs hoger. Zo kan de levering worden verstoord door autopech, een opengebroken straat, file of andere omstandigheden. Om inzicht te geven in de benodigde opslag is daarom de benodigde opslagcapaciteit voor een dag en voor een week berekend. De berekening gaat uit van de worst-case situatie en een continue belevering. Onderstaande tabel geeft inzicht in de benodigde opslagcapaciteiten.

Tabel 6: Benodigde opslagcapaciteit voor 24 uur en 1 week bij volledige back-up.				
Appartementen	**24 uur**		**1 wk**	
	laag (7kW)	hoog (11kW)	laag (7kW)	hoog (11kW)
805	4,316 kg	6,783 kg	30,213 kg	47,478 kg
3.000	16,085 kg	25,277 kg	112,596 kg	176,936 kg
8.000	42,894 kg	67,404 kg	300,255 kg	471,830 kg

3.2.4 Veiligheid

De tube-trailer, zoals die in deze studie wordt beschouwd, wordt ingezet als een mobiele opslag. Veiligheidsaspecten zijn hierbij van belang voor zowel de opslag op de ketellocatie in Zwijndrecht, maar ook tijdens transport op de weg. Voor het bepalen van de route was al rekening gehouden met transport door de Botlek tunnel. In deze paragraaf wordt voornamelijk aandacht besteed aan de veiligheid van de opslag op de ketellocatie en wordt de situatie tijdens transport op de weg verder buiten beschouwing gelaten.

Voor de veiligheid op de ketellocatie wordt onderscheid gemaakt tussen externe en interne veiligheid.

Externe veiligheid - Externe veiligheid omvat de veiligheidsaspecten en invloed buiten de grenzen van de ketellocatie. Hierbij wordt veelal het plaatsgebonden risico gehanteerd, wat wordt gedefinieerd als de "de kans per jaar dat een persoon, die zich continu en onbeschermd op een bepaalde plaats bevindt, overlijdt als direct gevolg van een ongeval met gevaarlijke stoffen bij een risicovolle activiteit". In Nederland is bepaald dat deze kans niet groter mag zijn dan 1 op de 1 miljoen per jaar (10^{-6}/jaar). Voor de tube-trailer op de ketellocatie kunnen hiervoor de voorschriften in het "Besluit kwaliteit leefomgeving"[4] (Bkl) worden gehanteerd. In 2021 wordt een vernieuwde versie van het Bkl ingevoerd waarin op dit moment een afstand voor het plaatsgebonden risico wordt voorgeschreven van 35 m vanaf het vulpunt van de tube-trailer. Dit betekent dat de afstand rondom het vulpunt van de tube-trailer tot aan de grenzen van de ketellocatie niet minder dan 35 m mag zijn. Dit zorgt op de ketellocatie voor ernstige beperkingen aangezien overal op het terrein de afstand tussen de grenzen van de locatie kleiner zijn dan 35 m.

[4] In het Bkl worden inhoudelijke normen gesteld voor gemeenten, provincies en waterschappen voor het realiseren van nationale en internationale veiligheidsdoelstellingen.

In de voorschriften wordt op dit moment geen mogelijkheid geboden aan een meer situatie specifieke beoordeling middels een risicoanalyse (QRA). Op dit moment wordt de mogelijkheid voor het toevoegen van een QRA voorgelegd aan de overheid waarmee de afstand in een aantal situaties mogelijk kan worden verkleind.

In eerder onderzoek is door DNV GL een analyse uitgevoerd naar de veiligheidsrisico's van waterstofopslag in tube-trailers onder verschillende scenario's. De meest relevante (schadelijke) scenario's zijn hieronder opgesomd.

- Afbreken vulslang cilinderpakket – fakkelbrand
- Afbreken van afsluiter tubetrailer door botsing – fakkelbrand
- Afbreken van afsluiter op cilinderpakket op trailer door botsing - fakkelbrand

Deze scenario's zijn op te lossen door technische maatregelen als betere veiligheidsvoorziening voor de vulslang en stootranden of hekken om een botsing te voorkomen. Hiermee wordt de kans op een dodelijk ongeval verkleind en daarmee mogelijk ook de afstand voor het plaatsgebonden risico.

Interne veiligheid - Ook op het terrein zelf is veiligheid van belang om schade aan personeel en materiaal op het terrein te voorkomen. Dit wordt aangeduid als interne veiligheid. Enkele aanbevelingen worden hieronder benoemd. Daarnaast worden ook enkele aanbevelingen overgenomen uit de PGS-35[5].

- Tijdens aansluiten van de tube trailer moet men rekening houden dat geen externe ontstekingsbronnen (roken, slijpwerkzaamheden etc.) plaatsvinden nabij de tube trailer.
- Bij het parkeren van de tube-trailer is het raadzaam om dit zodanig te doen dat bij een ongeval direct kan worden weggereden met minimale manoeuvres en een vrije rijrichting.
- Ophoping van waterstof moet zoveel mogelijk worden voorkomen zodat er geen explosief mengsel ontstaat in een afgesloten ruimte. Het is daarom raadzaam om de tube-trailers in de buitenlucht te parkeren en niet in een gebouw of onder een overkapping.
- Het gebied rondom de tube-trailer zou vrij moeten zijn van brandbare objecten zoals vegetatie binnen een straal van 4 m.
- Om domino-effecten te voorkomen wordt in de PGS-35 een indicatie gegeven voor minimale interne afstanden. Voor de afstand tussen de tube-trailer en een gebouw, zoals het ketelhuis, wordt een minimale interne veiligheidsafstand van 5 meter voorgeschreven voor een tube-trailer van 200 bar en 8 meter voor 500 bar. Op die afstand wordt de warmtestraling geschat op niet meer dan 10 kW/m² wat wordt gezien als de grens voor schade aan gebouwen.

3.3 Waterstofketel

Binnen DNV GL is een inventarisatie uitgevoerd naar de toepassingsmogelijkheden van waterstof als brandstof voor brander/ketelsystemen voor warmteproductie. Doordat waterstofbranders op dit moment volop in ontwikkeling zijn en vanwege de nauwe betrokkenheid van DNV GL hierin wordt voor de branders extra aandacht besteed aan de huidige stand der techniek en de relevante ontwikkelingen.

Op basis van interviews met branderfabrikanten is de huidige stand der techniek en de ontwikkeling van waterstofbranders in kaart gebracht. Daarnaast is op basis van beschikbare kennis binnen DNV GL, aangevuld met berekeningen, inzichtelijk gemaakt welke fysische- en chemische veranderingen plaatsvinden bij de overstap van aardgas naar waterstof gestookte branders. Naast waterstofbranders wordt ook een inventarisatie gedaan naar de mogelijkheid van brandstof flexibele systemen die geschikt zijn voor aardgas, aardgas/waterstofmengsels en waterstof.

[5] De PGS-35, "Publicatiereeks gevaarlijke stoffen", geeft richtlijnen voor autoriteiten voor de belangrijkste risico's van activiteiten met gevaarlijke stoffen (zoals waterstof) voor de veiligheid en gezondheid van werknemers, veiligheid van de omgeving en de brandveiligheid.

3.3.1 Huidige stand der techniek en ontwikkelingen

In maart 2020 zijn drie leveranciers van warmwater- en stoomketels geïnterviewd. Hieruit is naar voren gekomen dat op dit moment nog geen waterstofketelbranders beschikbaar zijn, maar is de interesse uit de markt de afgelopen maanden wel toegenomen. Dit heeft de fabrikanten een impuls gegeven en heeft recent geleid tot de start van de ontwikkeling van waterstofgestookte ketels voor stoom- en warmwaterproductie. Bij deze ontwikkeling zijn een aantal uitdagingen te overwinnen voordat het product marktrijp is. De uitdagingen hebben onder andere te maken met de grote verschillen in (verbrandings)eigenschappen tussen waterstof en aardgas.

De fabrikanten geven de volgende uitdagingen aan:

- De vlamtemperatuur neemt toe bij toepassen waterstof waardoor de NO_x emissie boven de wettelijke norm van 70 mg/m3 (3% O2) uit kan komen.
- Waterstof heeft een hogere verbrandingssnelheid waardoor oververhitting van het branderdek kan plaatsvinden en problemen bij het starten van de brander kan ontstaan.
- Bij de verbranding van waterstof ontstaat meer water dus moet (indien aanwezig) de condensor vergroot worden.
- Mogelijk verandering van het waterdauwpunt waardoor condensatie in het rookgaskanaal kan plaatsvinden met als gevolg dat corrosie in het rookgaskanaal plaatsvindt.
- Waterstof is duurder dan aardgas en dus is het belangrijk om behoud van rendement te garanderen bij het ontwerp van de brander/ketelcombinatie.
- Aardgasgestookte branders hebben vaak een ionisatie pen als vlambewakingssysteem; geen ionisatie betekent geen vlam en dus gaat de gasklep automatisch dicht. Echter, waterstof produceert slechts een kleine ionisatie stroom in de vlam waardoor het vlambewakingssysteem vervangen moet worden door een alternatief zoals UV-detectie.
- De explosiegrenzen en ontstekingsenergie van waterstof verschillen met die van aardgas. Deze parameters moeten als input dienen voor de veiligheidsberekeningen/ontwerp.
- Er bestaat nog onzekerheid over odorisatie van waterstof. Dit wordt op dit moment nog niet gedaan wat leidt tot onzekerheid over de benodigde veiligheidsvoorziening.

Om de ontwikkeling van waterstof gestookte industriële branders te faciliteren is binnen DNV GL een project[6] gestart waaraan cica 30 partijen aan deelnemen in het kader van het TSE H2 subsidie traject. Binnen dit consortium worden in samenwerking met (internationale) branderfabrikanten onder andere brandersystemen ontwikkeld/geoptimaliseerd en getest voor warmwaterketels.

Het tijdspad van de ontwikkeling van de waterstofbranders hangt af van de testresultaten die worden behaald binnen dit project. Als de testen succesvol zijn dan is de volgende stap het uitvoeren en monitoren van het gedrag van de brander bij lange duurtesten. Vervolgens moet de brander gecertificeerd worden voor waterstof.

Naar verwachting van de door DNV GL geïnterviewde branderfabrikanten is binnen circa 2-3 jaar (2022-2023) een brander beschikbaar op de markt die geschikt is voor waterstof.

Enkele bovengenoemde uitdagingen worden op dit moment behandeld in een proefopstelling op het terrein van DNV GL. Enkele eerste uitkomsten worden hieronder toegelicht. Om de uitkomsten beter te begrijpen wordt eerst het verbrandingsgedrag van de brander algemeen toegelicht.

Verbrandingsgedrag brander - Zoals aangegeven door de branderfabrikanten leidt de overgang van aardgas naar waterstof tot verandering van de verbrandingseigenschappen en fysische

[6] Het project bestaat uit twee fasen. In fase 1 worden de brandersystemen getest en geoptimaliseerd bij DNV GL en in fase 2 wordt bij Nedmag een demonstratieproject uitgevoerd. Binnen dit demonstratieproject wordt de brander van het oliefornuis vervangen door een 2MW (concept)brander die geschikt wordt gemaakt voor flexibele hoeveelheden waterstof in aardgas (0-100% H_2).

eigenschappen (Tabel 7 en Tabel 8), dit heeft gevolgen voor de veiligheidsmaatregelen en de prestaties van de brander. Op basis van literatuuronderzoek, berekeningen en metingen uitgevoerd door DNV GL zijn deze veranderingen kwantitatief in kaart gebracht om inzicht te geven welke maatregelen ondernomen moeten worden bij gebruik van waterstof als brandstof voor industriële branders.

Tabel 7: Fysische parameters voor Groningengas (G-gas) en waterstof

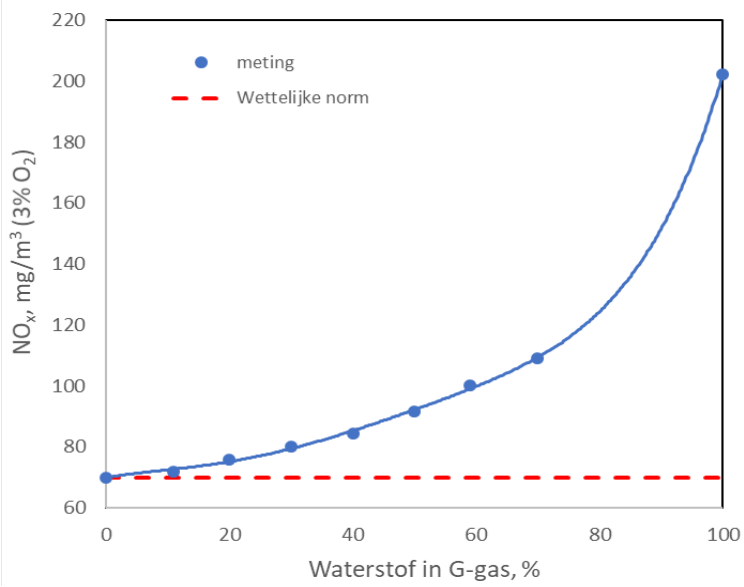
	G-gas	Waterstof
LEL, %	5.8	4.0
UEL, %	16.7	75.3
Minimale ontstekingsenergie (bij stoichiometrische mengsel)	0.274	0.017
Zelfontbrandingstemperatuur, °C	630	520
Waterdauwpunt (bij 3% rest zuurstof in rookgas)	55.7	72.6
Wobbe index, MJ/m³ (25, 0)	43.75	48.35
Calorische onder waarde, MJ/m³n	30.86	10.79
Calorische boven waarde, MJ/m³n	34.24	12.75
Dichtheid, kg/m³n	0.79	0.09

Tabel 8: Fysische parameters voor G-gas en waterstof (λ=1.25)

	G-gas	H_2
H_2O, mol%	15.2	28.3
N_2 mol%	72.2	66.5
O_2 mol%	3.7	3.3
Ar mol%	7.6	0.8
Overige	0.8	1.1
T_{vlam}, °C	1708	1895

Terugdringen NO_x - In Tabel 7 en Tabel 8 staan de eigenschappen voor Groningengas (G-gas) en waterstof weergegeven. Bij overgang van de Groningergas (G-gas) naar waterstof neemt de Wobbe-index toe. Dit betekent dat bij dezelfde druk in de brandstofleiding de thermische belasting toeneemt en het restzuurstofpercentage in de rookgassen afneemt (rijke verbranding). Om dit tegen te gaan moet de brander opnieuw worden afgesteld. Een grotere uitdaging is de toename van de vlamtemperatuur. Ter illustratie is een voorbeeldberekening uitgevoerd voor een brander op waterstof en G-gas bij een luchtfactor van λ=1.25. De berekeningen, uitgevoerd in een evenwichtsmodel, geven aan dat de vlamtemperatuur toeneemt van 1708 °C naar 1895 °C bij overgang van G-gas naar waterstof. Testen bij DNV GL in een 500 kW ketel/brander combinatie laat zien dat de toename van de vlamtemperatuur tot gevolg heeft dat de NO_x emissie drastisch toeneemt en de wettelijke limiet met een factor 3 overschrijdt Figuur 7.

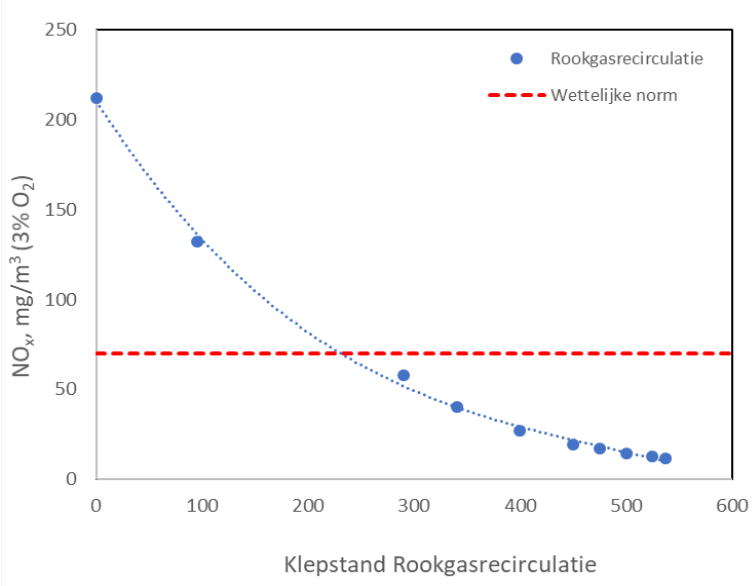
Figuur 7: Gemeten NOx emissie bij verschillende waterstofpercentages in de 500 kW ventilator voorzetbrander (niet voorgemengde brander)



Bron: DNV GL

Om de NO_x emissie terug te brengen is als mitigerende maatregel rookgasrecirculatie toegepast[7] NOx mitigerende maatregel toegepast. Door het toepassen van rookgastrecirculatie wordt de verbrandingslucht verdund met teruggevoerde inerte rookgassen waardoor de vlamtemperatuur daalt en daarmee daalt ook de NOx productie. In Figuur 8 is waar te nemen dat het toepassen van rookgasrecirculatie een zeer effectieve strategie is om de NOx te verlagen. Deze methode wordt momenteel in het DNV GL verbrandingslab momenteel geoptimaliseerd samen met branderfabrikanten[8].

Figuur 8: Effect toepassen rookgasrecirculatie op NOx emissie bij toepassen van puur waterstof in de 500 kW ventilator voorzet brander



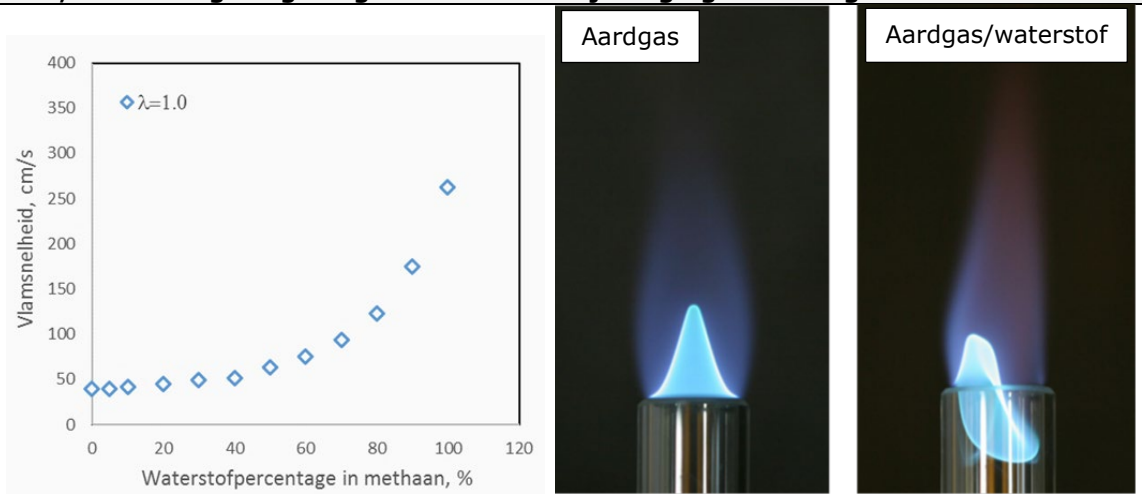
Bron: DNV GL

[7] Project is uitgevoerd voor EZK/RVO, SBIR project 'Varigas' (2018-2019). In dit project is een brandstof adaptief brander systeem ontwikkeld voor waterstof/aardgasmengsels

[8] TSE/TKI project 'hydrogen as a fuel for heating processes'. Binnen dit project met 3 industriële partners worden branders geschikt gemaakt voor waterstof/aardgasmengsels (100% waterstof). De focus ligt op mitigeren NOx emissie, vlamstabiliteit en warmteoverdracht naar product.

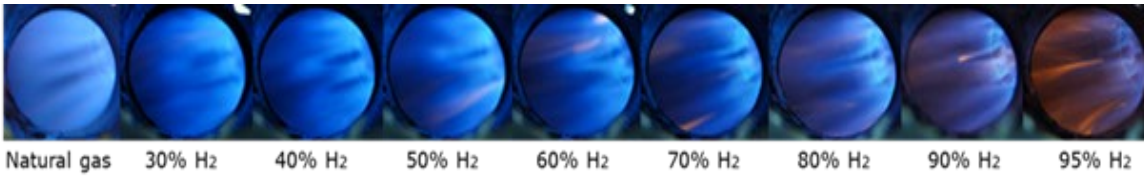
Verbrandingssnelheid - In Figuur 9 is waar te nemen dat de verbrandingssnelheid aanzienlijk toeneemt bij oplopende waterstofpercentages in aardgas. Bij voorgemengde brandersystemen heeft de toename van de verbrandingssnelheid tot gevolg dat de vlam dichter op het branderdek gaat branden. In figuur 7 (rechter plaatje) is te zien dat de vlam de branderpoort binnendringt wat leidt tot oververhitting van de brander. Bij verdere toename van het waterstofpercentage zal de vlam volledig in de branderpoort binnendringen waardoor vlaminslag ontstaat, hetgeen ongewenst is. Voorgemengde branders zijn om deze reden vaak ongeschikt voor hoge waterstofpercentages. Voor het toepassen van hoge waterstofpercentages of puur waterstof is het aan te raden om niet-voorgemengde branders te gebruiken. In industriële stoom en warmwaterketels worden vaak ventilator voorzetbranders toegepast, dit zijn niet-voorgemengde branders. De toename van de verbrandingssnelheid in dit type branders leidt vaak niet tot vlaminslag maar kan wel oververhitting van de branderkop veroorzaken doordat de vlam dichter op de branderkop kan gaan branden. Bij de experimenten uitgevoerd door DNV GL met de 500 kW boiler is echter geen oververhitting van de ventilator voorzetbrander (van de firma Zantingh) ontstaan. Over het gehele bereik van 0-100% waterstof in aardgas blijft de vlam stabiel zoals waar te nemen in Figuur 10. De blauwe kleur van de aardgas-/waterstofvlam wordt veroorzaakt door de emissie van koolstof houdende componenten en de oranje kleur van de waterstofvlam wordt veroorzaakt door het emissiespectrum van waterdamp.

Figuur 9: links, Verbrandingssnelheid bij oplopende waterstofpercentages in methaan, berekeningen uitgevoerd in het numerieke programma Premix met het GRI 3.0 mechanisme.
Rechts, Vlaminslag als gevolg van waterstofbijmenging aan aardgas



Bron: DNV GL

Figuur 10: vlambeeld aardgas, aardgas/waterstof en puur waterstof gemeten in de industriële boiler waarin een ventilator voorzetbrander in is geplaatst.



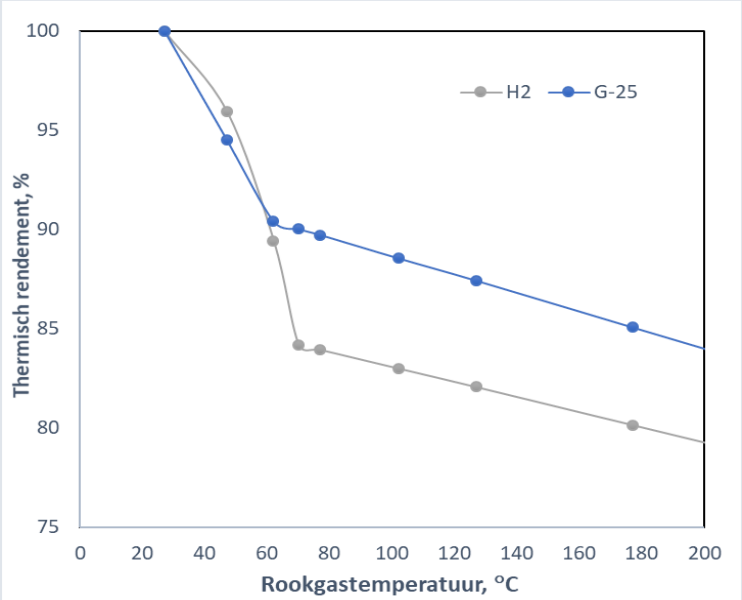
Bron: DNV GL

Waterdamp - De rookgassamenstelling verandert bij overgang van G-gas naar waterstof zoals waar te nemen in Tabel 8. De toename van waterdamp met een factor twee heeft tot gevolg dat meer waterdamp moet worden afgevoerd. Dit heeft tot gevolg dat een grotere condensor moet worden

geïnstalleerd. De toename van de waterconcentratie in de rookgassen heeft ook tot gevolg dat het waterdauwpunt afneemt van 55.7 °C voor G-gas naar 72.6° C voor waterstof. Dit betekent dat voor waterstof bij hogere temperaturen condensatie van water ontstaat wat uiteindelijk tot corrosie kan leiden in het rookgaskanaal. Tijdens het ketelhuisontwerp moet hier rekening mee worden gehouden (condenseren water, juiste materiaalkeuze etc.).

Efficiency - Doordat waterstofverbranding veel meer waterdamp genereert is het aan te bevelen het water te condenseren (condensatie enthalpie) omdat anders het rendement af neemt ten opzichte van G-gas. Deze afname van het rendement kan volgens berekeningen, weergegeven in Figuur 11, oplopen tot circa 6%. Bij rookgastemperaturen lager dan 55 °C (dauwpunt) is het rendement van waterstof en G-gasverbranding min of meer gelijk.

Figuur 11: Thermisch rendement van G-gas en waterstof.



Bron: DNV GL

3.3.2 Capaciteit

De uitgangspunten, ontwerp criteria en ketelvermogens zijn in samenwerking met ketelfabrikant Zantingh gemaakt. Voor het totaal benodigde ketelvermogen bij de verschillende scenario's, zoals eerder bepaald in hoofdstuk 2.3.1, zijn er verschillende uitvoeringsopties mogelijk. Als voorbeeld, 30 MW warmte kan op meerdere manieren geproduceerd worden (2 ketels van 15 MW, 3 ketels van 10 MW, enz.), de keuze is afhankelijk van de gewenste redundantie. Bij warmtenetten is naast de investering in ketels ook de betrouwbaarheid van belang. Tabel 9 geeft voor de verschillende scenario's inzicht in de geselecteerde voorbeeldcombinaties die voor deze studie als (realistisch) uitgangspunt zijn gekozen.

Tabel 9: Overzicht van benodigde totale verwarmingscapaciteit.

Appartementen	***laag (7kW)***		***hoog (11kW)***	
	Benodigde capaciteit	*Geselecteerd ketelvermogen*	*Benodigde capaciteit*	*Geselecteerd ketelvermogen*
805	7 MW	1x 8,4 MW	11 MW	1x 12 MW
3.000	26 MW	3x 9,6 MW	41 MW	3x 14 MW
8.000	70 MW	5x 14 MW	110 MW	8x 14 MW

3.3.3 Veiligheid

Uit de Tabel 7 is waar te nemen dat de minimale ontstekingsenergie voor waterstof lager is dan voor aardgas wat betekent dat waterstof eerder ontstoken kan worden. Daarnaast zijn de verhoudingen van gas en lucht waarbinnen een brandbaar mengsel mogelijk is veel wijder voor waterstof. Dit zijn de zogenaamde onderste (LEL) en bovenste explosiegrenzen (UFL). Ook is de zelfontbrandingstemperatuur van waterstof lager dan dat van aardgas.

Omdat waterstof (nog) niet geodoriseerd is, wordt een waterstoflekkage niet opgemerkt. Om deze reden is het aan te bevelen om waterstofsensoren te plaatsten in het ketelhuis. Deze waterstofsensoren moeten op strategische plekken worden gemonteerd. Omdat waterstof veel lichter is dan lucht stijgt de waterstof snel omhoog. Het is daarom aan te raden de waterstofsensoren op hoogte (plafond) te monteren. Daarnaast is het bij het ontwerp aan te bevelen om in het ketelhuis de brandstofleidingdruk te minimaliseren zodat bij lekkage de uitstroom gering is. In het geval van een tube trailer met een tankdruk van 350 bar betekent dit dat het gas gereduceerd wordt via twee of drie trappen naar 100mbar, waarna vervolgens de leiding het ketelhuis binnen gaat

4 RUIMTELIJKE ASPECTEN

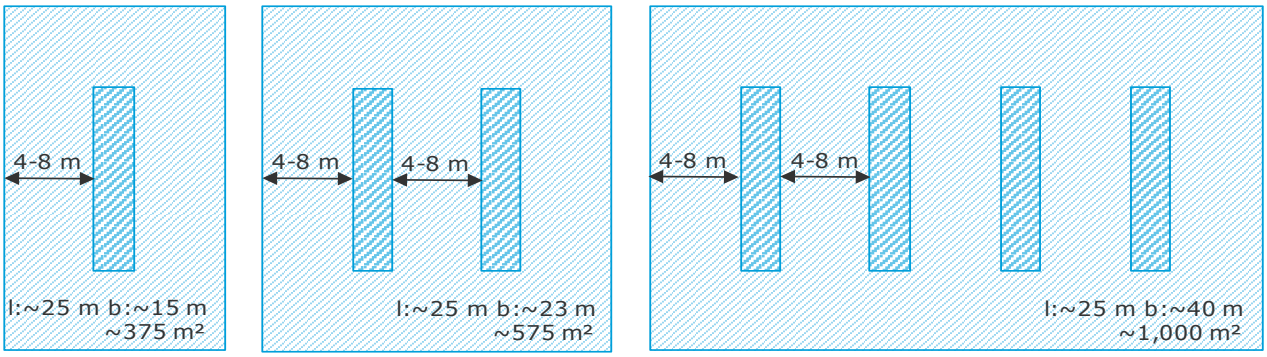
In dit hoofdstuk wordt een inschatting gegeven van de dimensies van de verschillende componenten die op de ketellocatie worden geplaatst. Hierbij wordt voornamelijk gekeken naar de tube-trailers en het ketelhuis aangezien dit de grootste en de meest relevante componenten zijn. De andere aspecten zoals de meteropstelling voor de waterstofleiding, parkeerplaatsen en toegangswegen worden buiten beschouwing gelaten. Daarnaast wordt ter illustratie voor de case met 805 woningen op hoofdlijnen een terreinindeling gemaakt.

4.1 Tube-trailers

Voor de inschatting van de afmetingen wordt fabrikantinformatie gebruikt en worden de uitgangspunten en input uit het vorige hoofdstuk gebruikt. Om de compatibiliteit binnen het wegtransport zo gemakkelijk mogelijk te maken worden voor de tube-trailers standaardmaten gebruikt. De maten van tube-trailers komen veelal overeen met die van standaard ISO-containers waarbij voor de 350 bar tube-trailer een 45 ft. container wordt aangehouden. Deze heeft een lengte van 13.2 m, een breedte van 2.5 m en een hoogte van 2.8 m. Daarnaast dient nog rekening gehouden te worden met een afstand van 4-8 m rondom de tube-trailers om brandgevaar en een eventuele kettingreactie te voorkomen. De afmetingen van de opstelplaats van één tube-trailer worden daarmee grofweg geschat op 25 m bij 15 m, 375 m². Bij het opstellen van meerdere tube-trailers kan een onderlinge afstand van 4-8 m worden aangehouden. Hierbij is enkel rekening gehouden met de interne veiligheidsafstanden (tussen objecten binnen het terrein) en zijn de externe veiligheidsafstanden zoals beschreven in 3.2.4 niet meegenomen.

Ter illustratie is in onderstaande figuur een schematisch overzicht gegeven van de benodigde oppervlakte voor 1 tube-trailer, 2 tube-trailers en 4 tube-trailers.

Figuur 12: Afmetingen voor 1 tube-trailer, 2 tube-trailers en 4 tube-trailers (niet op schaal).



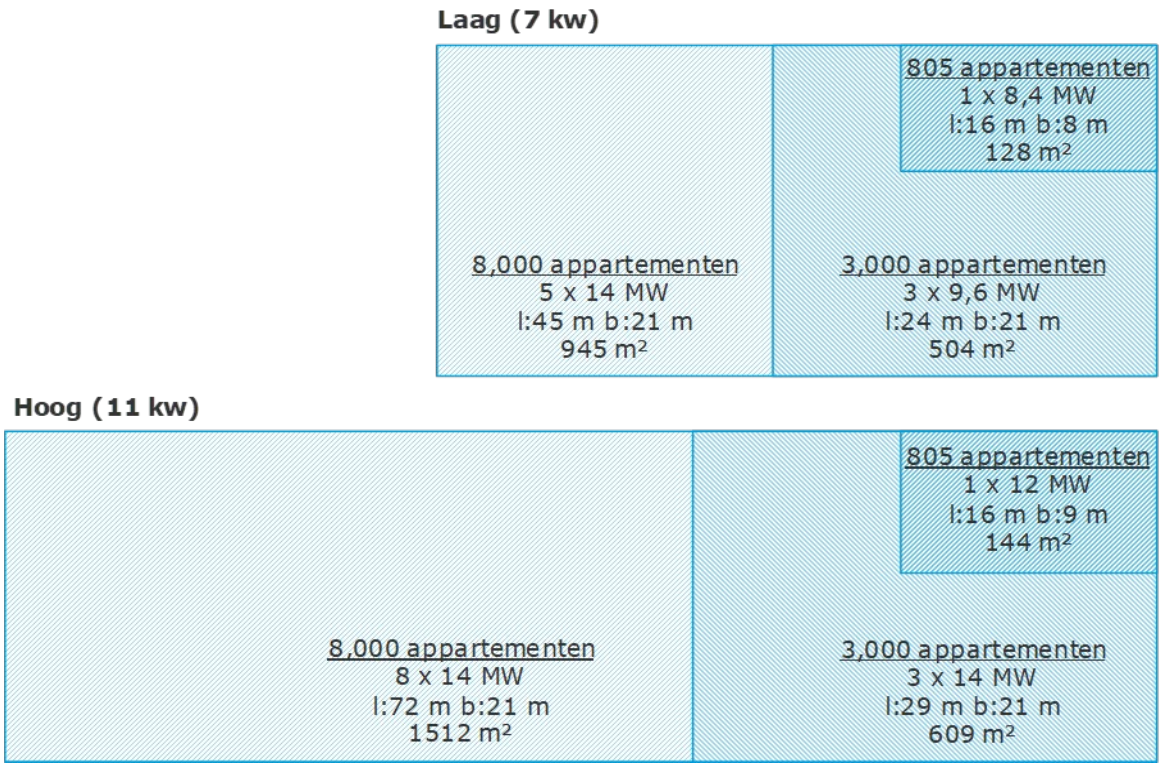
Bron: DNV GL

4.2 Waterstofketel

Op basis van de uitgangspunten uit de vorige hoofdstukken is in samenwerking met ketelfabrikant Zantingh een indeling gemaakt voor de verschillende ketelvermogens en zijn de dimensies van het ketelhuis bepaald. Voor een ketelhuis met 3x9.6 MW opgesteld vermogen is de lengte van de ketel met brander en condensor ruwweg 12 meter en de breedte van de ketel is 4 meter. Rond de ketel dient minimaal 2 meter vrijgehouden te worden. Voor een ketelhuis met meerdere ketels is het ook aan te bevelen aan de voor en achterzijde een pad van circa 5m breed te plaatsten waar de verdelers, expansievat en dergelijke worden geplaatst. Voor een ketelhuis met 3 ketels van 9.6MW moet gedacht worden aan circa 500m^2 oppervlakte. Daarnaast is de benodigde hoogte van het ketelhuis zo'n 8 m.

Op basis van een grove benadering zijn voor de verschillende cases de benodigde afmetingen en oppervlaktes weergegeven in onderstaande figuur.

Figuur 13: Afmetingen ketelhuis voor de verschillende scenario's (niet op schaal).



Bron: DNV GL

Ter illustratie is op onderstaande afbeelding een voorbeeld gegeven van de indeling van een ruim bemeten ketelhuis waar de ketel met brander een substantieel deel van de ruimte in beslag neemt.

Figuur 14: Voorbeeld van een indeling van een ketelhuis.

Bron: Zantingh B.V.

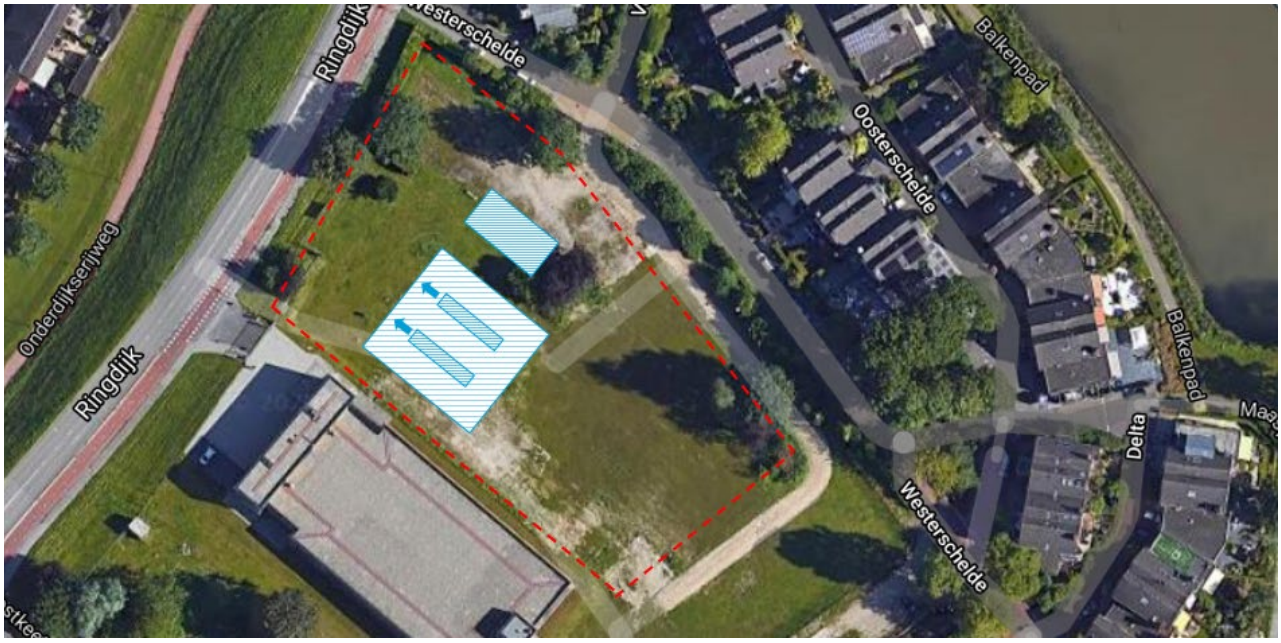
4.3 Terreinindeling

Ter illustratie is op hoofdlijnen een terreinindeling gemaakt voor de case met 805 appartementen. Hierbij is uitgegaan van de hierboven beschreven afmetingen. Daarnaast zijn de tube-trailers zo ver mogelijk van de noordelijke terreingrens, grenzend aan de woningen, gepositioneerd (>35 m) en is er rekening mee gehouden dat de rijrichting van de tube-trailers direct naar de weg is uitgelijnd, mocht er een incident plaatsvinden.

De werkelijke terreingrenzen zijn niet bekend, er is daarom ter illustratie een grove inschatting gemaakt die in onderstaande figuur in het rood wordt omlijnd. De tube-trailers (links) en het ketelhuis (rechts) zijn in blauw aangegeven.

Het valt op dat er voldoende ruimte aanwezig is om de tube-trailers en het ketelhuis op te stellen en dat er zelfs ruimte is voor uitbreiding. De veiligheidsafstanden (>35m en beschreven in 3.2.4) zoals die momenteel voor de tube-trailers worden omschreven geven echter wel beperkingen.

Figuur 15: Voorbeeld van een terreinindeling voor de case met 805 appartementen (niet opschaal).



Bron: DNV GL

5 FINANCIELE ASPECTEN

Om inzicht te geven in de kosten en als voorbereiding op een eventuele economische haalbaarheidsstudie wordt in dit hoofdstuk inzicht gegeven in de CAPEX- en OPEX-getallen voor de waterstofleiding, tube-trailers en de ketel. Hierbij is gebruikgemaakt van input van fabrikanten en eigen kennis en ervaring.

5.1 Waterstoftransport per leiding

Naast de kosten voor de leiding zelf (het staal), zoals die in 3.1 is besproken, zijn er ook kosten voor de aanleg. Deze kunnen per situatie sterk variëren. Een aantal belangrijke aspecten zijn de ondergrond, de grondwaterstand, de bereikbaarheid en of het een bebouwd gebied is waardoor wegen moeten worden opengebroken of wanneer er boringen nodig zijn. Om toch een grove kosteninschatting te geven wordt er daarom gebruikgemaakt van kostenkengetallen, gebaseerd op de realisatie van andere stalen leidingen. Hierbij worden de leidingdiameters gehanteerd zoals ze in 3.1 zijn berekend met een druk van 25 bar.

Voor 805 appartementen was een 4” leiding nodig voor zowel het hoge als het lage scenario. De kosten voor deze leiding worden ingeschat tussen de 300 en 400 k€ per km, 1,500 tot 2,000 k€ voor het hele traject van 5 km. Onderstaande tabel geeft inzicht in de leidingkosten per km voor alle cases en worden de eerder berekende diameters nog eens herhaald.

Tabel 10: Overzicht berekende leidingdiameters en kosten per km.

Appartementen	**Leidingdiameter en kosten per km**			
	laag (7kW)		***hoog (11kW)***	
805	4 inch	300-400 k€/km	4 inch	300-400 k€/km
3.000	6 inch	350-450 k€/km	6 inch	350-450 k€/km
8.000	6 inch	350-450 k€/km	8 inch	400-550 k€/km

Voor het inschatten van operationele kosten wordt voor stalen leidingen meestal een vuistregel van jaarlijks 0.5% van de CAPEX gehanteerd. Operationele kosten zijn in de begin jaren vaak lager en worden hoger naarmate de leiding ouder wordt. De totale levensduur van de leiding wordt ingeschat op 30-50 jaar, maar kan mogelijk langer functioneren zoals bij veel aardgasleidingen al is gebleken.

Bovenstaande kosten zijn berekend voor een stalen leiding. Composietleiding (versterkte PE) zijn onderhoudsarm en hebben vrijwel geen onderhoudskosten, wat over de gehele levensduur bekeken een voordeel kan opleveren ten opzichte van stalen leidingen. Door een fabrikant worden de totale (geïnstalleerde) kosten over de hele levensduur ingeschat op ongeveer de helft ten opzichte van stalen leidingen. Hierbij is op te merken dat het niet bekend is of de gehanteerde uitgangspunten representatief zijn voor de situatie zoals die in dit onderzoek wordt behandeld.

5.2 Waterstoftransport met een tube-trailer

Voor waterstoftransport met een tube-trailer splitsen wij de kosten op in twee hoofdonderdelen namelijk de kosten voor de tube-trailer, en transportkosten. Voor de kosteninschatting worden de uitganspunten in 2.1 en de berekende capaciteiten in 3.2 gehanteerd. De eventuele compressiekosten voor het op de juiste druk brengen van waterstof worden buiten beschouwing gelaten.

5.2.1 Kosten voor de tube-trailer

In 3.2 is berekend hoeveel tube-trailers er nodig zijn voor het leveren van waterstof aan de piek- en back-up ketel. De aantallen zijn berekend op basis van een 350 bar tube-trailer met een capaciteit van 900 kg waterstof en zijn voor alle cases nog eens herhaald in Tabel 11.

Voor een inschatting van de kosten is een tube-trailer fabrikant benaderd. De kosten voor een 350 bar tube-trailer zijn zo'n 650 k€. Voor de waterstoflevering voor 805 appartementen zijn de kosten dus 1,300 k€, twee maal 650 k€. In onderstaande tabel wordt inzicht gegeven in de kosten voor de andere cases.

Tabel 11: Benodigd aantal tube-trailers (350 bar en volledige back-up) en de bijbehorende CAPEX (650 k€ per tube-trailer).

Appartementen	***laag (7kW)***		***hoog (11kW)***	
	Aantal tube-trailers	*Totale CAPEX*	*Aantal tube-trailers*	*Totale CAPEX*
805	2	1,300 k€	2	1,300 k€
3.000	4	2,600 k€	5	3,250 k€
8.000	9	5,850 k€	12	7,800k€

Naast de CAPEX-kosten spelen de OPEX-kosten bij waterstoftransport met een tube-trailer een grote rol. Deze bestaan uit het onderhoud van de tube-trailer en kosten per gereden km (die hieronder verder worden behandeld). Het onderhoud aan de tube-trailer bestaat voornamelijk uit klein onderhoud, zoals smeren en kleine reparaties, inspecties en keuringen. De tube-trailer dient iedere 5 jaar te worden gekeurd. Voor een inschatting van de onderhoudskosten de tube-trailer (geen transportkosten) wordt 2% per jaar van de CAPEX aangegeven. Voor de levensduur wordt 30 jaar gehanteerd.

5.2.2 Transportkosten

Het tweede onderdeel voor de kosten van waterstoftransport met tube-trailers bestaat uit het verplaatsen van de tube-trailers tussen locaties. Voor de inschatting van de kosten voor wegtransport is gebruikgemaakt van de informatie van Evofenedex, de vereniging voor Nederlandse handels en productiebedrijven met een logistieke of internationale operatie. De vereniging publiceert jaarlijks een rapport [7] met daarin de richtlijnen en inschattingen voor de kostenontwikkeling van wegtransport. Op basis van de jaarlijkse rapporten is een inschatting gemaakt van de vaste kosten en de variabele kosten.

De vaste kosten bestaan voornamelijk uit afschrijving, vast onderhoud, verzekeringen en belastingen. Deze worden ingeschat op €32,000 per jaar. Echter zal een vrachtwagen niet altijd volcontinu worden ingezet voor de levering van waterstof en kan deze ook elders ingezet worden. Daarom worden deze vaste kosten verdeeld over een 48-urige werkweek [7].

De variabele kosten bestaan uit loonkosten, brandstofkosten en variabele onderhoudskosten (incl. slijtage van de banden). Dit kostenonderdeel is grotendeels afhankelijk van het aantal te rijden kilometers en hoe vaak de tube-trailer moet worden verwisseld. De variabele kosten kunnen worden teruggerekend naar kosten per tijdseenheid of per km. Onderstaande tabel geeft inzicht in de vaste en variabele kosten.

Tabel 12: Vaste en variabele kosten wegtransport.			
Vaste kosten	- Afschrijving - Vast onderhoud - Verzekeringen - Belastingen	12 €/h	€32,000 per jaar verdeeld over een 48-urige werkweek
Variabele kosten	- Loonkosten	25 €/h	Op basis van een 48-urige werkweek
	- Brandstofkosten	0.5 €/km	40 l Diesel per 100 km en 1.20 €/l
	- Variabele onderhoudskosten	0.1 €/km	Inclusief bandenslijtage

Voor de levering van waterstof vanuit het havengebied aan de waterstofketel in Zwijndrecht is verondersteld dat het twee uur duurt om de tube-trailer te vullen en één uur en 20 minuten duurt om heen en terug te rijden, in totaal 3 uur en 20 minuten. Daarnaast is de afstand via de weg zo'n 40 km, heen en terug 80 km. Op basis van die uitgangspunten worden de transportkosten ingeschat op zo'n €170 per levering.

Op basis van de hierboven berekende kosten en het in 3.2 bepaalde aantal leveringen per jaar zijn de transportkosten voor 805 appartementen zo'n €13,500 per jaar. In onderstaande tabel zijn de transportkosten ook voor de andere cases uitgewerkt.

Tabel 13: Transportkosten voor het verplaatsen van de tube-trailers.		
	Aantal leveringen	**Transportkosten**
805	79 /j	13,500 €/j
3.000	293 /j	50,200 €/j
8.000	782 /j	134,000€/j

5.2.3 Totale kosten voor waterstoftransport met een tube-trailer

Een totaaloverzicht voor de kosten van waterstoftransport met tube-trailers wordt hieronder gegeven. Hierin zijn de kosten voor de tube-trailer zelf en de kosten voor transport verwerkt.

Tabel 14: Totaaloverzicht van de kosten voor waterstoftransport met tube-trailers.				
Appartementen	**CAPEX**	*OPEX (2%)*	*Transportkosten*	**Totale jaarlijkse kosten**
805	1,300 k€	*26 k€*	*13.5 k€/j*	39.5 k€/j
3.000	2,600- 3,250 k€	*52-65 k€*	*50.2 k€/j*	102.2-115.2 k€/j
8.000	5,850-7,800 k€	*117-156 k€*	*134.0 k€/j*	251-290 k€/j

5.3 Waterstofketel

Voor het ontwerp van een ketelhuis en het benodigde ketelvermogen is uitgegaan van de benodigde warmtecapaciteit voor het laag (7kW) en hoog (11 kW) scenario zoals beschreven in hoofdstuk 2.3 en 3.3.2. Binnen de twee scenario's is een kostenschatting gemaakt voor een ketelhuis dat geschikt is voor 805 appartementen, 3000 appartementen en 8000 appartementen. Het outputvermogen van de ketel is daarbij gelijk aan het gevraagde warmtevermogen, inclusief de verliezen in het warmtenet. De berekende vermogens worden nog eens in Tabel 15 herhaald.

De uitgangspunten, ontwerp criteria en kostenschatting zijn in samenwerking met het bedrijf Zantingh in kaart gebracht. Voor de kostenschatting is er rekening mee gehouden dat de warmtebalans van waterstof verschilt van aardgas (rendement, Wobbe-index etc.) zoals ook besproken in 3.2. Om aan de

veilige kant te zitten is als (conservatief) uitgangspunt gekozen dat het ketelvermogen wat hoger is ten opzichte van aardgas. Doordat de rookgassen van waterstof meer waterdamp bevatten dan aardgas moet ook de rookgascondensor vergroot worden; als uitgangspunt is gerekend in deze studie met een factor 1.7 toename t.o.v. aardgas.

Naast het gewenste vermogen is ook het temperatuurtraject van belang zoals ook besproken in 3.2. Bij het ontwerp van een stalen ketel waar geen condensatie mag plaatsvinden moet rekening gehouden worden dat het waterdauwpunt circa 73 °C is ten opzichte van circa 56 °C voor aardgas (G-gas). Om condensatie van de waterdamp in de rookgassen te voorkomen mag de retourtemperatuur van stalen ketels niet lager zijn dan minimaal 75°C. Aan de afnamekant is een temperatuur traject van 35/65°C als uitgangspunt gekozen.

Voor 805 appartementen is een ketel van 8.4-12 MW gekozen waarbij de kosten worden ingeschat tussen de 780 en 920 k€. In Tabel 15 wordt een uitgebreid overzicht van de ketelvermogens en kosten weergegeven. De kosten zijn onderverdeeld in de volgende hoofdonderdelen, en zijn inclusief installatie:

- de kosten voor de ketel, inclusief de rookgascondensator, rookgasafvoer, de brandstofstraat en overig aansluitmateriaal,
- de kosten voor de brander,
- en de kosten voor het gebouw.

Tabel 15: Geselecteerd vermogen voor de ketel en de inschatting van de kosten.

	Appartementen	Capaciteit	Geselecteerd ketelvermogen	**Kosten in k€** Ketel	Brander	Gebouw	**Totaal**
Laag	805	7 MW	1x 8,4 MW	449	42	293	**783**
	3.000	26 MW	3x 9,6 MW	1,136	131	728	**1,995**
	8.000	70 MW	5x 14 MW	2,166	300	1,263	**3,729**
Hoog	805	11 MW	1x 12 MW	570	55	293	**918**
	3.000	41 MW	3x 14 MW	1,451	180	778	**2,409**
	8.000	110 MW	8x 14 MW	3,444	480	1,940	**5,864**

We merken op dat de meerkosten van een waterstof ketel(huis) ten opzichte van een aardgas ketel(huis) meevallen. De meerkosten zitten hoofdzakelijk in de brander, grotere condensor en een wat grotere ketel. Voor de brander schatten wij in, dat de prijs een factor 1.3 tot 1.5 hoger zal liggen voor een waterstofbrander (inclusief gasstraat, ventilator, rookgasrecirculatie, extra bestuurde klep, aanpassing gaskop, vlambewaking, etc.).

Naast de investeringskosten zijn er ook operationele- en onderhoudskosten, de OPEX. Deze worden exclusief de brandstofkosten ingeschat op zo'n 3% per jaar van de CAPEX.

6 CONCLUSIE

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste punten uit de verschillende onderdelen van dit rapport benoemd. Daarnaast worden aanbevelingen benoemd en zijn mogelijke vervolgstappen geïdentificeerd.

Binnen dit project zijn een aantal analyses uitgevoerd voor het gebruik van waterstof als duurzame of klimaat-neutrale optie voor de piek- en back-up voorziening van warmtenetten. Voor die toepassing is specifiek gekeken naar de ontwikkeling van een warmtenet in Zwijndrecht. De nadruk heeft hierbij vooral gelegen op de technische aspecten en de (on)mogelijkheden van het gebruik, transport en de opslag van waterstof. De onderzochte systeemcomponenten omvatten waterstoftransport middels een leiding of met tube-trailers en omvat de verbranding van waterstof in een waterstofketel. In dit project zijn (i) een aantal belangrijke uitgangspunten bepaald, (ii) is een analyse gedaan naar de technische- en veiligheidsaspecten en zijn de benodigde capaciteiten berekend, (iii) is een inschatting gemaakt van de systeem dimensies en (iv) zijn CAPEX- en OPEX-getallen gegeven van de verschillende systeemcomponenten.

De studie is gebaseerd op een drietal cases;

1. 805 appartementen, wat overeenkomt met de huidige plannen voor een warmtenet in Zwijndrecht,
2. 3.000 appartementen, om extra inzicht te geven en wat ongeveer overeenkomt met een klein dorp,
3. 8.000 appartementen, wat ongeveer overeenkomt met een groot dorp.

Het gebruik van waterstof biedt de mogelijkheid om te voorzien in de piek- en back-up functie van warmtenetten als duurzame of klimaat-neutrale oplossing. Voor 805 appartementen is de primaire energievraag (die gezamenlijk moet worden geleverd door een duurzame warmtebron en de waterstofketel) zo'n 50 TJ per jaar, waarvan 10 TJ voor de piekvoorziening. Door duurzame waterstof en een waterstofketel in te zetten voor deze piekvoorziening, in plaats van aardgas, kan er ± 500-600 ton CO_2 worden bespaard.

Waterstofketelontwikkeling

Er wordt op dit moment gewerkt aan de ontwikkeling van waterstofketels en worden verwacht in 2023 beschikbaar te zijn. Uit gesprekken met fabrikanten blijkt dat de huidige (technische) obstakels voor de waterstofketel relatief gemakkelijk zijn op te lossen. Met enkele systeemaanpassingen zoals een ander type brander, een grotere condensator en het toepassen van rookgasrecirculatie (voor het terugdringen van NO_x) is het mogelijk om binnen de systeemeisen en milieurichtlijnen te blijven en kunnen vergelijkbare rendementen worden behaald als met aardgasketels.

Waterstoflevering

De levering van waterstof kan worden voorzien vanuit het havengebied waar op dit moment grijze waterstof wordt geproduceerd en waaruit leidingen richting de omgeving van Zwijndrecht lopen. Deze waterstof dient echter wel verduurzaamd te worden om ook als duurzame optie in een warmtenet te worden ingezet.

Waterstoftransport

Voor het transport van waterstof van het havengebied naar de ketellocatie zijn leidingen en tube-trailers onderzocht. Beide opties zijn technisch mogelijk. Voor 805 appartementen kan worden volstaan met een 4" leiding of met twee tube-trailers van 350 bar. De leveringszekerheid is bij tube-trailers echter nog onzeker. Wanneer tube-trailers worden ingezet voor de voorziening van de back-up, is het nodig om de

tube-trailer meerdere keren per dag te verwisselen waarbij lokale omstandigheden zoals files of gladheid de leveringszekerheid kunnen verstoren. Voor de case van 805 appartementen is het nodig om de tube-trailer in de winter 4 keer per dag te verwisselen. Daarnaast geven de huidige veiligheidsnormen onvoldoende flexibiliteit om de tube-trailers op het beoogde terrein in Zwijndrecht te gebruiken voor opslag. Deze normen schrijven een minimale (externe) veiligheidsafstand van 35 m tot de perceelgrens voor waarbij een veiligheidsanalyse, die mogelijk tot kleinere afstanden kan leiden, wordt uitgesloten. Deze wetgeving is echter nog niet definitief en het toevoegen van een veiligheidsanalyse wordt op dit moment voorgelegd.

Afgezien van de externe veiligheidsafstanden is er voldoende ruimte op het perceel in Zwijndrecht voor zowel de tube-trailers als het ketelhuis voor de warmtevoorziening van 805 appartementen. Eventueel is er nog ruimte voor uitbreiding, echter zijn de perceelgrenzen niet nauwkeurig vastgesteld.

Kosten

Met betrekking tot de kosten lijkt voor de levering en transport van waterstof via een leiding aantrekkelijker dan transport met tube-trailers. Dit komt doordat er vlakbij (5 km) de ketellocatie aangesloten kan worden op een waterstofleiding. Voor 805 appartementen worden de investeringskosten voor de leiding worden geschat op 1.5-2 miljoen euro met een jaarlijkse onderhoudskosten van 0.5% van de CAPEX. De investeringskosten voor de tube-trailers zijn vergelijkbaar met 1.3 miljoen euro, echter zijn de onderhouds- en operationele kosten vele malen hoger, zo'n 3% van de CAPEX.

De kosten voor de waterstofketel worden geschat tussen de 0.7 en 0.9 miljoen euro. In vergelijking met de kosten voor een aardgasketel worden de kosten een factor 1.3-1.5 hoger geschat.

6.1 Aanbevelingen en vervolgstappen

Voor de verdere ontwikkeling van het inzetten van waterstof in de piek- en back-up voorziening voor het warmtenet in Zwijndrecht zijn een aantal verdiepingsstappen aan te bevelen en zijn een aantal vervolgstappen noodzakelijk. Een aantal belangrijke aspecten zijn gezien de scope van de studie enkel op hoofdlijnen behandeld of buiten beschouwing gelaten. Om deze stappen inzichtelijk te maken en een richting te geven voor verdere ontwikkeling zijn hieronder een aantal belangrijke aanbevelingen en vervolgstappen benoemd.

In deze studie is de productie van waterstof op hoofdlijnen behandeld maar is er geen diepgaande analyse gedaan naar de productie van waterstof. Enerzijds is hier meer onderzoek nodig om duurzame of klimaat neutrale waterstof in te zetten als ook een daadwerkelijk duurzame optie. Anderzijds heeft een andere bron of locatie voor waterstofproductie invloed op de berekende leidingdiameters, aantal tube-trailers en de kosten daarvan. Het is aan te bevelen om verder onderzoek te doen naar de productie en levering van waterstof.

Een verdieping in de productie van waterstof is een belangrijke input voor een volledig beeld van de kosten en de economische haalbaarheid. In deze studie is inzicht gegeven in de technische haalbaarheid waarna ook een economische haalbaarheidsstudie noodzakelijk is om onderbouwde en weloverwogen beslissingen te kunnen nemen.

In een economische haalbaarheidsanalyse zullen ook andere mogelijkheden voor een duurzame piek- en back-up voorziening moeten worden onderzocht. Daarnaast kan een flexibele brander mogelijkheden bieden om in een eerste fase te verwarmen met aardgas waarna de overstap kan worden gemaakt naar waterstof of waterstof-aardgas-mengsels.

Een logische vervolgstap is de verdere uitwerking van het concept en de locatie met de nauwe betrokkenheid van HVC. Uiteindelijk zal dit moeten leiden tot een demonstratieproject om

praktijkervaring op te doen voor het gebruik van waterstof voor de warmtevoorziening van waternetten. Dit zou mogelijk in samenwerking kunnen met meerdere partijen die samen willen aantonen dat waterstof een goede oplossing biedt voor het verder verduurzamen van de energievoorziening en in dit geval warmteoplossingen

Tot slot zijn de ontwikkelingen van wetgeving omtrent veiligheid bij tube-trailers en het toevoegen van de mogelijkheid tot een veiligheidsanalyse van belang om tube-trailers voor de huidige locatie als transportoptie te kunnen overwegen.

REFERENTIES

[1] Berenschot, „Waterstof voor warmtenetten," 2018.

[2] „Aardwarmte in Nederland - Rol EBN," EBN, [Online]. Available: https://www.ebn.nl/aardwarmte-in-nederland/rol-ebn/. [Geopend 24 04 2020].

[3] DNV GL, „Hydrogen supply and demand in 5 industrial clusters in the Netherlands," 2019.

[4] Nouryon, „BP, Nouryon and Port of Rotterdam partner on green hydrogen study," Nouryon, 15 April 2019. [Online]. Available: https://www.nouryon.com/news-and-events/news-overview/2019/bp-nouryon-and-port-of-rotterdam-partner-on-green-hydrogen-study/. [Geopend 25 March 2020].

[5] CE-Delft, „Overzicht aanpassingen Vesta MAIS," 2019.

[6] DNV GL, „Verkenning waterstofinfrastructuur," 2017.

[7] EvoFenedex, „Kostenontwikkelingen in het wegvervoer," 2018.

About DNV GL

DNV GL is a global quality assurance and risk management company. Driven by our purpose of safeguarding life, property and the environment, we enable our customers to advance the safety and sustainability of their business. We provide classification, technical assurance, software and independent expert advisory services to the maritime, oil & gas, power and renewables industries. We also provide certification, supply chain and data management services to customers across a wide range of industries. Operating in more than 100 countries, our experts are dedicated to helping customers make the world safer, smarter and greener.