

GT-170272

5 juli 2018

Toekomstbestendige gasdistributienetten



kiwa 

► **Trust
Quality
Progress**



GT-170272

5 juli 2018

Toekomstbestendige gasdistributienetten

> © 2018 Kiwa N.V.
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
worden veelevoudigd,
opgeslagen in een
geautomatiseerd
gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige
vorm of op enige wijze, hetzij
elektronisch, mechanisch,
door fotokopieën, opnamen,
of enig andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de uitgever,
alsmede van de
opdrachtgever.

Kiwa Technology B.V.
Wilmersdorf 50
Postbus 137
7300 AC Apeldoorn

Tel. 088 998 35 21
technology@kiwa.nl
www.kiwatechnology.nl

Colofon

Titel
Projectnummer
Projectmanager
Opdrachtgever
Kwaliteitsborgers
Auteurs

Toekomstbestendige gasdistributienetten
004P000909
René Hermkens
Netbeheer Nederland
Erik Polman, Theo Muselaers
René Hermkens, Sjoerd Jansma,
Michiel van der Laan, Hans de Laat,
Benjamin Pilzer, Kees Pulles

**Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van Netbeheer
Nederland. Het rapport is openbaar.**





Voorwoord

Dit rapport beschrijft een onderzoek naar de toekomstbestendigheid van de gasdistributienetten in een CO₂ neutrale en duurzame energievoorziening, dat door Kiwa Technology is uitgevoerd in opdracht van Netbeheer Nederland. Het onderzoek bouwt voort op de vier scenario's (maatschappijbeelden), die door CE Delft zijn ontwikkeld voor de energievoorziening in 2050.

Het onderzoek is mede tot stand gekomen dankzij de inbreng van een begeleidingsgroep met deelnemers vanuit alle Nederlandse gasnetbeheerders. De deelnemers aan deze groep waren:

- Frank van Alphen (Stedin)
- Michiel van Dam (Enexis)
- Henk Engberts (Coteq)
- Nick van der Hout (Westland Infra)
- Johan Jonkman (Rendo)
- Jelle Liefvering (GTS)
- Pascal te Morsche (Liander)
- Carel Lauwereijs (Enduris)

De begeleidingsgroep heeft een grote bijdrage geleverd aan het onderzoek door richting te geven aan de voortgang, actief deel te nemen aan de discussies en door informatie en input aan te leveren.

DNV-GL heeft een review uitgevoerd op een conceptversie van het rapport.

De hiermee verkregen waardevolle opmerkingen en aanvullingen zijn verwerkt in deze eindversie.



Afkortingen- en begrippenlijst

Afkortingen

| | |
|-----|---|
| CCS | Carbon Capture and Storage (afvangen en opslaan van CO ₂). |
| WEQ | Woning equivalent. Eenheid uit het rapport "Net voor de Toekomst", opgesteld door CE-Delft, waarbij een WEQ gelijkgesteld is aan een woning of 150 m ² utiliteitsbouw. |

Begrippen

| | |
|-----------------------------------|--|
| Biomethaan | (specifiek voor dit rapport) Gedeeltelijk gezuiverd of opgewerkt duurzaam gas op basis van biomassa, van mogelijk ruimere kwaliteit dan volgens de momenteel geldende MR-Gaskwaliteit (zie bijvoorbeeld de tabel in Bijlage IV, kolommen "Geschoond biogas(vergisting)" en "Methaniseringgas"). |
| Brandstofcel | Toestel dat de chemische energie van een reactie direct omzet in elektrische energie. |
| Eis voorzorgsmaatregel | Indicatie in het bedrijfsmiddelen registratie systeem van de regionale netbeheerder bij een bedrijfsmiddel, die aangeeft dat bij een KLIC-melding bij het bedrijfsmiddel aanvullende voorzorgsmaatregelen nodig zijn die de veiligheid bevorderen. |
| Groengas | Duurzaam geproduceerd gas uit biomassa dat is opgewerkt, zodat het dezelfde kwaliteit heeft als aardgas en voldoet aan de MR-Gaskwaliteit. |
| KLIC-Melding | Melding in het kabel- en leidinginformatiesysteem van het Kadaster, waarin een graafactiviteit wordt aangekondigd. Hierdoor wordt de levering van kabel- en leidinggegevens door de netbeheerder aan de graver geïnitieerd. |
| Lagetemperatuur warmtevoorziening | Warmtevoorziening (zoals CV-ketel), waarmee woningen en utiliteitsbouw worden verwarmd. |
| MR-Gaskwaliteit | Regeling van de Minister van Economische Zaken van 11 juli 2014, nr. WJZ/13196684, tot vaststelling van regels voor de gaskwaliteit (Regeling Gaskwaliteit) geldend vanaf 1-4-2016. |
| Permeatie | Het binnendringen van stoffen. Bij kunststof gasleidingen kunnen gassen, zoals water(damp), stikstof en zuurstof (de belangrijkste componenten uit de lucht), door de wand van buiten naar binnen en omgekeerd permeëren. |
| Ontstekingsenergie | De minimaal benodigde hoeveelheid energie om een gas/luchtmengsel te ontsteken. Dit is een functie van de gassoort (samenstelling), de gas/luchtverhouding, de temperatuur en de druk. |



Inhoud

| | | |
|----------|--|-----------|
| | Voorwoord | 1 |
| | Afkortingen- en begrippenlijst | 2 |
| | Inhoud | 3 |
| 1 | Samenvatting | 6 |
| 1.1 | Distributie van waterstof | 8 |
| 1.2 | Distributie van biomethaan | 10 |
| 2 | Inleiding, doelstelling en onderzoeksopzet | 13 |
| 2.1 | Achtergrond | 13 |
| 2.2 | Probleemstelling | 13 |
| 2.3 | Doelstelling | 14 |
| 2.4 | Onderzoeksopzet | 15 |
| 2.5 | Indeling rapport | 16 |
| 3 | Gekozen scenario's en bijbehorende gasnetten | 17 |
| 3.1 | Methodiek | 17 |
| 3.2 | Gekozen scenarios "Net voor de Toekomst" | 18 |
| 3.2.1 | Scenario Regie Regionaal | 18 |
| 3.2.2 | Scenario Regie Nationaal | 20 |
| 3.2.3 | Scenario Internationaal | 22 |
| 3.2.4 | Scenario Generieke Sturing | 24 |
| 3.3 | Overzicht van soorten gasnetten die ontstaan binnen de vier scenario's | 27 |
| 4 | Waterstof | 30 |
| 4.1 | Gebruik van waterstof | 30 |
| 4.1.1 | Gebruik van waterstof voor conventionele gastoestellen | 30 |
| 4.1.2 | Gebruik van waterstof voor brandstofcellen | 31 |
| 4.1.2.1 | Consequenties voor het gasnet als brandstofcellen de eindtoepassing zijn | 32 |
| 4.2 | Distributie van waterstof | 33 |
| 4.2.1 | Invloed waterstof op de materialen in het gasnet | 33 |
| 4.2.1.1 | Kunststoffen | 33 |
| 4.2.1.2 | Metalen | 33 |
| 4.2.1.3 | Micro-organismen in waterstof | 34 |
| 4.2.2 | Veiligheidsaspecten bij de distributie van waterstof | 34 |
| 4.2.2.1 | Technische aspecten van risicobeheersing | 34 |
| 4.2.2.2 | Niet-technische aspecten van risicobeheersing | 37 |
| 4.2.3 | Verrekening gas (energie) | 37 |
| 4.3 | Effecten van en maatregelen bij introductie van waterstof in bestaande gasnetten | 38 |
| 4.3.1 | Capaciteit van het gasdistributienet | 38 |
| 4.3.2 | Perceptie van veiligheid | 39 |
| 4.3.3 | Informatievoorziening gebruikers | 40 |
| 4.3.4 | Aanpassen regelgeving | 40 |



| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.3.5 | Effecten en veiligheidsaspecten van waterstof bij toestellen | 40 |
| 5 | Biomethaan | 44 |
| 5.1 | Samenstelling van biomethaan | 44 |
| 5.2 | Invloed van biomethaan op de materialen in het gasnet | 45 |
| 5.2.1 | Invloed van specifieke componenten in het biomethaan | 45 |
| 5.2.2 | Bestandheid van de momenteel toegepaste gasdistributiematerialen tegen biomethaan | 46 |
| 5.2.3 | Micro-organismen | 48 |
| 5.2.4 | Maximum concentraties | 49 |
| 5.3 | Veiligheidsaspecten bij de distributie en het gebruik van biomethaan | 50 |
| 5.3.1 | Effectiviteit van de odorisatie | 50 |
| 5.3.2 | Maatregelen voor de bepaling van de gaskwaliteit | 50 |
| 5.3.3 | Aanpassingen aan toestellen | 50 |
| 5.3.4 | Maatregelen met betrekking tot zwavel | 51 |
| 5.4 | Verrekening van biomethaan (energie) | 51 |
| 6 | Kosten | 52 |
| 6.1 | Aanpak | 52 |
| 6.2 | Kosten van maatregelen voor het transport van waterstof | 53 |
| 6.3 | Kosten van maatregelen voor de distributie van biomethaan | 56 |
| 6.4 | Conclusie met betrekking tot de kostenraming | 58 |
| 6.5 | Uitwerking van de scenario's | 59 |
| 6.5.1 | Aanpak | 59 |
| 6.5.2 | Overzicht resultaten (4 scenario's) | 60 |
| 6.5.3 | Samenvattende beschouwing | 60 |
| 7 | Conclusies en aanbevelingen | 62 |
| 7.1 | Conclusies | 62 |
| 7.2 | Aanbevelingen | 64 |
| 8 | Referenties | 66 |
| I | Belangrijkste materialen die in het gasdistributienetwerk aanwezig zijn | 72 |
| II | Samenstelling van waterstof | 73 |
| III | Invloed van waterstof op het distributienet | 74 |
| IV | Samenstellingen van duurzame gassen in het toekomstbestendige gasnet | 78 |
| V | Invloed van biomethaan op het distributienet | 80 |
| VI | Permeatie | 88 |
| VII | Berekening maximaal acceptabele concentratie | 92 |





1 Samenvatting

Gevolgen van de energietransitie voor de gasdistributienetten

Om de doelstellingen uit het klimaatakkoord van Parijs te behalen, wil Nederland in 2050 de uitstoot van koolstofdioxide in de bebouwde omgeving terugbrengen naar 0%. Fossiele energiebronnen maken plaats voor duurzame energie.

Deze transitie heeft ingrijpende gevolgen, ook voor de netbeheerders. Met het uitfaseren van aardgas ontstaat de belangrijke vraag of er nog wel een toekomst is voor het bestaande gasnetwerk. Die vraag is voor de regionale netbeheerders actueel, omdat er nu reeds keuzes gemaakt moeten worden voor het in stand houden van het gasnet voor de lange termijn.

Studies zoals 'Net voor de Toekomst' rekenen voor, dat een duurzame energievoorziening eerder binnen bereik komt met de inzet van duurzame gassen, zoals waterstof en biomethaan. Daar waar de gasnetwerken geschikt zijn kan namelijk de keuze worden gemaakt om, al dan niet tijdelijk, voor een oplossing met duurzaam gas te gaan. De vraag is dan welke duurzame gassen dat zijn en hoe de netbeheerders kunnen anticiperen op deze gastransitie.

Daarom heeft Netbeheer Nederland aan Kiwa gevraagd te onderzoeken wat er voor nodig is om de bestaande gasdistributienetten toekomstbestendig te maken.

Logica van het loslaten van Groningen gas als dé standaard voor gaskwaliteit

Vandaag de dag wordt minder dan 1% duurzaam gas aan het aardgasnet toegevoegd. Dit 'groen gas' van biologische oorsprong heeft nagenoeg dezelfde kwaliteit als het reguliere (Groningen) aardgas. Een valide vraag is, of dezelfde aardgaskwaliteit in de toekomst gehandhaafd moet blijven. De overschakeling naar hoogcalorisch aardgas, de internationale standaard, is voor de bebouwde omgeving niet opportuun. De klimaatdoelstellingen sluiten immers het gebruik van elke soort aardgas in de toekomst uit. Logischerwijs zal de gaskwaliteit in de toekomst dan ook moeten aansluiten bij die van duurzame gassen.

In de studie 'Net voor de Toekomst' wordt uitgegaan van twee soorten duurzame gassen.

De eerste is biomethaan, een term die een hele verzameling aan biologisch geproduceerd gas afdekt. Net als bij aardgas is het hoofdbestanddeel methaan, maar met een grotere variatie aan andersoortige gascomponenten.

De tweede is waterstof, dat geproduceerd kan worden met behulp van duurzame elektriciteit. Waterstof staat momenteel volop in de belangstelling als emissievrije energiedrager voor mobiliteit, energieopslag, industrieel gebruik en mogelijk ook voor de bebouwde omgeving.

De overschakeling naar nieuwe kwaliteitsstandaarden voor deze duurzame gassen voorkomt onnodige kosten en efficiëntieverliezen, die bewerking van de duurzame gassen naar de kwaliteitseisen van aardgas met zich mee zou brengen.

Gebruiken van ruim 50 jaar ervaring met distributie van aardgas

In nauwe samenwerking met experts van de regionale netbeheerders is onderzocht, wat er komt kijken bij het overschakelen van aardgas op deze duurzame gassen.

Naast het verzorgen van een veilig, betrouwbaar en betaalbaar transport hoort daar het meten en verrekenen bij. Ook is in het onderzoek de kwaliteit van het afgeleverde gas meegenomen, alsmede de gevolgen ervan bij de afnemer. Er is op dit moment nog geen grootschalige ervaring met waterstof en biomethaan in de bebouwde omgeving. Wel is er veel kennis beschikbaar uit praktijkproeven, laboratoriumonderzoek en technische handboeken.

Voor dit rapport is al deze kennis voor het eerst samengebracht en structureel toegepast op de situatie van het Nederlandse gasdistributienetwerk. Vervolgens zijn de volgende onderzoeksvragen beantwoord:



- in hoeverre is het huidige gasdistributienet bestand tegen duurzame gassen?
- welke aanpassingen zijn nodig om de bestaande gasnetwerken geschikt te maken?
- welke kosten zijn gemoeid met de omschakeling?

Als leidraad is zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij de materialen, standaarden en gebruiken die nu gelden voor aardgas. Deze zijn opnieuw kritisch beoordeeld vanuit het oogpunt van een veilige distributie van waterstof en biomethaan.

De resultaten geven inzicht in potentiële risico's en beheersmaatregelen. Deze inventarisatie vormt een solide basis voor een toekomstige uitvoeringsagenda om bestaande gasdistributienetwerken toekomstbestendig te maken.

Bestaande netwerken zijn geschikt voor distributie van duurzame gassen

De belangrijkste conclusie uit dit onderzoek is, dat het bestaande gasnetwerk met de juiste maatregelen prima ingezet kan worden om duurzame gassen zoals (100%) waterstof en biomethaan te distribueren.

Daar waar distributie van duurzame gassen gewenst is, kan het gasnet van de toekomst in grote mate gelijk blijven aan het huidige aardgasnetwerk.

De belangrijkste aanpassing voor de netbeheerders betreft het meten en de verrekening van de geleverde hoeveelheid energie. Een voorwaarde is verder, dat bij de eindgebruiker de toestellen geschikt gemaakt worden voor 100% waterstof en biomethaan.

Veilig en betrouwbaar gebruik van waterstof en biomethaan in de gebouwde omgeving

Om deze duurzame gassen in vergelijking tot aardgas minimaal even veilig en betrouwbaar in te zetten is een overzicht van aandachtspunten en potentiële beheersmaatregelen opgesteld. Naar de verwachting van geraadpleegde experts is daarmee een veilige en betrouwbare distributie mogelijk.

Het ontbreekt echter nog aan een kwantitatieve beoordeling van de risico's en de effectiviteit van de te nemen maatregelen.

Een minimaal vereiste voorzorgsmaatregel is waterstof en biomethaan een herkenbare geur te geven, bij voorkeur met behulp van een zwavelvrij odorant.

Een ander belangrijk aandachtspunt zijn de te hanteren veiligheidsmaatregelen bij ongewenste uitstroom van gas, zoals bij graafschades. Het veiligheidsaspect verdient ook extra aandacht bij het in pandig gebruik van waterstof.

Kosten netaanpassingen geschat op maximaal 700 miljoen Euro

Het toekomstig gebruik van nieuwe gassen in de bebouwde omgeving kent nog diverse onzekerheden. De kosten voor de netaanpassingen zijn afhankelijk van de vraag welke delen van het huidige gasnet nodig blijven.

Met behulp van de vier scenario's uit de studie "Net voor de Toekomst" is een indicatie gegeven van de kosten die de aanpassingen van de gasdistributienetwerken met zich meebrengen, exclusief de aanpassingen bij eindgebruikers.

De totale kosten voor het omschakelen en aanpassen van de netwerken kunnen oplopen tot 700 miljoen Euro. De netwerkkosten stijgen grofweg met 10 tot 50% per woning per jaar..

De grootste kostenpost die is meegenomen bij de overstap naar waterstof is het vervangen van de gasmeter en het vernieuwen van de procedure voor verrekening van de gaskosten als gevolg van verschillen in gassamenstelling. Voor biomethaan komen er nog extra kosten bij voor het kunnen omgaan met de variërende calorische waarde. Een significante periodieke kostenpost hangt samen met verscherpt toezicht bij graafwerkzaamheden.



Deze aanvullende netbeheerderskosten zijn overigens beperkt ten opzichte van de verwachte aanpassingskosten van toestellen bij de eindgebruikers.

Handelingsperspectief netbeheerders

Voor een veilige en betrouwbare levering van duurzame gassen in de bebouwde omgeving is een zorgvuldige uitbouw van ervaring nodig. Gezien het tempo van de energietransitie speelt een bewuste afweging tussen het leer tempo en een acceptabele omvang van risico's gedurende dit leerproces een belangrijke rol. De verantwoordelijkheden tijdens deze gastransitie liggen bij meerdere partijen. Het gezamenlijk opdoen van deze ervaring is dan ook essentieel. Dit gaat verder dan alleen de gasnetbeheerders, maar raakt ook andere eigenaren van ondergrondse infrastructuur, leveranciers van eindgebruikersapparatuur, veiligheidsinstanties, gemeentes, etc. Ervan uitgaande dat de distributie van duurzame gassen in de toekomst een publieke taak van de netbeheerders is, zoals nu voor aardgas, bestaat het advies voor de vervolgstappen uit het:

- valideren en uitwerken van bevindingen uit deze rapportage in de praktijk en ontwikkelen van 'best practices';
- onderzoeken van de implicaties van het meten en verreken van duurzame gassen;
- organiseren en opstellen van passende (internationale) normen en standaarden over de hele keten van productie tot en met gebruik;
- opzetten van opleidingen en campagnes voor publieke bewustwording.

Slotopmerking

Dit inductieve onderzoek geeft een zo volledig en objectief mogelijk antwoord op de vraag hoe de gasnetwerken toekomstbestendig ingezet kunnen worden voor de distributie van duurzame gassen. Misschien wel de belangrijkste factor om deze vraag definitief te beantwoorden ligt in het menselijk gedrag. Uit de decennialange ervaring met aardgasdistributie blijken zaken als veiligheidsperceptie, bedrijfscultuur en leiderschap essentieel voor een veilige en betrouwbare energielevering. Voor duurzame gassen geldt dit evenzo.

Het is aan de regionale netbeheerders of, en hoe, het gasnetwerk ingezet zal worden voor het transport van duurzame gassen. Het antwoord op de onderzoeksvraag is in die zin geen gegeven feit, maar een keuze. Als aanzet hiertoe bevat dit rapport (met de bijlagen) alle beschikbare informatie om tot een oordeel te kunnen komen over de mogelijkheden en beperkingen van waterstof en biomethaan in de bebouwde omgeving.

Het resterende deel van deze samenvatting bevat per gassoort de belangrijkste inzichten.

1.1 Distributie van waterstof

Verskil tussen distributie van waterstof en aardgas

Waterstof is het kleinste molecuul en kan op duurzame wijze worden gemaakt door met elektriciteit - uit wind of zon - water om te zetten in waterstof en zuurstof.

Waterstof is te gebruiken als emissievrije energiedrager en opslagmedium. Bij omzetting van waterstof naar elektriciteit of warmte komt geen CO₂ vrij. Het rapport 'Contouren voor een routekaart waterstof' bevat recente inzichten voor het gebruik van waterstof in de energievoorziening in Nederland. Waterstof kan getransporteerd worden door het bestaande gasnetwerk. Echter, waterstof is een ander gas dan het bekende aardgas. Zo heeft waterstof in vergelijking met aardgas een lagere ontstekingstemperatuur, ruimere explosiegrenzen en een hogere stijgkracht. Bij verbranding van waterstof is de vlam slecht tot niet zichtbaar en ligt de verbrandingssnelheid hoger dan bij aardgas. Daarnaast is waterstof net als aardgas



van zich zelf niet ruikbaar. Voor een veilige distributie zullen de netbeheerders rekening moeten houden met deze eigenschappen.

Ervaringen uit de petrochemische industrie, door wetenschappelijk onderzoek en praktijktesten

In de petrochemische industrie wordt waterstof op grote schaal getransporteerd en gebruikt. Ook is er uitgebreide wetenschappelijke literatuur beschikbaar over de effecten van waterstof op materialen. Mede op basis van diverse praktijktesten is voor de regionale gasnetwerken een totaaloverzicht gemaakt van de huidige kennis en ervaring. Veel basiskennis over materiaalresistentie van kunststoffen, metalen en rubbers is beschikbaar in standaardwerken en handboeken die gebruikt worden in de industrie.

De belangrijkste wetenschappelijk onderbouwde studies naar de effecten van het transport en de distributie van waterstof op het bestaande gasnetwerk zijn uitgevoerd in het Europese NaturalHy project. Later is daar het meerjarige Nederlandse EDGaR onderzoek aan toegevoegd. Naast een uitgebreide literatuurverkenning is door middel van experimenten met gasdistributiematerialen de resterende ontbrekende kennis aangevuld. Omdat tijdens deze literatuurverkenning al voldoende kennis over de effecten bij 100% waterstof beschikbaar bleek, zijn er binnen EDGaR geen testen met 100% waterstof meer uitgevoerd (wel met syngas dat tot 62% waterstof bevat, zie Hoofdstuk 5). In deze studies hebben de onderzoekers laboratoriumtesten uitgevoerd naar de resistentie van metalen, kunststoffen en rubbers. Het gaat dan om effecten op de kwaliteit en restlevensduur, zoals verbrossing, treksterkte, hardheid en taaheid van leidingmaterialen en afdichtingen.

De meest relevante praktijkervaring op het gebied van waterstofdistributie in gasnetwerken is opgedaan in een praktijktest op Ameland. Hierbij is tot 20% waterstof aan het aardgas toegevoegd in een speciaal daarvoor aangelegd testnetwerk en aangeboden aan een diversiteit aan huishoudelijke gasinstallaties. Het testnetwerk bestond uit de gebruikelijke constructies met oude en nieuwe materialen en verbindingen.

Een tweede praktijktest is uitgevoerd in Denemarken waar tot 10 jaar lang het transport van 100% waterstof door nieuwe en gebruikte PE en stalen leidingen is beproefd.

Daarnaast zijn er internationaal talloze deelonderzoeken uitgevoerd, waarvan de resultaten overeenkomen met de resultaten uit bovengenoemde studies.

Met deze inventarisatie is een diepgaand inzicht verkregen in de materiaaleffecten. Deze zijn vervolgens gerelateerd aan de reeds bekende faalmechanismen om een uitspraak te doen over de geschiktheid van de gasdistributienetten.

Het gasdistributienetwerk is bestand tegen waterstof

De algehele bevinding uit deze inventarisatie is, dat het huidige gasdistributienetwerk geen significante invloed zal ondervinden van waterstof. Voor alle bekende materialen, met als belangrijkste staal, PE en PVC, is zowel op basis van de geraadpleegde literatuur, als op basis van de uitgevoerde laboratoriumproeven en praktijktesten geen merkbare degradatie te verwachten en waargenomen.

De inzet van het huidige gasnetwerk vraagt één belangrijk aandachtspunt. Dit is het gevolg van de lagere energiedichtheid van waterstof. Bij een gelijkblijvende energievraag wordt er een drie keer zo groot gasvolume getransporteerd. Het gevolg hiervan is, dat het overgrote deel van de gasmeters, die gebaseerd zijn op volumemeting, op piekmomenten een te kleine capaciteit kan hebben. Om dezelfde (maximale) energiestroom te meten is immers een drie keer groter volume nodig. In hoeverre dit effect in de praktijk de huidige gasmeters ongeschikt maakt is niet onderzocht. De lagere energiedichtheid heeft bovendien een hogere stromingsnelheid tot gevolg.

Daarnaast blijft de transportcapaciteit van de leidingen gelijk aan die van aardgas. De overige effecten zijn onbekend of verwaarloosbaar.



Bestaande toestellen zijn niet zomaar geschikt voor 100% waterstof

Nagenoeg geen van de bestaande toestellen bij de eindgebruikers zijn geschikt voor gebruik bij 100% waterstof. De verbranding van waterstof in bestaande CV-ketels resulteert mogelijk in vlaminslag en beschadiging van de brander. Ook het beveiligingsprincipe (ionisatiestroom) in de huidige toestellen is niet toepasbaar bij 100% waterstof. Dit geldt ook voor de meeste gaskooktoestellen. Een verhoogd veiligheidsrisico met kooktoestellen is dat verbranding van waterstof geen zichtbare vlam produceert.

De beschikbaarheid van waterstof maakt het mogelijk om brandstofcellen in te zetten. Brandstofcellen zetten met een hoge efficiency waterstof en zuurstof om in elektriciteit en water. Voor de levensduur van brandstofcellen is zuivere waterstof belangrijk. Met welke kwaliteit waterstof afgeleverd kan worden via het gasnetwerk en in hoeverre dit een beperking vormt voor het gebruik van brandstofcellen is nog niet bekend. De ervaring met aardgas en groen gas is, dat er onvermijdelijk enige vervuiling optreedt door vochtintrede, permeatie van zuurstof en stikstof, en aanwezigheid van vuil in de leidingen. Ook wordt de geurstof die momenteel bij aardgas en groen gas wordt toegepast, het zwavelhoudende THT, in combinatie met brandstofcellen afgeraden.

Overstap naar waterstof vraagt om herziening van normen en werkwijzen

Voor de beheersing van risico's voor aardgas en groen gas zijn in de loop der jaren normen, werkinstructies en opleidingen voor monteurs en andere deskundigen ontwikkeld. Hiermee is het aardgasnetwerk in Nederland één van de veiligste en betrouwbaarste ter wereld.

De andere eigenschappen van waterstof vragen om een kritische beoordeling en herziening om minimaal op hetzelfde niveau te blijven. Er is nog onvoldoende praktijkervaring om de risico's bij distributie van 100% waterstof te kwantificeren. Daarom is een kwalitatieve aanpak gekozen op basis van de bow-tie methodiek en expert interviews. Dit geeft inzicht in de potentiële risico's en aandachtspunten bij werkzaamheden, lekkages en calamiteiten. Bijbehorende beheersmaatregelen zijn benoemd. Deze dienen in de praktijk gevalideerd en geoptimaliseerd te worden.

Op basis van de door experts uitgevoerde inventarisatie is geen uitsluitel te geven of distributie en gebruik van waterstof in de bebouwde omgeving inherent gevaarlijker of juist veiliger is dan aardgas. Een belangrijk pluspunt van waterstof is dat er geen koolmonoxidevergiftiging meer optreedt. Daarnaast verlaagt de vluchtigheid van waterstof de kans op brand of een explosie. Anderzijds werken de bredere explosiegrenzen, de lagere ontbrandingstemperatuur en de lagere ontstekingsenergie risico verhogend. In een praktijkonderzoek in het Verenigd Koninkrijk naar lekkage van waterstof in een testboerderij bleek men niet in staat om onder normale omstandigheden een explosief mengsel te laten ontstaan. Kortom, er zijn argumenten die leiden tot een verhoogd risico en andere die wijzen op een lager risico ten opzichte van aardgas. De vraag welke maatregelen nodig zijn om - in geval van waterstoflekkages - risico's op brand of een explosie voldoende te beheersen kan nog niet definitief worden beantwoord.

Ten slotte zijn er nog twee andere fenomenen die vaak in relatie worden gebracht met waterstof. Dat zijn de permeatie van waterstof door kunststofleidingen en waterstofbrosheid van staal. Beide effecten zijn bij de omstandigheden, die gelden in distributienetten, verwaarloosbaar en zorgen niet voor een significante degradatie of verhoging van het veiligheidsrisico.

1.2 Distributie van biomethaan

Diversiteit aan gascomponenten in biomethaan

Biomethaan heeft een grote gelijkenis met aardgas. Het hoofdbestanddeel is methaan, aangevuld met wisselende concentraties van andersoortige componenten.



Voor aardgas en groen gas is de kwaliteit vastgelegd in de Ministeriële Regeling (MR) Gaskwaliteit. Deze staat een beperkte variatie toe in concentraties van de gascomponenten. Biomethaan wordt gewonnen uit een grote variatie aan organische biomassastromen en levert daardoor een grotere variatie aan gassamenstellingen op dan toegestaan in de MR. Het meest toegepaste productieproces bestaat uit het vergisten van biomassa zoals GFT, restafval uit de voedingsmiddelenindustrie en mest. Daarnaast zijn er ontwikkelingen om door vergassing van houtachtige biomassa en het methaniseren van waterstof 'syngas' te produceren. Uiteindelijk kunnen er meer dan 13 verschillende hoofdcomponenten in biomethaan voorkomen, in verschillende verhoudingen. Voor dit onderzoek zijn voor biomethaan grenswaarden per component opgesteld op basis van de bekende productiemethoden.

Onderzoek naar zo ruim mogelijke grenswaarden voor biomethaan

Het huidige gas moet voldoen aan de MR-Gaskwaliteit. Daarin zijn sinds 2016 grenswaarden opgenomen voor gascomponenten die voor kunnen komen in biomethaan. Biomethaan dat voldoet aan deze kwaliteitseisen heet 'groen gas' en mag ingevoerd worden in het bestaande gasnetwerk. Deze eisen zijn opgesteld om de veiligheid en uitwisselbaarheid met aardgas te borgen.

Die uitwisselbaarheid is in de toekomst niet meer nodig, waardoor er mogelijk ruimere grenswaarden voor biomethaan gesteld kunnen worden. Om deze ruimere grenswaarden vast te kunnen stellen is onderzoek verricht naar de invloed van gascomponenten op materialen en het verbrandingsgedrag in eindgebruikerstoestellen.

De belangrijkste inzichten voor de gasdistributienetwerken komen uit EDGaR, waar uitgebreide beproevingen zijn gedaan naar de resistentie van materialen. Daarnaast is er op verschillende plekken in Nederland ervaring met het transport van opgeschoond 'biogas', waarvoor de kwaliteitseisen minder stringent zijn dan voor groen gas. Voor deze lokale toepassingen geldt de MR-Gaskwaliteit niet en zijn aparte veiligheidsinstructies en werkafspraken opgesteld. Voor biomethaan is over het geheel genomen meer kennis en praktijkervaring beschikbaar over het gebruik ervan in de bebouwde omgeving dan voor waterstof. Daartegenover staat, dat conclusies in de publicaties minder eenduidig zijn. Waar bij het gebruik van waterstof geen enkel resultaat is aangetroffen dat wijst op aantasting van materialen, zijn er voor biomethaan indicaties dat sommige componenten invloed hebben op de levensduur van het gasdistributienetwerk.

Voor het bestaande gasdistributienet is bijna iedere vorm van biomethaan toelaatbaar

Biomethaan wordt op dit moment op dezelfde kwaliteit gebracht als aardgas. In de toekomst is dit volgens het onderzoek niet per se meer nodig, mits de gasmeting en de toestellen bij eindgebruikers geschikt gemaakt zijn. De netbeheerder kan dan nagenoeg elke samenstelling van biomethaan toelaten in de bestaande infrastructuur. Met name PE en PVC hebben een goede resistentie tegen de gascomponenten die aanwezig kunnen zijn in biomethaan. Voor enkele gascomponenten blijven maximumwaarden gelden. Deze zijn opgenomen in Tabel 5-4 van dit rapport. Deze maximumwaarden zijn nodig om degradatie van metalen delen van het gasnet en het materiaal POM te voorkomen. POM wordt veelvuldig toegepast in verbindingen, huisdrukregelaars en gasmeters.

De aanpassingen bij eindgebruikers zijn minder ingrijpend dan voor waterstof. Net als bij waterstof is een juiste meting en verrekening een aandachtspunt. Bij biomethaan komt dit door de grotere bandbreedte in energie-inhoud. Het meetprincipe van volumemeting in de bestaande gasmeters houdt hier geen rekening mee, waardoor de verrekening minder nauwkeurig wordt dan de bestaande eis (< 0.5%). Op dit moment is er geen meetprincipe met vergelijkbare kosten beschikbaar voor een juiste individuele verrekening bij eindgebruikers. Behalve door het ontwikkelen van geschikte meters kan dit opgelost worden door (per gebied) een beperkte variatie in



de gaskwaliteit toe te staan, of gaskwaliteitsmeting op gebiedsniveau te introduceren. Wat economisch de beste optie is, is niet onderzocht.

Veilig en betrouwbaar gebruik van biomethaan in de gebouwde omgeving

Biomethaan bevat mogelijk een aantal giftige componenten. Er mag niet worden gewerkt in een omgeving, waarin de concentratie van deze componenten boven de maximaal toegestane waarde ligt. De laagste grenswaarde voor het ontstaan van een explosief gasmengsel kan als maximum worden aangehouden, omdat er in deze situatie al niet gewerkt mag worden vanuit het risico op brand en explosie. De ervaring met het lokaal transporteren van opgeschoond 'biogas' leert, dat het volgen van deze maatregel geen extra risico's voor biomethaan oplevert ten opzichte van aardgas. De robuustheid van deze werkwijze is afhankelijk van correcte naleving van de daarvoor geldende procedures en werkinstructies, alsmede van het toezicht daarop.



2 Inleiding, doelstelling en onderzoeksopzet

2.1 Achtergrond

Het Ministerie van Economische Zaken stelt, dat de bebouwde omgeving in 2050 CO₂ neutraal dient te zijn. Lokale overheden en burgerinitiatieven ontwikkelen energieviesies, waarbinnen aardgasloze wijken een speerpunt vormen. Dit zou vanuit maatschappelijk oogpunt niet automatisch hoeven te leiden tot het verwijderen van het gasnet. Juist bestaande gasdistributienetwerken kunnen een onderdeel zijn van de verduurzaming van de bebouwde omgeving en de energietransitie.

Een gasdistributienetwerk, dat in de toekomst geschikt is voor duurzame gassen, biedt kansen voor een succesvolle energietransitie. Daarnaast heeft een duurzaam inzetbaar gasdistributienet hoogstwaarschijnlijk een positieve invloed op de business case voor vervangings- en aanleginvesteringen, die nu bij de gasnetbeheerders om besluitvorming vragen. Door een goed inzicht in de mogelijkheden voor een flexibel gasnet voor duurzame gassen kunnen desinvesteringen worden voorkomen. Distributie van duurzame gassen is daarmee een serieus alternatief, dat past binnen de visie van alle stakeholders, zoals de landelijke overheid, regionale en lokale overheden en netbeheerders.

2.2 Probleemstelling

De huidige tendens is het terugdringen van het aandeel aardgas in de energievoorziening van de bebouwde omgeving. Wat dit betekent voor de functie die de gasdistributienetten gaan vervullen is onbekend. Het terugdringen van het gebruik van aardgas hoeft echter niet te betekenen, dat gas als energiedrager gaat verdwijnen.

Duurzame gassen, zoals waterstof en biomethaan, zouden een belangrijk onderdeel kunnen gaan uitmaken van de toekomstige energievoorziening. Hoe deze energievoorziening er precies gaat uitzien is nu nog niet bekend. Wel is al een aantal ontwikkelingen te identificeren. Eén ontwikkeling is bijvoorbeeld de opkomst van lokale energiecoöperaties.

Factoren die van belang zijn om te komen tot een optimale lokale energievoorziening zijn het huidig en toekomstig energiegebruik, de aanwezigheid van duurzame energiebronnen en de mogelijkheden voor lokale opslag. Opslag van elektrische energie is vooralsnog duur en de toepasbare vermogens zijn te beperkt om de winter/zomercyclus van de energievraag tegen een maatschappelijk aanvaardbare prijs te realiseren.

Een andere ontwikkeling is de toenemende beschikbaarheid van energieconversietechnieken. Deze maken het mogelijk het overschot aan duurzaam opgewekte elektriciteit te transformeren naar een gasvormige energiedrager, zoals waterstof en methaan. Deze energiedragers zijn relatief eenvoudig en goedkoop te maken en zijn goedkoper op te slaan dan elektriciteit.

Door deze ontwikkelingen te extrapoleren naar 2050 ontstaan toekomstbeelden. Afhankelijk van de keuzes, die hierbij worden gemaakt door bijvoorbeeld de landelijke en de lokale politiek maar ook door plaatselijk opgerichte energiecoöperaties, zal hiervoor een bepaalde invulling ontstaan. Het geheel van deze invullingen is weergegeven in energievoorzieningsscenario's. Met behulp van deze scenario's kan een beeld worden geschetst van de toekomstige energievoorziening en de bijdrage van de (huidige) gasnetten daarin.



De meeste scenario's gaan uit van het gebruik van duurzaam opgewekte energie. Deze energie wordt op verschillende manieren gegenereerd, waarbij elektriciteit geproduceerd wordt met behulp van windmolens en zonnepanelen. Duurzaam gas wordt geproduceerd uit biomassa en/of door het omzetten van een overschot aan duurzaam geproduceerde elektriciteit in waterstof en/of methaan.

Voor het distribueren van deze duurzaam geproduceerde gassen ligt het gebruik van het huidige gasnet voor de hand. De vraag is of het huidige gasnet deze duurzaam geproduceerde gassen zonder meer kan distribueren, of dat er wellicht aanpassingen aan het net noodzakelijk zijn voordat deze duurzame gassen gedistribueerd kunnen worden. De kosten van de aanpassingen, die gemaakt moeten worden om het huidige gasnet geschikt te maken voor de toekomst, zullen mede bepalen of een bepaald scenario werkelijkheid wordt.

Sommige aanpassingen aan het gasnet kunnen wellicht binnen meerdere scenario's een positieve bijdrage leveren. Het is dan ook verstandig deze opties scherp in beeld te brengen.

CO₂ neutraal is niet hetzelfde als gasloos

In het Klimaatakkoord van Parijs is afgesproken de opwarming van de aarde tot ruim onder de twee graden Celsius te beperken. Dit vertaalt zich in een CO₂-reductie voor de Europese Unie tussen de 80 tot 95% [1].

Om dit te bereiken is een energietransitie nodig. Fossiele brandstoffen leiden tot CO₂-emissies. Van alle fossielen brandstoffen leidt aardgas tot de minste CO₂-emissies per energie-eenheid [2]. Aardgas blijft echter een fossiele brandstof

met de daarbij behorende CO₂-emissies. Als gevolg van de bevingen in het Groningse wingebed wordt de binnenlandse productie van aardgas momenteel teruggedraaid [3]. Het is daarom ook niet verwonderlijk

dat steeds meer instanties en gemeenten oproepen om "van het gas af te gaan" [4] [5] [6].

In het publieke debat wordt nog wel eens vergeten, dat gasvormige energiedragers niet per definitie fossiel zijn; waterstof of biomethaan kunnen uit duurzame bronnen worden geproduceerd. Nederland heeft een fijnmazige gasinfrastructuur. Het is dan ook een belangrijke vraag of deze infrastructuur gebruikt kan worden voor de distributie van duurzame gasvormige energie. Zo kan wellicht een CO₂-neutrale energievoorziening worden bereikt die allerminst gasloos is.

2.3 Doelstelling

Doel van dit onderzoek is om in nauwe samenspraak met de Nederlandse gasdistributiesector richting te geven aan de invulling van een toekomstvaste, duurzame gasvoorziening.

Hierbij is op basis van reeds beschikbare kennis geïnventariseerd, hoe de gasdistributienetten toekomstvast gemaakt kunnen worden.

Daartoe zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- In hoeverre is het huidige gasdistributienet bestand tegen duurzame gassen?
- Welke aanpassingen zijn nodig om het gasdistributienet toekomstvast te maken?
- Welke kosten zijn gemoeid met de omschakeling?



2.4 Onderzoeksopzet

In dit onderzoek is de huidige situatie als uitgangspunt gekozen. Hierbij wordt voornamelijk aardgas via het bestaande gasdistributienet naar de eindgebruikers getransporteerd, waar het aardgas wordt ingezet voor verwarming en/of als procesgas. Omdat ook Nederland aan de verplichtingen van het Klimaatakkoord van Parijs wil voldoen is door de overheid aangegeven, dat er met ingang van 2050 geen netto CO₂ emissie meer plaats mag vinden in de bebouwde omgeving. Om hieraan te voldoen moet het gebruik van aardgas in de bebouwde omgeving worden afgebouwd. Om in de energiebehoefte te kunnen voorzien, moeten alternatieve energiedragers worden ingezet. Hoe deze aanpassing precies gaat verlopen is vooralsnog onbekend. In de nieuwe situatie zal waarschijnlijk een rol weggelegd zijn voor gasvormige brandstoffen. Het ligt dan ook voor de hand om het huidige gasnet daarvoor te gebruiken. Of het huidige gasnet daarvoor geschikt is, of wat de eventuele aanpassingen moeten zijn om het daarvoor geschikt te maken, is echter de vraag. In dit onderzoek is er vanuit gegaan dat de vervanging van asbestcement leidingen voltooid zal zijn als de 'nieuwe' gassen worden geïntroduceerd. Daarom is er in het kader van deze studie geen onderzoek gedaan naar de effecten van de 'nieuwe' gassen op asbestcement leidingen.

Het onderzoek is zo opgezet, dat het vanuit het perspectief van de regionale netbeheerder naar de veranderingen kijkt, die noodzakelijk geacht worden om tot een succesvolle transitie te kunnen komen. Er is echter een afhankelijkheid met de eindverbruikers. Het gasdistributienet is immers maar een stukje in de totale keten. Daarom is ook gekeken naar de implicaties en toepassingsmogelijkheden van en bij de eindgebruiker. De kennis van verbrandingstoestellen en gasbinneninstallaties is daarvoor ingezet. Hoewel de focus ligt op de impact voor de regionale netbeheerder is - daar waar noodzakelijk geacht - de impact en de betekenis voor alles wat zich achter de meter bevindt meegenomen.

In dit onderzoek is zo veel mogelijk de reeds beschikbare kennis bij elkaar gebracht om de noodzakelijke veranderingen in het gasnet te identificeren. Omdat onduidelijk is hoe de transitie naar een duurzame energievoorziening zal verlopen, is gebruik gemaakt van vier mogelijke scenario's, zoals die zijn weergegeven in het rapport "Net voor de Toekomst" dat in opdracht van Netbeheer Nederland door CE Delft is opgesteld. Door gebruik te maken van deze scenario's kan ingeschat worden welke duurzame gassen de voorkeur krijgen.

Op basis hiervan is voor de belangrijkste materialen, die in het huidige gasdistributienet zijn toegepast (zie bijlage I), aangegeven of ze tegen deze duurzame gassen bestand zijn. Daarnaast wordt aangegeven welke maatregelen getroffen moeten worden om de veiligheid te waarborgen. Hierbij zijn de voor aardgas geldende normen, werkvoorschriften en ervaringen als basis genomen. Bovendien is aandacht gegeven aan de verrekening. Zoals hiervoor reeds aangegeven, is ook de impact van het gebruik van de 'nieuwe' gassen op de eindverbruikers onderzocht. Er zijn maatregelen benoemd, die een veilig en doelmatig gebruik van deze gassen mogelijk maken.

Omdat al deze maatregelen financiële gevolgen zullen hebben, is in deze studie tevens aandacht geweest voor de kosten en opbrengsten van die maatregelen. Hiermee is een eerste indruk verkregen van de mogelijke kosten en opbrengsten. Het gaat hierbij om een financiële raming, waaraan slechts een plan op hoofdlijnen voor het ombouwen van het huidige gasdistributienet ten grondslag ligt, en die uitsluitend ten doel heeft om oplossingsrichtingen aan te geven. De geraamde kosten zijn mede afhankelijk van het antwoord op de vraag in hoeverre initiële controles een blijvend karakter moeten krijgen. Dit moet uit evaluatie van praktijkervaringen blijken.



Gehanteerde aanpak: vanuit de techniek is nagegaan, waar de uitdagingen/ belemmeringen liggen voor het inpassen van duurzame gassen. Hiervoor is een groot aantal specifieke maatregelen benoemd. Voor de belangrijkste maatregelen is een kostenraming gemaakt. Deze eerste financiële raming levert een indicatie van de financiële impact op, die een gevoel geeft van de omvang van de acties, waarvoor de gasdistributiesector staat. Om de exacte kosten in beeld te krijgen zal aanvullend onderzoek noodzakelijk zijn.

Voor de vier scenario's zijn de meerkosten voor de overgang naar duurzame gassen met behulp van deze eerste kostenraming berekend.

2.5 Indeling rapport

Hoofdstuk 1 bevat de management samenvatting van dit rapport.

In hoofdstuk 2 is een uitgebreidere samenvatting opgenomen.

Hoofdstuk 3 bevat de inleiding en de onderzoeksdoelstelling.

In hoofdstuk 4 wordt een beschrijving gegeven van de gekozen scenario's, van waaruit de blauwdruk van het bijbehorende gasdistributienet wordt afgeleid.

De voorwaarden en aandachtspunten bij het gebruik van waterstof in het bestaande netwerk worden in hoofdstuk 5 nader uitgediept. Waar er technische knelpunten zijn voor het toepassen van het bestaande netwerk, worden deze knelpunten én de mogelijke oplossingen benoemd.

Hoofdstuk 6 beschrijft de voorwaarden voor het gebruik van biomethaan in diverse samenstellingen in het bestaande netwerk. Ook hier worden de technische knelpunten geduid voor het toepassen van het bestaande netwerk met de mogelijke oplossingen.

De kosten voor aanpassing van het netwerk worden in hoofdstuk 7 per gebiedstype en het type duurzaam gas gepresenteerd.

Tenslotte worden in hoofdstuk 8 de onderzoekconclusies samengevat en worden de aanbevelingen gepresenteerd, die uit het onderzoek zijn voortgekomen.



3 Gekozen scenario's en bijbehorende gasnetten

3.1 Methodiek

In dit hoofdstuk worden de toekomstscenario's voor het energiedistributienet voor de toekomst geïntroduceerd. Voor elk van deze scenario's is nagegaan welke soort gasnet of gasnetten hierbij aanwezig zal (zullen) zijn.

Het soort gasnet wordt gekenmerkt door drie dimensies. Dat zijn:

- het nettype (dat wordt bepaald door het soort gas dat wordt gedistribueerd);
- het gebiedstype waarin de netten liggen;
- de mate van penetratie van deze netten.

Hieronder wordt nader ingegaan op deze dimensies.

Nettypes

In het CE-rapport "Net voor de Toekomst" [7] wordt gesproken over de toepassing van diverse energiedragers voor laagtemperatuur warmtevoorziening met bijbehorende nettypes. Onder laagtemperatuur warmte wordt de verwarming van woningen en utiliteitsbouw verstaan. Dit is vergelijkbaar met bijvoorbeeld een huidige CV-verwarming.

In het genoemde rapport worden de volgende energiedragers onderscheiden:

- warmte
 - o restwarmte
 - o geothermie
 - o Warmte Koude Opslag (WKO)
- vaste biomassa voor ketels
- elektriciteit (o.a. voor aandrijving van een warmtepomp)
- biomethaan (voor HR-ketels en hybride warmtepompen)
- waterstof (voor HR-ketels en hybride warmtepompen)

De beide laatstgenoemde energiedragers (biomethaan en waterstof) zijn gasvormig. Hiervoor zullen dan ook gasnetten nodig zijn om deze energiedragers naar de eindgebruiker te transporteren.

De nettypes biomethaan en waterstof kunnen naast de laagtemperatuur warmtevoorziening ook worden gebruikt voor een gedeelte van de energiebehoefte van de industrie. In de studie "Net voor de Toekomst" worden deze gasvormige energiedragers dan ook gebruikt voor de invulling van de behoefte aan hogetemperatuur warmte en als "feedstock" (productiegrondstof). Ook voor het gastransport ten behoeve van deze categorie eindgebruikers kan het bestaande gasnet wellicht worden ingezet. Daarom wordt in deze studie ook hieraan aandacht besteed.

Gebiedstypes

We onderscheiden vier gebiedstypes:

- stedelijk
- woonkernen
- landelijk
- industrie

Er zal mogelijk een differentiatie optreden in de nettypes voor de verschillende gebiedstypes. Nu hebben we in Nederland (op hoofdlijnen) in elk gebiedstype dezelfde netten. Op dit moment is vrijwel overal een aardgasvoorziening (voor laagtemperatuur warmte) en een elektriciteitsvoorziening aanwezig.

De elektriciteitsvoorziening zal waarschijnlijk overal wel gehandhaafd blijven, maar



het nettype voor lagetemperatuur warmte kan mogelijk gaan verschillen tussen de hiervoor genoemde gebiedstypes.

Naast de drie gebiedstypes worden gasvormige energiedragers gebruikt in de industrie. Deze vormt vanwege haar ligging op industrieterreinen, vaak aan de randen van steden, een eigen categorie.

Netpenetratie

De laatste dimensie die wordt beschouwd, is die van de netpenetratie. Hierbij gaat het om de mate waarin het gasnet in het bebouwde omgeving weet door te dringen. We onderscheiden 5 niveau's van netpenetratie waarbij tussen haakjes ter verduidelijking de equivalenten van het huidige aardgasnet worden vermeld :

- tot aan de rand van de stad (Gasontvangstation)
- tot aan de rand van de woonwijk (Districtstation)
- tot aan de hoek van de straat (Lagedruk hoofdleiding)
- tot aan de woning (Aansluitleiding)
- tot in de woning (Aansluitleiding en invoering)

3.2 Gekozen scenario's "Net voor de Toekomst"

In het rapport "Net voor de Toekomst" [8] zijn vier scenario's uitgewerkt voor de energievoorziening in 2050. Dat zijn:

- Regie Regionaal
- Regie Nationaal
- Internationaal
- Generieke Sturing

Voor elk van deze scenario's is in het vervolg van dit hoofdstuk aangegeven wat voor soort gasnetten hierbij naar verwachting benodigd zijn.

3.2.1 Scenario Regie Regionaal

In het scenario Regie Regionaal hebben provincies en gemeenten grotendeels de regie en sturen deze regionale en lokale overheden sterk op decentrale energie-opwekking en gebruik.

Burgers, bedrijven en decentrale overheden vervullen een actieve rol in het vergeven van energieoplossingen, bijvoorbeeld collectieve en individuele zon-PV-oplossingen, kleinschalige collectieve warmtenetten en wind op land. Er is geen grootscheepse import van hernieuwbare of fossiele energie van buiten Nederland, maar binnen Nederland kan energie wel getransporteerd worden. CCS (Carbon Capture and Storage) komt niet voor. Voor de lagetemperatuur warmtevoorziening worden op regionale schaal zo veel mogelijk bronnen gebruikt die er beschikbaar zijn. All-electric oplossingen komen het meest voor. Het beeld van Nederland is drastisch veranderd: veel grote windturbines, maximalisatie van zon-PV op daken, maar ook zonneweides en veel opslagsystemen.

De gasvoorziening binnen scenario Regie Regionaal

Type gas en herkomst

Waterstof en biomethaan komen in dit scenario voor als gasvormige energiedrager.

Waterstof wordt met behulp van elektrolyse uit duurzame elektriciteit gemaakt. Waterstof-elektrolyse zal op verschillende spanningsniveaus en schaalgroottes worden gerealiseerd. In het rapport "Net voor de Toekomst" wordt gesteld, dat waterstof ook zal worden opgeslagen om seizoenfluctuaties in het energiegebruik op te vangen. De schaalgrootte van deze opslag wordt echter niet nader toegelicht. Binnen het denkkader van dit scenario ligt het voor de hand, dat waterstofopslag zo veel mogelijk lokaal zal gaan plaatsvinden.



Biomethaan: zowel de productie als het gebruik van biomethaan is zeer lokaal. Er is geen grootschalige import van energie. Biomethaan wordt gemaakt met behulp van vergistingsinstallaties.

Gasgebruik

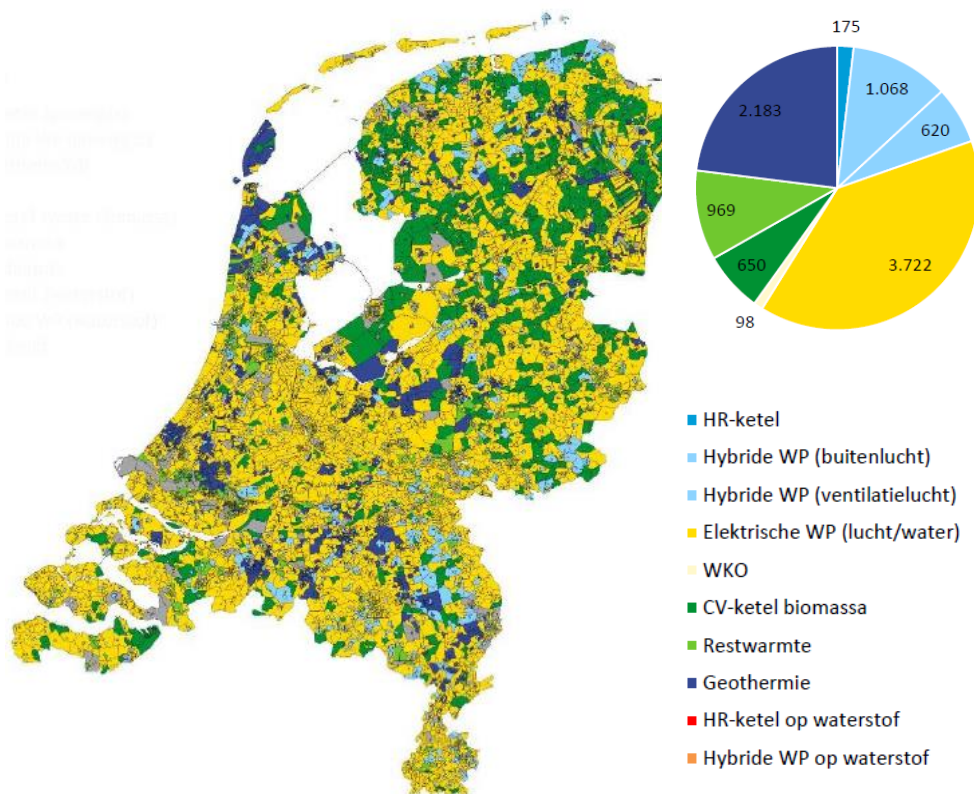
In figuur 3-1 is aangegeven hoe binnen dit scenario de lagetemperatuur warmtevoorziening is verdeeld over Nederland in het scenario Regie Regionaal. De aanwezige vlakken corresponderen met wijken en buurten.

Het gebruik van waterstof is weergegeven in de vlakken met de kleuren rood (gebruik in HR-ketel) en oranje (gebruik in een hybride warmtepomp). Waterstof wordt in dit scenario niet gebruikt voor de lagetemperatuur warmtevoorziening. Waterstof wordt wél veelvuldig toegepast in de industrie (hogetemperatuur warmte en feedstock). Een deel van de waterstof wordt ook gebruikt ter ondersteuning van de grote warmtecentrales om op koude dagen - door middel van verbranding van waterstof - de benodigde extra warmte te genereren.

Daarmee ligt het voor de hand dat er in dit scenario waterstofleidingen ontstaan vanuit de waterstofproductie fabrieken naar de grote afnemers. Of hiermee ook een landelijk transportnetwerk ontstaat - vergelijkbaar met het huidige netwerk van GTS - is vooralsnog onduidelijk. Wel is duidelijk, dat er in dit scenario geen aanleiding is voor regionale waterstofnetwerken naar individuele woningen.

Het gebruik van biomethaan is weergegeven in de vlakken met de kleuren blauw (gebruik in HR-ketel) en lichtblauw (gebruik in hybride warmtepompen). Daaruit blijkt, dat de distributie van biomethaan zeer lokaal plaatsvindt. Alleen in de gebieden waar biomethaan uit vergisting voorhanden is, vindt distributie plaats. Biomethaan wordt tot in de woningen gebracht.

De diverse gebieden waar biomethaan wordt gebruikt liggen behoorlijk ver uit elkaar. Hoewel dit niet expliciet wordt benoemd in de scenario-studie, ligt het niet voor de hand dat deze gebieden met elkaar verbonden zullen worden in de vorm van een landelijke biomethaan-netwerk. Lokale oplossingen voor buffering en leveringszekerheid zijn meer in lijn met dit scenario.



Figuur 3-1. Maatschappijbeeld Regie Regionaal.
 Links: Kaart van Nederland met de lagetemperatuur warmtevoorziening.
 Rechtsboven: Warmteaansluitingen (x1.000) per optie. Rechtsonder: Legenda [8]

Uit het bovenstaande komt naar voren, dat er binnen het scenario Regie Regionaal ruimte is voor de volgende soorten gasnetten:

| Gebiedstype | Waterstofnetwerk | Biomethaannetwerk |
|-------------------------|--|--|
| Stedelijk | Geen | Geen |
| Woonkernen | Geen | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is |
| Landelijk gebied | Geen | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is |
| Industrie | In elk geval van bron tot (industriële) afnemer. Nationaal verbindingnetwerk is mogelijk | Geen |

Tabel 3-1. Soorten gasnetten per gebiedstype per type gas, scenario Regie Regionaal.

3.2.2 Scenario Regie Nationaal

In dit toekomstbeeld neemt de Rijksoverheid de regie. Het Rijk organiseert grote projecten, onder andere op het gebied van wind op zee, zoals bijvoorbeeld energie-eilanden in de Noordzee of andere omvangrijke projecten, om de inpassing van wind op zee te verbeteren. Nederland is in dit toekomstbeeld energie-zelfvoorzienend. Burgers en bedrijven beseffen dat hernieuwbare energie in Nederland schaars is. Daardoor is de stap naar het opzetten van een sterk circulaire industrie, waarin recycling een grote rol heeft, logisch. De huidige olieraffinage en petrochemische industrie hebben hierin plaats gemaakt voor een omvangrijke recyclingindustrie en



een chemische industrie gebaseerd op hernieuwbaar geproduceerde waterstof en de productie van kunststof uit methanol.

De gasvoorziening binnen het scenario Regie Nationaal

Type gas en herkomst

Waterstof en biomethaan komen in dit scenario voor als energiedrager.

Waterstof wordt met behulp van elektrolyse uit duurzame elektriciteit gemaakt. Waterstof wordt centraal en grootschalig omgezet vanuit duurzame elektriciteit. Deze duurzame energie komt vooral van grootschalige windparken op zee. Seizoensopslag kan in de vorm van zoutcavernes in het noorden en oosten van Nederland worden gesitueerd.

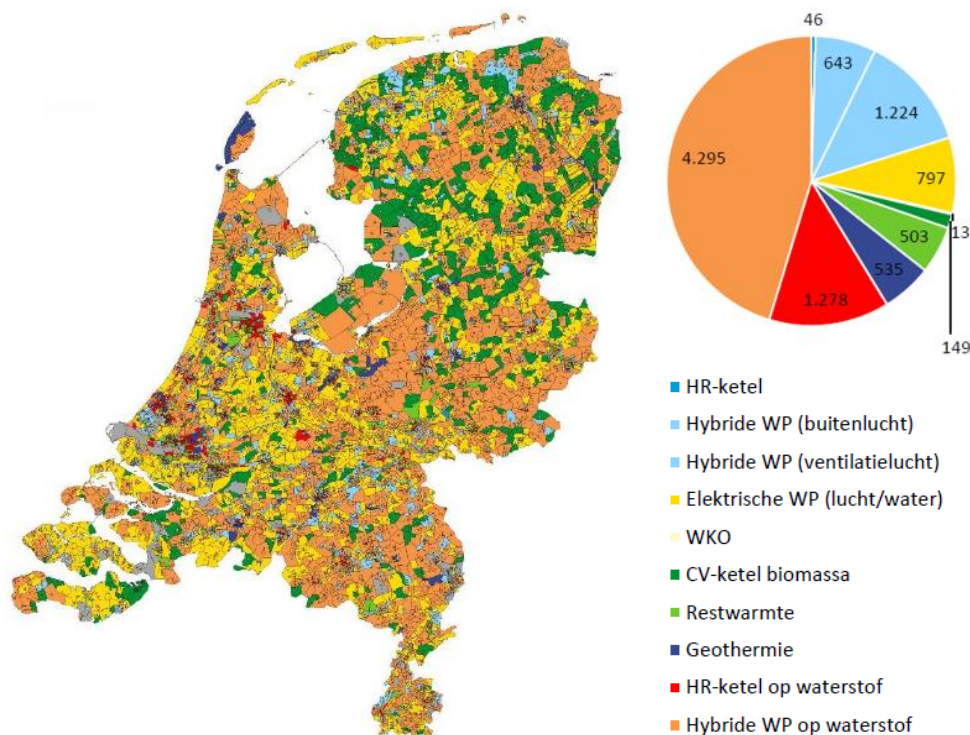
Biomethaan heeft in dit scenario een beperkte rol: slechts 12% van de primaire energievraag voor laagtemperatuur verwarming wordt ingevuld met biomethaan.

Gasgebruik

De laagtemperatuur warmtevoorziening is nationaal georganiseerd. In figuur 3-2 is weergegeven hoe de laagtemperatuur warmtevoorziening is verdeeld over Nederland.

Waterstof is weergegeven in de vlakken met de kleuren rood (gebruik in HR-ketel) en oranje (gebruik in hybride warmtepomp). In de grote steden wordt veelal een HR-ketel op waterstof gebruikt. Verder wordt waterstof in een groot aantal (provincie)steden en dorpen gebruikt in een hybride warmtepomp. Niet overal zal een gasnetwerk blijven bestaan, maar op veel plaatsen wel. In dit scenario wordt voorzien dat een groot deel van alle woningen op het waterstofnet is aangesloten. Waterstof zal ook worden gebruikt voor mobiliteit. Waterstof zal daarnaast ook in een belangrijke behoefte aan feedstock voor de industrie voorzien. Het ontstaan van een landelijk transportnetwerk voor waterstof ligt in dit scenario voor de hand. Zowel in de nabijheid van dit landelijke transportnet, als in de nabijheid van het hoge druk distributienet kunnen tankstations voor het rijden op waterstof gesitueerd zijn.

Het gebruik van biomethaan is weergegeven in de vlakken met de kleuren blauw (gebruik in HR-ketel) en lichtblauw (gebruik in hybride warmtepomp). Daaruit blijkt, dat de distributie van biomethaan zeer lokaal plaatsvindt. Alleen in de gebieden waar biomethaan uit vergisting voorhanden is, vindt distributie plaats. Biomethaan wordt tot in de woningen gebracht. Biomethaan zal ook worden gebruikt voor transport. Dit zal resulteren in tankstations voor biomethaan, waarbij de locaties zodanig gekozen worden dat deze zo goed mogelijk aansluiten bij de bestaande gasinfrastructuur. De diverse gebieden waar biomethaan als brandstof voor laagtemperatuur warmte beschikbaar is en wordt gebruikt, zijn behoorlijk verspreid. Het gebruik van een landelijk transport netwerk voor biomethaan is dan ook niet aannemelijk.



Figuur 3-2. Maatschappijbeeld Regie Nationaal.

Links: kaart van Nederland met de lagetemperatuur warmtevoorziening.

Rechtsboven: Warmteaansluitingen (x1.000) per optie. Rechtsonder: legenda [8].

Uit het bovenstaande volgt, dat in het scenario Regie Nationaal de volgende soorten gasnetten worden voorzien:

| Gebiedstype | Waterstofnetwerk | Biomethaannetwerk |
|-------------------------|--|---|
| Stedelijk | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Geen |
| Woonkernen | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is (geen nationaal netwerk) |
| Landelijk gebied | Geen | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is (geen nationaal netwerk) |
| Industrie | Ja | Geen |

Tabel 3-2. Soorten gasnetten per gebiedstype per type gas, scenario Regie Nationaal.

3.2.3 Scenario Internationaal

In het toekomstbeeld Internationaal is Nederland niet energie-zelfvoorzienend. Nederland importeert op grote schaal (grotendeels hernieuwbare) energiedragers zoals biomassa, biomethaan en waterstof, maar ook afgeleide producten zoals ammoniak.

Een opvallende uitkomst van dit scenario is, dat in de landelijke gebieden brandstoffen in vaste vorm terugkeren. Het kan dan gaan om vaste biomassa voor pelletketels of collectieve systemen. Ondanks het beperkte aandeel in de totale lagetemperatuur voorziening van deze vaste brandstoffen beslaat dit wel een groot gedeelte van de landelijke gebieden. Het aandeel biomethaan is in dit scenario groter dan in de scenario's Regie Regionaal en Regie Nationaal. Verder krijgt waterstof ook in deze toekomstvisie een grote rol als voeding van HR-ketels en hybride



warmtepompen. Waterstof zal in dit scenario hoofdzakelijk worden toegepast in stedelijke gebieden, in de Noordoostpolder en op de Veluwe.

De gasvoorziening binnen scenario Internationaal

Type gas en herkomst

Waterstof en biomethaan komen in dit scenario voor als energiedrager.

Waterstof wordt hoofdzakelijk geïmporteerd uit het buitenland. Daarnaast wordt waterstof in Nederland grootschalig geproduceerd vanuit (geïmporteerde) biomassa. De herkomst van deze geïmporteerde energie en energiedragers wordt in het rapport "Net voor de Toekomst" niet gedefinieerd.

Biomethaan wordt ten dele in Nederland geproduceerd en ten dele geïmporteerd, omdat de beschikbare hoeveelheid biomethaan van eigen bodem gelimiteerd is.

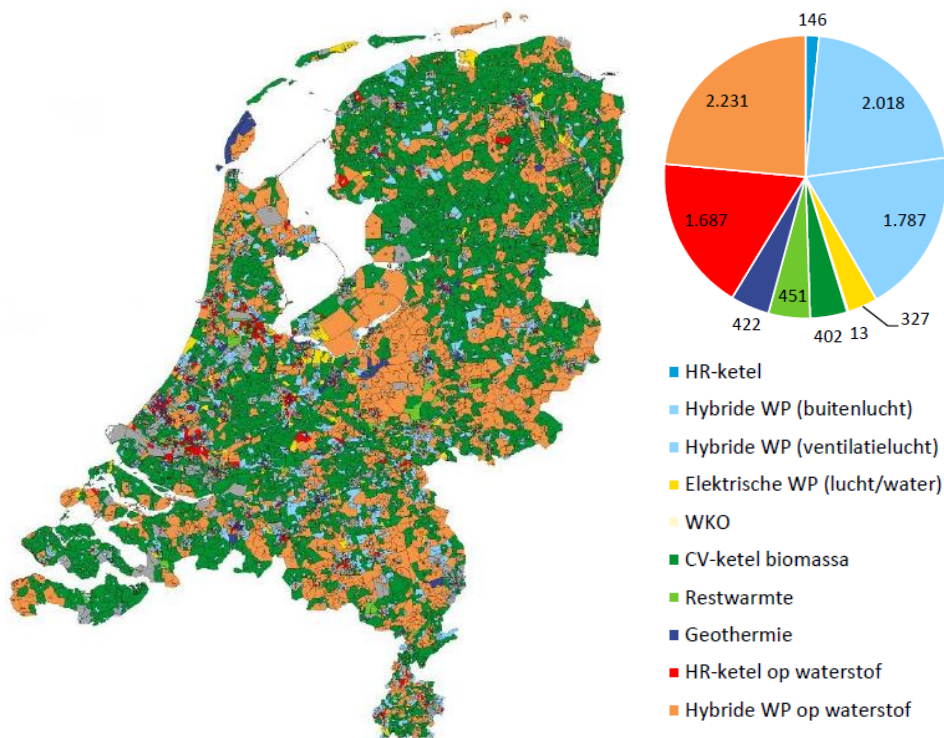
Gasgebruik

In figuur 3-3 is weergegeven hoe de lagetemperatuur warmtevoorziening binnen dit scenario is verdeeld over Nederland.

Het gebruik van waterstof is weergegeven in de vlakken met de kleuren rood (gebruik in HR-ketel) en oranje (gebruik in hybride warmtepomp). In de grote steden wordt veelal een HR-ketel op waterstof gebruikt. Verder wordt waterstof in een groot aantal (provincie)steden en dorpen gebruikt met een hybride warmtepomp. Niet overal zal een gasnetwerk blijven bestaan, maar op veel plaatsen wel. Deze waterstof-netwerken zijn met elkaar verbonden door een nationaal netwerk.

Het gebruik van biomethaan is weergegeven in de vlakken met de kleuren blauw (gebruik in HR-ketel) en lichtblauw (gebruik in hybride warmtepomp). Daaruit blijkt, dat de distributie van biomethaan zeer lokaal plaatsvindt. Alleen in de gebieden waar biomethaan uit vergisting voorhanden is, vindt distributie plaats. Biomethaan wordt tot in de woningen gebruikt.

De diverse gebieden waar biomethaan beschikbaar is en wordt gebruikt, zijn behoorlijk verspreid. Omdat biomethaan ook vanuit het buitenland wordt aangevoerd, zal er behoefte zijn aan een landelijk transport netwerk, waarmee de gebieden met elkaar verbonden worden.



Figuur 3-3. Maatschappijbeeld Internationaal.
 Links: kaart van Nederland met de lagetemperatuur warmtevoorziening.
 Rechtsboven: Warmteaansluitingen (x1.000) per optie. Rechtsonder: legenda [8].

Uit het bovenstaande volgt dat in het scenario Internationaal de volgende gasnetten ontstaan:

| Gebiedstype | Waterstofnetwerk | Biomethaannetwerk |
|-------------------------|--|--|
| Stedelijk | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning |
| Woonkernen | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning |
| Landelijk gebied | Geen | Sporadisch, van landelijk netwerk naar de woning |
| Industrie | Ja | Geen |

Tabel 3-3. Soorten gasnetten per gebiedstype per type gas, scenario Internationaal.

In de stedelijke gebieden en in bepaalde woonkernen zullen zowel waterstofnetwerken als biomethaannetwerken voorkomen. Echter, per wijk zal er slechts één type netwerk ontstaan. De waterstofnetwerken komen vooral voor in de grootste steden van Nederland, biomethaannetwerken in de iets minder grote steden.

3.2.4 Scenario Generieke Sturing

Bij dit toekomstbeeld komt de energietransitie tot stand via een meer organisch proces zonder gerichte regie van de overheid. De overheid stuurt wel door een emissieheffing en/of CO₂-taks, maar geeft inhoudelijk geen sturing. Het klimaatneutrale energiesysteem, dat zich uiteindelijk dan toch vormt, is in kleinere stapjes zonder grote, schoksgewijze veranderingen tot stand gekomen. Het bestaat uit een mix van decentrale, nationale en internationale energiebronnen. In dit scenario wordt, in tegenstelling tot de andere scenario's, gebruik gemaakt van CCS. In energiecentrales en in de industrie worden fossiele brandstoffen, waaronder aardgas, nog steeds veelvuldig gebruikt.



De gasvoorziening binnen het scenario Generieke Sturing

Type gas en herkomst

Waterstof, biomethaan en (fossiel) aardgas komen in dit scenario voor als energiedragers.

Waterstof speelt een zeer kleine rol in dit scenario. De waterstof, die wordt gebruikt, wordt hoofdzakelijk geïmporteerd.

Biomethaan vormt een belangrijk deel van de energievoorziening en wordt voor een klein deel in Nederland geproduceerd en voor een groot deel geïmporteerd. De exacte herkomst van dit biomethaan wordt in het rapport "Net voor de Toekomst" niet gedefinieerd.

(Fossiel) aardgas speelt nog steeds een rol als belangrijke energiebron voor de industrie. Hoewel dit niet duidelijk is vermeld in het rapport "Net voor de Toekomst" is er voor deze studie van uit gegaan, dat dit geïmporteerd aardgas betreft.

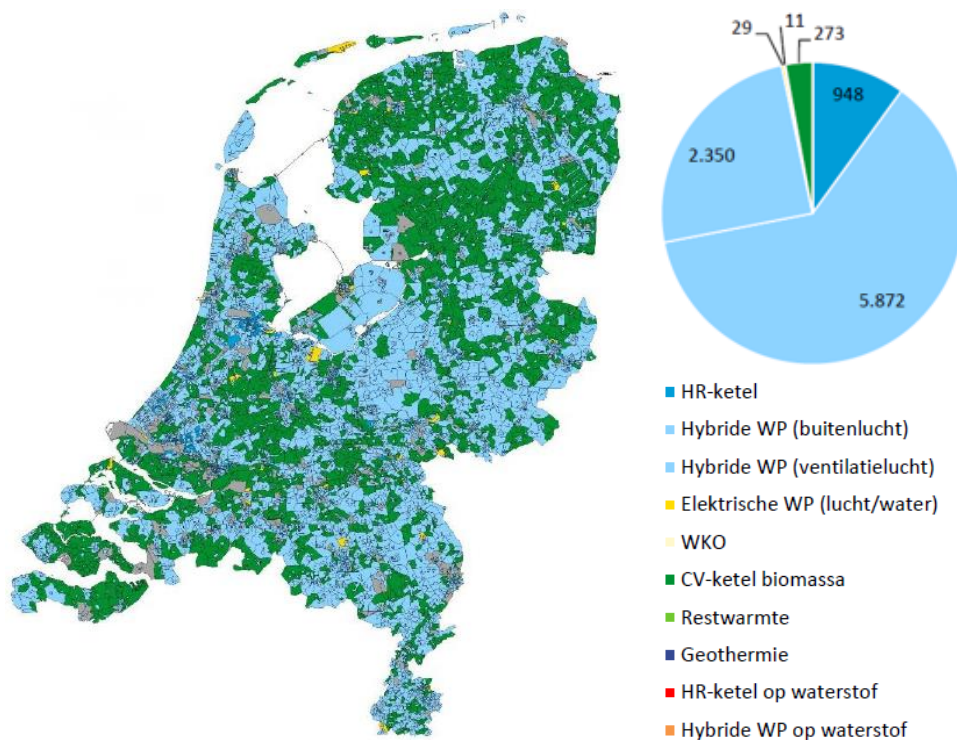
Gasgebruik

De laagtemperatuur warmtevoorziening is voor wat betreft de gasdistributie voor een groot deel vergelijkbaar met de huidige situatie, waarbij aardgas is vervangen door biomethaan. In figuur 3-4 is weergegeven hoe de laagtemperatuur warmtevoorziening is verdeeld over Nederland.

Biomethaan is weergegeven in de vlakken met de kleuren blauw (gebruik in HR-ketel) en lichtblauw (gebruik in hybride warmtepomp). Daaruit blijkt, dat de distributie van biomethaan in grote delen van Nederland plaatsvindt. Alle steden en veel woonkernen gebruiken biomethaan. In landelijke gebieden wordt vaste biomassa gebruikt.

Waterstof wordt niet gebruikt voor laagtemperatuur verwarming. Waterstof wordt daarentegen gebruikt in de mobiliteit en als feedstock voor de industrie.

Aardgas wordt niet gebruikt voor de laagtemperatuur warmtevoorziening. Het gebruik van aardgas vindt hoofdzakelijk in de industrie plaats.



Figuur 3-4. Maatschappijbeeld Generieke Sturing.

Links: kaart van Nederland met de lagetemperatuur warmtevoorziening.

Rechtsboven: Warmteaansluitingen (x1.000) per optie. Rechtsonder: legenda [8].

Uit het bovenstaande volgt dat binnen het scenario Generieke Sturing de volgende soorten gasdistributienetten zullen voorkomen:

| Gebiedstype | Waterstofnetwerk | Biomethaannetwerk | Aardgas |
|-------------------|-------------------|--|---------------------------|
| Stedelijk | Nee | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Nee |
| Woonkernen | Nee | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Nee |
| Landelijk | Nee | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Nee |
| Industrie | Ja, als feedstock | Nee | Ja, in combinatie met CCS |

Tabel 3-4. Soorten gasnetten per gebiedstype per type gas, scenario Generieke Sturing.

Om zowel de industrie van aardgas te voorzien, als de lagetemperatuur warmtevoorziening van woningen en utiliteit met biomethaan mogelijk te maken is het aannemelijk dat er meer dan één landelijk transportnet zal ontstaan.

Hoe de waterstofvoorziening in dit scenario zal worden bewerkstelligd is nu nog onduidelijk. Of dit via een landelijk transportnet of via tankauto's zal worden gerealiseerd is dan nu ook nog niet aan te geven. Een gasdistributienetwerk voor waterstof is niet te verwachten.



3.3 Overzicht van soorten gasnetten die ontstaan binnen de vier scenario's

In tabel 3-5 en tabel 3-6 wordt een overzicht gegeven van de soorten waterstof-, respectievelijk biomethaan netwerken die binnen de vier scenario's aanwezig zijn per gebiedstype. Daaruit blijkt, dat in geen van de vier scenario's in het landelijke gebied netwerken ontstaan voor laagtemperatuur warmtevoorziening op basis van waterstof. In de steden en de woonkernen is het beeld wisselend.

| Scenario | Steden | Woonkernen | Landelijk gebied |
|--------------------------|--|--|------------------|
| Regie Regionaal | Geen | Geen | Geen |
| Regie Nationaal | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Geen |
| Internationaal | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Geen |
| Generieke Sturing | Geen | Geen | Geen |

Tabel 3-5. Netwerken voor laagtemperatuur warmtevoorziening d.m.v. waterstof

Netwerken voor biomethaan komen voor alle gebiedstypen voor in één of meerdere scenario's.

| Scenario | Steden | Woonkernen | Landelijk gebied |
|--------------------------|--|--|--|
| Regie Regionaal | Geen | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is |
| Regie Nationaal | Geen | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is | Sporadisch, uitsluitend waar biomethaan beschikbaar is |
| Internationaal | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Sporadisch, van landelijke netwerk naar de woning |
| Generieke Sturing | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning | Ja, van nationaal netwerk tot in de woning |

Tabel 3-6. Netwerken voor laagtemperatuur warmtevoorziening d.m.v. biomethaan

- Waterstoftoepassing zal niet in landelijke gebieden gaan plaatsvinden. Daar is het dus niet verstandig om het netwerk aan te passen.
- In de andere gebieden is een waterstof-infrastructuur mogelijk. Hier moeten netwerken in stand worden gehouden.
- Biomethaan netwerken hebben vooral een grote rol binnen het scenario Generieke Sturing en in mindere mate binnen het scenario Internationaal. Binnen de andere scenario's is het gebruik van biomethaan beperkt en vindt het vooral plaats in die gebieden, waar biomethaan geproduceerd wordt. Binnen het scenario Regie Regionaal is er een bescheiden rol voor een lokaal distributienet (biomethaan) tot aan of in de woningen weggelegd. Wel is er een rol voor gasdistributie (waterstof en biomethaan) vanaf de productielocaties naar de stadsverwarming centrales en de buffers. Het bestaande 8 bar gasnet en uiteraard het GTS transportnet kunnen dienen als verbinding vanaf de productielocaties (waterstof en biomethaan) naar de industrie, stadsverwarming centrales en de buffers. Hierbij zijn wel

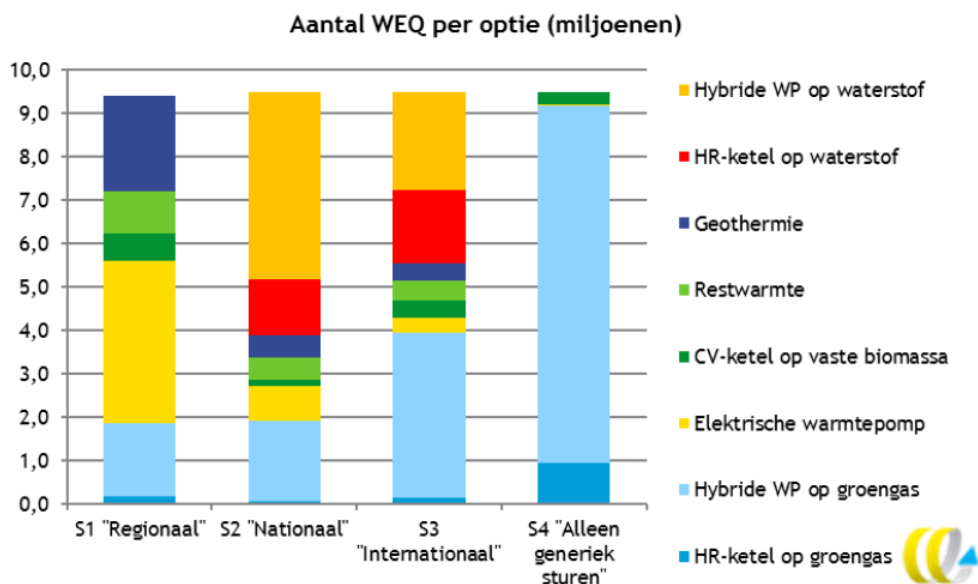


aanpassingen nodig aan de gasontvangstations, waar het gas van het 8 bar net naar de hogere druk in het GTS net moet worden gebracht.

- Of een gasnet gebruikt gaat worden voor biomethaan of voor waterstof is sterk afhankelijk van de lokale beschikbaarheid van deze energiedragers.

In alle scenario's is biomethaan het goedkoopste alternatief, maar de beschikbaarheid is (in verschillende mate) beperkt. Dit betekent dat het gasnet overbodig zal worden in de gebieden waar andere energiedragers, zoals stadsverwarming, geothermie en "all electric" aanwezig zijn. Vanwege de beperkte beschikbaarheid van biomethaan wordt hier noodgedwongen gekozen voor de dan goedkoopste energiedrager. De duurdere alternatieven zijn niet alleen duurder qua productiekosten, maar ook qua transportkosten. Verwacht mag worden dat de duurzaam geproduceerde elektriciteit en geothermische of restwarmte zoveel mogelijk in de gebieden in de nabijheid van de productielocatie wordt gebruikt en dat in de overige gebieden tussen de diverse regio's het (hoge druk) gasdistributienet in stand blijft.

Voor de volledigheid is het totale overzicht van het aantal woningequivalenten per optie en per scenario weergegeven in figuur 3-5.



Figuur 3-5. Overzicht van woningequivalenten per optie per scenario [8].



Gasdistributienetten zullen er in 2050 nog steeds zijn, maar niet voor aardgas en niet overal

Uit de scenario's blijkt, dat er diverse energiedragers worden voorzien. Dat zijn:

- warmte (vanuit diverse bronnen)
- elektriciteit
- biomethaan
- waterstof
- (fossiel) aardgas (naar de industrie, in combinatie met CCS)
- vaste biomassa

Drie van de vier scenario's voorzien in een substantieel aantal woning-equivalenten, die met behulp van condenserende CV-toestellen of hybride warmtepompen in hun laagtemperatuur warmtevraag voorzien. Voor deze gebieden zal een gasdistributienet tot in de woning aanwezig zijn (dan wel in stand worden gehouden).

In de nieuwe situatie zouden daarmee waterstof, biomethaan en (fossiel) aardgas door de bestaande gasnetten getransporteerd kunnen worden.

De situatie zal per regio verschillend zijn.

Voordat nieuwe gassoorten door het netwerk getransporteerd kunnen worden, moet eerst duidelijk zijn in hoeverre dit technisch ook daadwerkelijk mogelijk is. Daarbij is het van belang dat tenminste het huidige veiligheidsniveau voor de toekomst gegarandeerd kan worden. Hiervoor zijn wellicht aanpassingen nodig met betrekking tot de aanleg, het onderhoud en het gebruik van het netwerk.



4 Waterstof

Eén van de nettypes, die in de toekomst mogelijk een rol gaan spelen zijn waterstofnetten. Waterstof is vanuit het oogpunt van de energievoorziening - evenals aardgas - een gasvormige energiedrager. Verbranding van deze energiedrager levert in tegenstelling tot aardgas geen CO₂ emissie op. Daardoor is waterstof één van de energiedragers, die bijdraagt aan de overheidsdoelstelling om in de bebouwde omgeving CO₂ emissies te elimineren. Waterstof is niet van nature beschikbaar en zal dus geproduceerd moeten worden. Hiervoor is op dit moment een aantal technieken voorhanden. Mogelijke productiemethoden zijn de omzetting van (duurzaam opgewekte) elektriciteit door middel van een elektrolyser of de productie uit methaan, waarbij het geproduceerde CO₂ wordt afgevangen (Carbon Capture and Storage, ofwel CCS). Een andere mogelijke variant is de omzetting van waterstof en CO₂ naar biomethaan, waarbij voor de aanvoer wellicht een plaatselijk waterstofnet nodig zal zijn.

De geproduceerde waterstof bevat nog een aantal andere gasvormige componenten in lage concentratie. De concentraties van deze componenten, zoals onder andere water, koolmonoxide, koolstof dioxide, stikstof en zuurstof, zijn afhankelijk van de gekozen productiewijze en reinigingstechnieken. Het is dan ook van belang om de specifieke kenmerken van deze gassen voor zowel het net (integriteit), als ook voor de eindgebruiker (toepassing) te kennen. De bestaande distributie-infrastructuur zal op een aantal punten moeten worden aangepast om het gasnet volledig geschikt te maken voor veilig en efficiënt transport van waterstof.

Waar in deze studie gesproken wordt over waterstof, wordt 100% waterstof bedoeld.

In hoofdstuk 7 is een overzicht opgenomen van de belangrijkste aandachtspunten en de bijbehorende maatregelen en kosten.

Waterstof is bijzonder geschikt voor toepassing in brandstofcellen. Deze brandstofcellen zijn een veelbelovende schakel in de toekomstige energievoorziening van de bebouwde omgeving, omdat ze in combinatie met een elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp, met een hoog rendement laagtemperatuur verwarming kunnen realiseren.

4.1 Gebruik van waterstof

4.1.1 *Gebruik van waterstof voor conventionele gastoestellen*

Waterstof kan worden gebruikt als brandstof in gasbranders. De verbrandingsnelheid van waterstof is echter aanzienlijk hoger dan die van methaan met mogelijk vlaminslag en beschadiging van de brander als gevolg. Dit betekent dat bestaande gasverbruikstoestellen niet eenvoudig (zoals door aanpassing van de diameter van de inspuisers, of door een nieuwe afregeling van de gas/lucht-verhouding) geschikt gemaakt kunnen worden voor waterstof.

De huidige toestellen gebruiken het principe van de ionisatie stroom voor de vlambeveiliging. Bij een waterstofvlam is deze ionisatiestroom praktisch gesproken afwezig en moet er een ander beveiligingsprincipe (bijvoorbeeld thermisch) worden gebruikt. Dit betekent dan ook dat de branderautomat van het toestel zal moeten worden aangepast. Of dit zonder verdere aanpassingen van het toestel mogelijk is, is nu nog onbekend. Op dit moment zijn op waterstof aangepaste branderautomaten nog niet commercieel beschikbaar.

Waterstofvlammen zijn onzichtbaar, hetgeen het gebruik van open vlammen (zoals in de huidige kooktoestellen) onaantrekkelijk maakt. Voor zover men wenst te blijven



koken op gas, zullen de toestellen met gesloten branders moeten worden uitgevoerd (bijvoorbeeld katalytische branders).

Kortom, het bestaande toestelpark zal moeten worden vervangen of ten minste zullen de toestellen moeten worden voorzien van nieuwe branders en/of besturing.

4.1.2 Gebruik van waterstof voor brandstofcellen

Brandstofcellen worden gebruikt om met behulp van waterstof (en zuurstof uit de lucht) elektriciteit te produceren. In combinatie met een elektrisch aangedreven compressiewarmtepomp kan een efficiënte verwarming van woningen en gebouwen worden gerealiseerd [9].

Via deze route kan een hoger rendement worden gerealiseerd dan met de conventionele verbranding van waterstof. Brandstofcellen stellen echter veel hogere eisen aan de zuiverheid van de waterstof dan conventionele branders.

De kosten van het bedienen van een brandstofcel worden in belangrijke mate bepaald door de levensduur van de katalysator. Deze levensduur wordt op zijn beurt weer in belangrijke mate bepaald door de zuiverheid van de brandstof. In bijlage II wordt een overzicht gegeven van de huidige (gas)kwaliteitseisen, die aan waterstof worden gesteld.

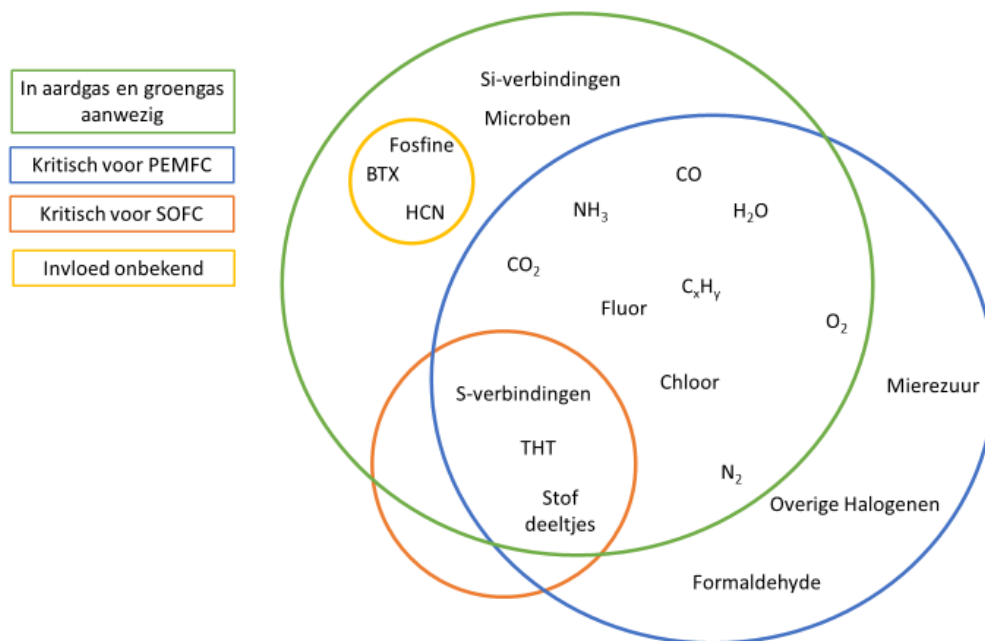
De in deze bijlage genoemde PEMFC (Polymeer-Elektrolyt Membraan) brandstofcellen zijn een type, dat vooral interessant is voor mobiliteitstoepassingen. SOFC (vaste-oxide) brandstofcellen zijn veel minder kritisch voor wat betreft de kwaliteit van de waterstof die wordt gevraagd. SOFC brandstofcellen komen vooral in aanmerking voor toepassing in stationaire opstellingen, zoals in gebouwen. Door de waterstof te transporteren door het bestaande aardgasnetwerk zal de waterstof (zeker in de beginperiode) “vervuild” worden met aardgascomponenten, die aan de buiswand van het gasnet kleven. Na verloop van tijd zullen deze “oude gasresten” echter verdwijnen, omdat de leidingen schoongespoeld worden. In figuur 4-1 zijn de kritische componenten voor SOFC en PEMFC brandstofcellen afgebeeld en vergeleken met mogelijk aanwezige componenten uit het aardgas.

De componenten in de groene cirkel worden genoemd in de “Aanvullende Voorwaarden RNB Groen Gas Invoeders” [10] voor het invoeden van groengas in distributienetten, opgesteld door de regionale netbeheerders (later vervangen door de MR-Gaskwaliteit). De componenten in de blauwe cirkel zijn de toegestane componenten in PEM brandstofcellen voor motorvoertuigen, waarbij de maximum concentraties van deze componenten worden gegeven in ISO 14687-2 (2012) (zie bijlage II).

Volgens ASUE [11] is de SOFC brandstofcel veel minder kritisch voor vervuilingen in waterstof dan een PEM brandstofcel. SOFC brandstofcellen worden nu al gebruikt in combinatie met aardgas. Om de waterstof uit het aardgas te halen vindt er in een vóór de brandstofcel geplaatste reinigungsstap gelijktijdig een omzetting van aardgas plaats, waarbij waterstof wordt afgesplitst en naar de brandstofcel wordt geleid. Omdat deze brandstofcellen inclusief een reinigungsstap op de markt worden gebracht, zijn de eisen die aan de waterstof “sec” worden gesteld echter niet bekend.

Het aardgas, dat aan een dergelijke brandstofcel wordt toegevoerd, mag in het algemeen geen zwavel bevatten. Volgens DVGW wordt op dit moment in 25% van de Duitse aardgasdistributienetten een zwavelvrij odorant toegepast.

De meeste stoffen, die in de het aardgasnet geabsorbeerd zijn, zullen na overschakeling op de distributie van waterstof na verloop van tijd vanzelf verdwijnen. De componenten O₂ en N₂ zullen, vanwege permeatie, echter niet vanzelf uit het netwerk verdwijnen. Het fenomeen permeatie wordt nader toegelicht in bijlage VI.



Figuur 4-1. Overzicht van kritische vervuilingen voor SOFC en PEMFC brandstofcellen.

4.1.2.1 Consequenties voor het gasnet als brandstofcellen de eindtoepassing zijn

Het gebruik van het bestaande gasnet voor waterstofvoeding naar brandstofcellen kan leiden tot overschrijding van de grenswaarden voor bepaalde gascomponenten. In het bijzonder vormen stofdeeltjes, stikstof (N_2) en zuurstof (O_2) een bedreiging bij de toepassing van PEMFC brandstofcellen.

Zelfs indien zeer schoon waterstofgas met het bestaande gasdistributienet wordt gedistribueerd, zullen O_2 en N_2 altijd aanwezig zijn. Dit is het gevolg van permeatie vanuit de omgeving (lucht) via de wand van kunststofleidingen in het gasnet. Afhankelijk van de stroomsnelheid van het gas (en daarmee de verblijftijd van het gas in de leiding) kunnen de kritische concentraties voor PEMFC brandstofcellen al binnen een paar uur overschreden worden.

Dit houdt in, dat er voor stationaire PEMFC brandstofcellen een reinigingsstap direct vóór de brandstofcel nodig is. Voor voertuigen, die met PEMFC brandstofcellen worden aangedreven, zal het gas stroomopwaarts van het waterstofstation gereinigd moeten worden. De beschikbaarheid en betaalbaarheid van een dergelijke technologie om verontreinigd waterstof voldoende schoon te maken is een punt van aandacht.

De aanwezigheid van stofdeeltjes in de lange leidingen van het distributienet is nagenoeg onvermijdelijk. Ze worden geïntroduceerd bij de aanleg of bij werkzaamheden, maar zijn met een filter relatief eenvoudig af te vangen. De aanwezigheid van zwavel, indien - zoals bij aardgas - THT (Tetra HydroThiofeen) als odorant wordt toegepast, is een probleem. Er bestaan als alternatief echter ook zwavelvrije odoranten, die dit probleem kunnen oplossen. Bij de introductie van een dergelijk zwavelvrij odorant moet wel rekening worden gehouden met het feit, dat het bestaande gasnetwerk is verzadigd met THT. Dit is nu in evenwicht met de in het aardgas aanwezige THT (en andere aardgascomponenten), maar zal na omschakeling naar schoon waterstof langzaam uitdampen. Op termijn zullen de zwavelcomponenten verdwenen zijn. Op dit moment is het nog onbekend hoe lang het duurt om een net schoon te spoelen. Dit is zeker afhankelijk van lokale



omstandigheden, maar op voorhand moet met een periode van minstens enkele maanden rekening worden gehouden. Indien THT als odorant toegepast wordt, zal bij het toepassen van brandstofcellen een reinigingsstap voor de brandstofcel overwogen moeten worden.

4.2 Distributie van waterstof

Bij de distributie van waterstof moet rekening gehouden worden met eventuele consequenties voor de toegepaste materialen in het net en de daaraan gerelateerde veiligheidsaspecten. In de volgende paragrafen wordt hierop nader ingegaan.

4.2.1 Invloed waterstof op de materialen in het gasnet

Voor de beschrijving van de invloed van waterstof op de diverse materialen wordt onderscheid gemaakt tussen kunststoffen en metalen. Beide materiaalgroepen hebben significant andere degradatiemechanismen en worden op verschillende wijze door de waterstof beïnvloed. Bij de analyse is als uitgangspunt genomen, dat de waterstof schoon en technisch zuiver is op het moment dat deze wordt ingevoerd. In deze paragraaf worden de resultaten op hoofdlijnen besproken. Voor een meer gedetailleerde onderbouwing wordt verwezen naar bijlage III.

4.2.1.1 Kunststoffen

De belangrijkste kunststoffen, die in het gasdistributienet voorkomen, zijn de drie generaties PE, hard- en slagvast PVC, de rubbers NBR en SBR en de kunststof POM. Het betreft hier niet alleen leidingmaterialen, maar ook rubbers, die worden gebruikt voor afdichtingen in verbindingen en afsluiters, alsmede voor onderdelen van drukregelaars en gasmeters.

Kunststoffen kunnen worden aangetast, doordat ze chemisch reageren met waterstof of doordat hun fysische eigenschappen veranderen door bijvoorbeeld absorptie of zwellen [12]. De gevoeligheid van het materiaal voor waterstof is afhankelijk van diverse factoren, zoals druk, tijdsduur, temperatuur en gassamenstelling. Er zijn veel uiteenlopende proeven gerapporteerd [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20]. Deze informatie is gebruikt om een gerichte levensduurvoorspelling te kunnen geven. Voor PE is tot 10 jaar gebruik als distributiemateriaal voor waterstof geen degradatie vastgesteld. Daarom kan van dit materiaal worden verwacht, dat op de lange termijn geen degradatie door waterstof zal optreden.

Voor PVC is dit beeld wat minder duidelijk. Voor zowel hard als slagvast PVC is tijdens een vier jaar durend onderzoek geen degradatie aangetoond. De verwachting van Kiwa Technology is, dat dit ook voor de lange duur zal gelden.

Voor de rubbers NBR en het oudere rubber SBR is er op korte termijn geen invloed van waterstof op de materiaaleigenschappen vastgesteld. Ook in een onderzoek van het Amerikaanse National Renewable Energy Laboratory [20] worden deze beide rubbersoorten als goed bestand tegen waterstof beschouwd.

Voor de kunststof POM, die veelvuldig in koppelingen, gasmeters en huisdrukregelaars wordt toegepast, is gedurende een twee jaar durend onderzoek (8 bar, 62% H₂) geen degradatie vastgesteld. Wat dit precies betekent voor het langeduur gedrag is echter nog onbekend.

4.2.1.2 Metalen

Door waterstof kunnen metalen degraderen en kan de kwaliteit achteruit gaan. Kritische faalmechanismen zijn verandering in treksterkte, vermoeiing en het optreden van waterstofverbrossing. Ook over het gedrag van de metalen, die in een gasdistributienet kunnen voorkomen, in combinatie waterstof zijn veel verschillende onderzoeken uitgevoerd en gerapporteerd. Deze informatie is gebruikt om een verwachting over de levensduur te kunnen geven.

Voor diverse koolstofstaalsoorten, die in de gasdistributie worden gebruikt, is geconcludeerd dat waterstofverbrossing niet zal optreden, indien de waterstof onder normale temperatuur wordt getransporteerd. Als het gas nat is (dat wil zeggen dat er



water in de leiding staat) kan dit onder ongunstige omstandigheden tot waterstofverbrossing leiden. De kans dat in een dergelijke situatie gewone corrosie optreedt is echter veel groter.

Waterstof heeft geen belangrijke invloed op de trekeigenschappen van de toegepaste staalsoorten. De flexibiliteit en de breuktaaiheid van de materialen nemen weliswaar af, maar worden nog als ruim voldoende beoordeeld. Indien er een kleine concentratie zuurstof (enkele honderden ppm_v) in waterstof aanwezig is, blijkt de vermoeiing van staal gelijk aan de vermoeiing in aardgas.

De invloed van waterstof op gietijzer is vergelijkbaar met die van waterstof op staal. Voor de veel toegepaste RVS soorten (impulsleiding en flexibele gasmeter-aansluiting), meestal AISI 316L of de Ti-variant, wordt gemeld dat deze onder de heersende omstandigheden in het distributienet tegen waterstof bestand zijn. Waterstofverbrossing is niet waargenomen [21].

Alle onderzoeken die tot nu toe gepubliceerd zijn, hebben geen degradatie van kunststoffen en rubberen gasdistributiematerialen door waterstof laten zien. De vraag bij de onderzoeken is, of deze lang genoeg zijn uitgevoerd om ook over het langeduur gedrag voldoende zeggingskracht te hebben.

Voor staal, RVS en gietijzer, dat wordt gebruikt bij de gasdistributie, kan geconcludeerd worden, dat het belangrijkste faalmechanisme (waterstofverbrossing) in de praktijk niet zal optreden. De achteruitgang van enkele mechanische eigenschappen is gering en kan als onbelangrijk bestempeld worden.

Koper, messing en aluminium lijken niet beïnvloed te worden door waterstof.

Voor de bestaande gasdistributienetten kan dan ook gesteld worden, dat deze geschikt zijn om waterstof te transporteren.

Op basis van de bovenvermelde bevindingen wordt geconcludeerd, dat de thans toegepaste aanleg- en ontwerptechnieken ook ingezet kunnen worden voor het aanleggen van nieuwe gasleidingen.

4.2.1.3 *Micro-organismen in waterstof*

In waterstof kunnen micro-organismen voorkomen. Het is bekend, dat leidingen bacteriegroei sterk kunnen bevorderen en microbiologisch geïnduceerde corrosie kunnen stimuleren. Bij de relatief lage drukken en relatief lage temperaturen ($P_{\max} < 8$ bar en $T_{\max} < 18^{\circ}$ C) en onder de droge omstandigheden, die doorgaans heersen in het gasdistributienet, is de kans dat micro-organismen zich ontwikkelen zeer klein.

4.2.2 *Veiligheidsaspecten bij de distributie van waterstof*

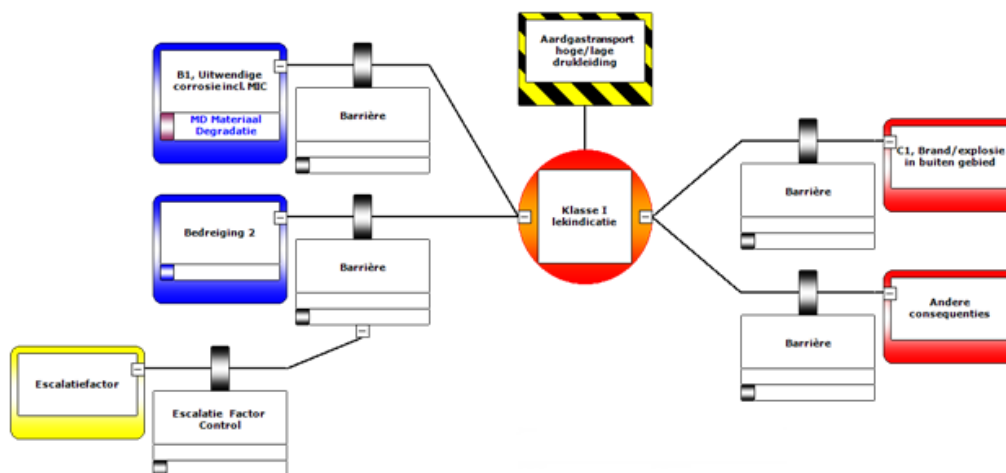
4.2.2.1 *Technische aspecten van risicobeheersing*

Door de gasdistributiesector is een zogenoemde Generieke Bowtie opgesteld, waarin alle veiligheidsrisico's van de gasdistributie in beeld zijn gebracht [22].

De Bowtie-methode is een kwalitatieve risicoanalysemethode, waarmee op een systematische wijze een beeld kan worden verkregen van de risico's, die in een organisatie aanwezig zijn en van de preventieve en beschermingsmaatregelen, die hierop (kunnen) worden ingezet. Risico's, bedreigingen, preventieve en beschermingsmaatregelen zijn in één model verenigd. Centraal staat de ongewenste gebeurtenis. Links de oorzaken, rechts de gevolgen.



Beheersmaatregelen worden aangeduid in de vorm van barrières. Een voorbeeld van een Bowtie is weergegeven in figuur 4-2.



Figuur 4-2. Voorbeeld van een (gedeeltelijke) Bowtie [22]

Bij het beoordelen van specifieke risico's van de distributie van waterstof is de Generieke Bowtie gebruikt. Hierbij is voor elke barrière bij de aardgasdistributie nagegaan of deze barrière ook bij waterstof afdoende is.

Risico van onvoldoende gasruikbaarheid

Een van de aanwezige barrières in het huidige aardgas systeem is de reuk van aardgas door het toegevoegde THT. Waterstof is - evenals aardgas - een nagenoeg reukloze stof. Om ook hier gebruik te kunnen maken van een vergelijkbare barrière zal ook aan waterstof een geurstof moeten worden toegevoegd. Dit kan THT zijn, maar zou ook een andere, bij voorbeeld zwavelvrije geurstof kunnen zijn. In dit rapport wordt er van uit gegaan, dat waterstof alleen gedistribueerd kan worden, indien dit geodoriseerd is. De risico's die in dit hoofdstuk worden benoemd, gaan uit van het gebruik van geodoriseerd waterstofgas.

Risico van graafschade

Bij de distributie van waterstof zijn de risico's van graafschade een punt van aandacht, vanwege de lagere ontstekingsenergie van waterstof (0,019 mJ), vergeleken met 0,2 mJ voor aardgas, waardoor waterstof al bij eventuele aanwezigheid van een kleinere ontstekingsbron (vonk) kan ontsteken. Daarnaast is ook de gas/luchtverhouding, waarbij waterstof een brandbaar mengsel vormt, anders dan voor aardgas. Voor waterstof varieert deze concentratie van 4 vol% tot 74 vol%. Deze concentratie varieert voor het Nederlandse aardgas van 5,9 vol% tot 15 vol%. Een waterstof/lucht mengsel heeft dus een ruimere explosiegrens, waardoor de kans dat - bijvoorbeeld bij graafschade - een gaswolk tot ontsteking of ontploffing komt, groter is dan bij een aardgaslek. Bovendien is er al bij kleinere hoeveelheden gas/lucht-mengsel (dan bij aardgas) kans op schokgolven, met de bijbehorende kans op schade en letsel. Aan de andere kant vervliegt waterstof - onder vergelijkbare omstandigheden - veel sneller dan aardgas (als gevolg van het grote verschil in soortelijke massa), waardoor de ontsteekbare gaswolk veel kleiner zal zijn. Praktijkonderzoek in het Verenigd Koninkrijk [23] naar het gedrag van lekkend waterstof in gebouwen laat zien, dat het onder normale condities moeilijk is een ontsteekbaar waterstof-lucht mengsel te creëren. Aanbevolen wordt verder (praktijk)onderzoek te doen naar de wijze waarop het risico van gaslekken verandert als van aardgas overgegaan wordt op waterstof. Overigens is bij een lage concentratie van waterstof in lucht (onder de 10%) de benodigde ontstekingsenergie gelijk aan die van aardgas. Bij een stoichiometrisch



mengel (27% waterstof in lucht) is de ontstekingsenergie een factor 15 lager dan bij aardgas [24].

Daarom is het denkbaar dat, bij ongewijzigd beleid, een gaslek met waterstof bij graafschade vaker escaleert naar een explosie/brand dan met aardgas het geval is. Bij aardgas is bij distributiedrukken (≤ 100 mbar) vrijwel nooit sprake van ontsteking. Nader (praktijk)onderzoek moet uitwijzen, of en in welke mate, aanvullende maatregelen nodig zijn. Ook bij weinig schade is het niet goed voor het imago van waterstof(distributie) als graafschades vaker tot een incident zouden leiden.

Om dit risico te verminderen, kan allereerst gewerkt worden aan het verminderen van het aantal graafschades zelf. Dit is deels reeds gebeurd via een voorlichtingscampagne en door het verplicht melden van graafactiviteiten en het uitwisselen van kaartgegevens (KLIC-meldingen). Dit heeft de afgelopen jaren enig effect gehad, maar een reductie tot een fractie van het huidige aantal graafschades is niet waarschijnlijk. Voor zover dit maatregelen zijn die ook toepasbaar zijn voor het huidige gasnet, zijn dit natuurlijk wel typische 'no regret' maatregelen.

Gezien de andersoortige eigenschappen van waterstof in vergelijking met methaan, zouden bij de introductie van waterstof distributie de betreffende leidingen in het beheersysteem van de netbeheerder met een zogenaamde "eis voorzorgsmaatregel" moeten worden aangemerkt, zodat deze extra aandacht krijgen bij/na een KLIC-melding. Hierbij kan gedacht worden aan extra toezicht of het informeren van de gravende partij, dat het hier om een waterstofleiding gaat met andere eigenschappen van het gas. Na verloop van tijd kan de aanwezigheid van de indicatie "eis voorzorgsmaatregel" in het beheersysteem worden heroverwogen. Verder is het raadzaam om in deze periode methodes te ontwikkelen om op een goedkopere en efficiënte manier graafschades te beperken. Bijvoorbeeld door het inzetten van grondradar om leidingen op te sporen of door het ontwikkelen van een leidingdetector, die op de graafmachine kan worden gemonteerd en die ingrijpt, indien deze te dicht bij de leiding komt. Ook het extra informeren van aannemers omtrent de specifieke kenmerken van waterstof en hoe daar mee om te gaan, middels tool-box bijeenkomsten, lijkt een goede maatregel om incidenten te voorkomen.

Om het risico van de gasuitstroom bij graafschade wezenlijk te reduceren moeten technieken worden toegepast, die de uitstromende gashoeveelheid drastisch beperken. Een mogelijke technische oplossing is het aanbrengen van excess-flow-valves (EFV) en/of een systeem met drukmeetpunten en op afstand bedienbare afsluiters (al dan niet automatisch). Een dergelijk systeem wordt nu al toegepast in sommige aardbevingsgevoelige gebieden. In aangepaste vorm kan eenzelfde soort systeem een rol spelen om de veiligheid van het waterstofnet te verhogen.

Risico van ontsteking bij werkzaamheden

In principe vinden werkzaamheden aan het gasnet zo veel mogelijk drukloos plaats. Bij het drukloos maken (en in mindere mate bij het in bedrijf stellen) van leidingen en installaties kan gas vrijkomen, dat afgeblazen of afgefakkeld moet worden.

Bij het affakkelen van waterstof moeten speciale, tegen vlamslag beveiligde, branderconstructies worden toegepast.

Een punt van nader onderzoek is de noodzaak om gasleidingen bij het in bedrijf stellen eerst te spoelen met een inert gas (bijvoorbeeld stikstof) om te voorkomen dat er op het afblaaspunt een inslaggevaarlijk gas/luchtmengsel uittreedt. Voor distributie van methaan wordt deze voorzorgmaatregel als overbodig ervaren, maar voor waterstof verdient dit heroverweging (bijvoorbeeld op basis van praktijkproeven). Ten opzichte van de reguliere aanleg- en onderhoudskosten vormt het eventueel spoelen met inert gas een relatief beperkte kostenpost.

Risico van permeatie

Waterstof permeëert een factor 5 sneller door kunststof dan methaan (zie bijlage VI). De totale hoeveelheid die op deze wijze verloren gaat is klein ten opzichte van de verliezen door 'gewone' lekkage, maar onder speciale omstandigheden kan permeatie een risico opleveren. Het betreft dan permeatie van een kunststof



gasleiding (veelal PE), gelegd in een lange mantelbuis. De ringvormige ruimte tussen de buitenkant van de gasleiding en de binnenzijde van de mantelbuis wordt - bij afwezigheid van ventilatie - gevuld met een gas/luchtmengsel, dat explosief kan ontsteken indien er een ontstekingsbron aanwezig is. Bij afwezigheid van ventilatie kan al binnen enkele dagen een dergelijk mengsel worden gecreëerd. Na nog langere tijd zal de bovenste explosiegrens voor waterstof overschreden zijn en is het gevaar van explosie en inslag weer minder groot. Het probleem speelt alleen bij langere mantelbuizen (indicatie: lengte meer dan 5 meter), dus niet bij gewone geveldoorvoeren. Kruipruimtes, waar een vergelijkbare permeatie/ventilatie situatie heerst, zijn in beginsel voldoende geventileerd.

Of dit scenario in de praktijk een probleem vormt, waartegen maatregelen genomen moeten worden (bijvoorbeeld het mechanisch ventileren van mantelbuizen), moet nog nader worden onderzocht.

Risico van verbindingen

Lekkage uit verbindingen (zowel buiten, als binnen) en de eventuele verdere gevolgen vormen een risico voor alle leidingsystemen, die brandbaar gas distribueren. In kleine spleetvormige lekken is de stroming bij distributiedrukken laminair. Dit betekent dat de volumestroming, bij een gegeven druk, omgekeerd evenredig is met de dynamische viscositeit van het gas. De viscositeit van waterstof is $0.88 \cdot 10^{-6}$ Pa.s. Die van methaan is ongeveer 25% hoger: $1.10 \cdot 10^{-6}$ Pa.s.

De conclusie is, dat een eventueel lekkende verbinding in een waterstofnet qua volumestroom ca. 25% hoger is ten opzichte van eenzelfde lekkende verbinding in een aardgasnet. Dit verschil is nauwelijks significant uit oogpunt van veiligheid, te meer daar de energie-inhoud van de lekkage meer dan de helft kleiner is. Een punt van aandacht blijft wel de lagere ontsteekenergie en de grotere concentratierange van het brandbare mengsel. De expertopinie is voorlopig, dat het effect hiervan op het risico verwaarloosbaar is [25]. Nader onderzoek en praktijksimulaties moeten definitief uitsluitsel geven.

4.2.2.2 Niet-technische aspecten van risicobeheersing

Technische maatregelen en goede werkinstructies zullen de veiligheid van waterstof distributie in beginsel op hetzelfde peil brengen als die van de huidige aardgas distributie. Immers, in beide gevallen betreft het de distributie van brandbaar gas in de bebouwde omgeving, waarbij de eerste prioriteit is ervoor te zorgen dat er geen gas lekt. Er zijn geen fundamentele technische en fysische redenen, waarom dat bij waterstof minder goed zou kunnen slagen dan bij aardgas.

Net zoals bij aardgas is het belangrijk dat er zorgvuldig wordt gewerkt en dat deze zorgvuldigheid geborgd en bewaakt wordt. De aandacht voor dit aspect mag, ook in de periode na de introductie, niet verslappen.

Bij de distributie van waterstof zijn er diverse aandachtspunten met betrekking tot de veiligheid.

Met name de lagere ontstekingsenergie, de bredere range van brandbare gas/luchtmengsels en de hogere verbrandingssnelheid zijn eigenschappen, waar rekening mee moet worden gehouden. Bij de introductie van waterstof is extra aandacht voor de veiligheid dan ook op zijn plaats.

4.2.3 Verrekening gas (energie)

In deze studie is er van uit gegaan, dat bij het distribueren van waterstof afspraken over de gaskwaliteit zijn gemaakt met de toeleverancier, waardoor de variaties in gassamenstelling beperkt zullen blijven. Het meten van de geleverde hoeveelheid gas gebeurt bij de kleinverbruikers bij een druk, gelijk aan die van de binneninstallatie. Aangezien waterstof ruim driemaal minder energie per volume-eenheid



bevat dan methaan, zal de volumestroom bij gelijkblijvende vermogensvraag ruim een factor drie toenemen. Een op aardgasverbruik gedimensioneerde gasmeter kan dan buiten zijn meetbereik bedreven worden en is dan niet geschikt voor deze toename in volumestroom. Opgemerkt moet worden, dat in de praktijk de gasmeter voor aardgas vaak is over gedimensioneerd. Het theoretische effect van waterstof op de grootte van de gasmeter is weergegeven in tabel 4-1. Theoretisch gezien moet de gasmeter voor waterstof drie klassen groter zijn dan de gasmeter voor aardgas om dezelfde hoeveelheid energie te kunnen meten. Of dit in de praktijk nodig zal zijn is vooral afhankelijk van de maximale energievraag en het daarbij te bemeten volume. De maximale energievraag wordt vooral bepaald door de warm water voorziening. Door deze anders in te richten (bijvoorbeeld door het plaatsen van een boiler) kan de maximale energievraag en daarmee het te meten volume, ook beperkt blijven. Een andere gunstige factor is het feit, dat met waterstof bedreven toestellen een circa 7% hoger rendement kunnen halen (zie paragraaf 4.3.5). Dit betekent dat ook hierdoor de te meten volumestroom wordt gereduceerd.

| G-klasse (CH ₄) | CH ₄ max (m ³ /h) | H ₂ max (m ³ /h) | G-klasse (H ₂) |
|-----------------------------|---|--|----------------------------|
| 1,6 | 2,5 | 8,3 | 6 |
| 2,5 | 4 | 13,3 | 10 |
| 4 | 6 | 20,0 | 16 |
| 6 | 10 | 33,3 | 25 |
| 10 | 16 | 53,3 | 40 |

Tabel 4-1. De benodigde capaciteit van gasmeters (standaard klasse) voor waterstof vergeleken met aardgas/methaan.

Balgenmeters hebben grotere afmetingen nodig om de grotere volumestroom te kunnen verwerken en zullen, indien zij nodig zijn, wellicht niet meer passen in de bestaande huishoudelijke meterkast. Een mogelijke oplossing hiervoor is het installeren van ultrasone gasmeters. Dit type meter kan bij vrijwel gelijkblijvende afmetingen een grotere volumestroom meten.

Volgens de meterfabrikant Landis & Gyr zijn er geen huishoudelijke ultrasone gasmeters groter dan G6 op de markt. De Europese normcommissie CEN/TC 237 (Gasmeters) heeft in het najaar van 2017 een studiegroep gevormd, die de benodigde ontwikkelingen voor gashoeveelheidsmeting van waterstof in gasnetten zal inventariseren.

Het ruimteprobleem van balgenmeters is als potentiële “Market Failure” geïdentificeerd binnen het project H21 (“Leeds”). Binnen dit project is er wellicht budget voor nadere ontwikkeling van deze gasmeters.

Een no-regret optie voor de netbeheerder om de hoeveelheidsmeting van waterstof te kunnen realiseren is in overleg te treden met meterleveranciers om de huidige huishoudelijke ultrasone gasmeters alvast geschikt te maken voor waterstof.

Een andere, direct toepasbare mogelijkheid is om bij de bouw of renovatie van een woning nu al ruimte voor de grotere balgenmeter te reserveren (zolang er geen compacte ultrasone meters op de markt zijn).

Tenslotte: een interessant onderwerp voor overweging heeft betrekking op de energie-eenheid, die de waterstofgasmeter moet aangeven. Er bestaat bij waterstof een vast verband tussen de eenheden kWh en m³. Uit oogpunt van marketing zou het gebruik van de eenheid kWh wel eens de voorkeur kunnen hebben.

4.3 Effecten van en maatregelen bij introductie van waterstof in bestaande gasnetten

4.3.1 Capaciteit van het gasdistributienet

De capaciteit van het gasdistributienet, voor wat betreft de getransporteerde hoeveelheid energie, blijft bij de overgang van het huidige L-gas naar 100% waterstof vrijwel gelijk, bij dezelfde diameters en drukken.



De huidige regelgeving limiteert de toegestane gassnelheid op 30 m/s in verband met mogelijke hinder door geluid. Deze limitering speelt met name een rol bij leidingen in de buurt van een gasstation.

Bij gelijkblijvend energietransport is in een waterstofleiding de gassnelheid 3x hoger dan in een aardgas/groengasleiding. Echter de dichtheid van het gas is 10x minder. Het is daarom niet bij voorbaat duidelijk of de geluidshinder merkbaar toeneemt. Nader onderzoek op dit aspect wordt aanbevolen.

4.3.2 **Perceptie van veiligheid**

Voor een geslaagde implementatie van een nieuw product is het noodzakelijk om aandacht te besteden aan de aspecten, die invloed hebben op de acceptatie van de nieuwe technologieën en nieuwe maatregelen. Daarom beschrijven wij in dit hoofdstuk noodzakelijke stappen ten aanzien van imago- en veiligheidsperceptie.

Maatregelen voor een geslaagde implementatie van het gebruik van waterstof

- Een belangrijk middel om de bevolking over waterstof te informeren en onder de aandacht te brengen is een informatie campagne. Op deze manier kunnen vroegtijdig de andersoortige kenmerken van waterstof besproken worden en kan tevens aandacht gegeven worden aan aspecten, die anders zijn in vergelijking met de bestaande aardgasinfrastructuur. Belangrijkste onderwerpen zijn de lage ontstekingstemperatuur, de onzichtbare vlam, het uitsluiten van CO-vergiftigingen, de kosten (de prijs van een waterstoftoestel is waarschijnlijk in dezelfde orde van grootte als de prijs van een aardgastoestel), de comfortervaring (die vergelijkbaar is met die van aardgas), het feit dat waterstof een schone brandstof is en dat waterstof geurloos is. Dit laatste kan overigens met reukstoffen opgelost worden. Dit onderwerp wordt later in dit hoofdstuk nog uitgebreid besproken. Mogelijke middelen voor een informatie campagne zijn:
 - publicaties op een website
 - onder aandacht brengen tijdens presentaties
 - persberichten: doelgericht door aan te sluiten bij actuele topics
 - sociale media zoals Facebook, LinkedIn en Twitter gebruiken met kwalitatief hoogwaardige inhoud
 - reclamespotjes op TV

Met een samenhangende planning kunnen de onderdelen van de campagne elkaar versterken.

- Een andere maatregel om tot een geslaagde implementatie van het gebruik van waterstof te komen is het deelnemen aan en het uitvoeren van pilot- en demonstratieprojecten. Deze projecten kunnen - mits goed uitgevoerd - een positieve bijdrage leveren in de veiligheidsperceptie van het publiek.

Indien dit slaagt zal de geïnformeerde bevolking waterstof zien als een mogelijke oplossing om de klimaatdoelen op een veilige manier te halen en de maatschappij te transformeren tot een duurzame samenleving.

Ruikbaarheid van waterstof

Bij de distributie van aardgas wordt een wettelijk vereiste alarmerende en specifieke geur gecreëerd door bewust de geurstof THT (Tetrahydrothiofeen) aan het aardgas toe te voegen. Nederlanders zijn zich doorgaans bewust van het risico van aardgas, dat door deze specifieke geur wordt gekenmerkt. Een nieuwe specifieke en alarmerende geurstof (bijvoorbeeld zwavelvrij odorant) kan ingezet worden om waterstof te voorzien van een andere kenmerkende geur. Dit zou het mogelijk maken dat de nieuwe geur met de specifieke eigenschappen van waterstof geassocieerd kan worden. Overigens kan er ook voor worden gekozen om waterstof te odoriseren met de bekende geurstof THT, zolang waterstof niet in brandstofcellen wordt toegepast (zie paragraaf 4.1.2).



Lekzoeken

In de bestaande aardgas infrastructuur is lekzoeken een belangrijk middel om de veiligheid te waarborgen door op tijd risicovolle lekkages op te sporen en te repareren. Bij een waterstofinfrastructuur zal het lekzoeken ook een bijdrage aan de veiligheid leveren. Vooral in het begin is het te overwegen om vaker lek te zoeken dan strikt noodzakelijk is. Hierbij moet, om te voorkomen dat dit juist negatief wordt uitgelegd, duidelijk gecommuniceerd worden dat de verhoogde lekzoekfrequentie juist ten doel heeft om een hogere mate van veiligheid te creëren. Hiermee kan het gevoel van veiligheid bij de burger verhoogd worden. Als er na verloop van tijd genoeg ervaring met de nieuwe infrastructuur verzameld is, kan de frequentie van het lekzoeken weer verlaagd worden.

4.3.3 Informatievoorziening gebruikers

Het gebruik van waterstof brengt veranderingen met zich mee. Het is essentieel dat gebruikers weten hoe ze met waterstof moeten omgaan..

De belangrijkste punten van aandacht ten behoeve van de informatievoorziening zijn:

- de specifieke fysische eigenschappen van waterstof:
 - lagere ontstekingstemperatuur
 - onzichtbaarheid van de vlam
 - hogere verbrandingsnelheid
 - hogere vlamtemperatuur
 - geur van waterstofgas

- de benodigde maatregelen bij de implementatie van waterstof distributie:
 - ontstekingsrisico bij werkzaamheden aan het net
 - graafschade
 - permeatie in mantelbuizen
 - verbindingen (zowel in de hoofd- en aansluitleidingen, alsook in de gasbinneninstallatie)
 - effecten na de gasmeter

4.3.4 Aanpassen regelgeving

De veiligheid van de aardgasindustrie is geborgd middels een verscheidenheid aan normen en voorschriften. Aangezien waterstof andere eigenschappen heeft dan aardgas, is het noodzakelijk dat deze normen en voorschriften worden aangepast of vervangen. Dit betreft bijvoorbeeld de VeiligheidsInstructie AardGas (VIAG) en Nederlandse en/of Europese normen met betrekking tot gasdistributie en gasmeting. Belangrijke aandachtspunten, die in deze normen moeten worden herzien, zijn al onder het kopje “informatievoorziening gebruikers” genoemd. Daarnaast voldoet het huidige gas dat wordt gedistribueerd aan de MR-Gaskwaliteit. Als tot distributie van waterstof wordt overgegaan, zal de MR-Gaskwaliteit moeten worden vernieuwd. Distributie van waterstof is onder de huidige MR-Gaskwaliteit niet mogelijk. In een dergelijke nieuwe MR zal de toegestane variatie in samenstelling van het waterstofgas worden opgenomen.

4.3.5 Effecten en veiligheidsaspecten van waterstof bij toestellen

Effecten na de gasmeter (brandstofcellen)

Waterstof is geschikt als brandstof voor brandstofcellen. Met deze vorm van warmtekrachtkoppeling op de schaal van een huishouden kan een hoog omzettingsrendement behaald worden.

Odorisatie van gas is een belangrijke veiligheidsmaatregel als gas tot aan of tot in de woning wordt gedistribueerd. Het huidige odorant THT bevat zwavel en levert - als dit bij de waterstof distributie als odorant wordt toegepast - het merendeel van de zwavel die in het waterstofgas aanwezig is. De aanwezigheid van zwavel in concentraties



hoger dan 0,1 ppm_v beperkt de levensduur van de katalysatoren in brandstofcellen. De brandstofcellen, die geschikt zijn voor aansluiting op het aardgasnet, hebben een gasreiniger en een reformer om het aardgas om te zetten naar waterstof. Als de waterstof in het net voldoende zuiver is, zijn deze opwerkingscomponenten overbodig. Hierdoor wordt de brandstofcel goedkoper en heeft hij minder onderhoud nodig.

Er is echter ook zwavelvrije odorant beschikbaar. In het buitenland is een dergelijke omschakeling reeds op een aantal plaatsen doorgevoerd. We kunnen dus leren van die ervaringen. De prijs van het odorant vormt geen hoge kostenpost, maar de omschakeling brengt wel relevante kosten met zich mee. Naast de kosten voor technische aanpassingen, zoals de dosering en het meten van het gehalte, zal er ook een publieksvoorlichtingscampagne gehouden moeten worden.

Effecten na de gasmeter (waterstofbranders)

De introductie van waterstof bij eindgebruikers heeft, naast de hiervoor reeds genoemde afwezigheid van lokale broeikasgasemissie, een aantal gebruiksvoordelen.

Gastoestellen gebaseerd op conventionele verbranding krijgen een hoger rendement en stoten (uiteeraard) geen CO uit. Waterstof maakt bovendien nieuwe toestelcategorieën mogelijk.

Het theoretisch haalbare rendement van condenserende toestellen is gelijk aan de bovenste verbrandingswaarde gedeeld door de onderste verbrandingswaarde van het gas. Bij waterstof is de verhouding tussen deze beide waarden groter dan bij methaan. Het rendement van een waterstofgastoestel kan daarom hoger zijn. Een vergelijking tussen de verbrandingsrendementen bij methaan en waterstof is gegeven in tabel 4-2.

| Brandstof | | Methaan | Waterstof |
|---|-------------------|---------|-----------|
| Calorische Bovenwaarde | MJ/m ³ | 39,8 | 12,74 |
| Calorische Onderwaarde | MJ/m ³ | 35,9 | 10,78 |
| Theoretisch haalbaar rendement | | 111% | 118% |
| Praktisch rendement (bij methaan: HR klasse) | | 107% | 114% |

Tabel 4-2 Rendement van condenserende toestellen

Het blijkt, dat 7% rendementsverbetering haalbaar is met een waterstoftoestel. Dit levert een substantiële bijdrage aan de energiebesparing in de gebouwde omgeving. Waterstof reageert makkelijker met zuurstof dan methaan.

Het is mogelijk om bij aanwezigheid van een edelmetaalkatalysator waterstof met zuurstof te laten reageren bij omgevingstemperatuur (en dat is ook bij zeer strenge vorst het geval). Katalytische toestellen hebben daarom geen vonkontsteking nodig. Een katalytische kookplaat is vanwege deze eigenschap veilig, ook nadat de gasdruk is weggevallen. Katalytische kookplaten hoeven geen conventionele pitten te hebben. In het verleden zijn prototypes ontwikkeld voor aardgasbranders onder een glazen plaat. Dit concept had als werktitel "gas onder glas".

De afwezigheid van koolstofatomen in waterstof zorgt ervoor, dat koolmonoxide-ongevallen tot het verleden behoren. In 2016 zijn 45 vergiftigingsongevallen geregistreerd, waarbij 2 mensen zijn overleden en 140 mensen gewond zijn geraakt. [26]

De NO_x-emissie van branders is onder andere afhankelijk van de vlamtemperatuur. Hoe hoger de vlamtemperatuur, hoe meer stikstofoxides. De stoichiometrische vlamtemperatuur van waterstof/lucht is hoger dan die van methaan/lucht. Anderzijds,



is ook de stoichiometrische verbrandingsnelheid hoger. Voor de moderne, volledig voorgemengde branders kan dit worden gecompenseerd door een lagere gas/luchtverhouding. Dit is sowieso nodig om oververhitting van het branderdek te vermijden. De conclusie is, dat de NO_x-emissie een punt van onderzoek is, maar een verhoging niet vanzelfsprekend, noch onvermijdbaar is.

De huidige gastoestellen voor verwarming en warmtapwaterbereiding zijn niet geschikt voor het verbranden van waterstof. Lagere concentraties waterstof (tot circa 20%) leveren geen problemen op en voor concentraties tot circa 50% kan waarschijnlijk worden volstaan met relatief beperkte aanpassingen, zoals het vervangen van inspuisers en firmware/besturingssoftware. Als er sprake is van 100% waterstof, of percentages die daarbij in de buurt komen, is een herziening van het toestelconcept aan de orde. Branders en branderdekken zullen anders moeten worden uitgevoerd (kleinere openingen) om de risico's van vlaminslag te elimineren.

De huidige vlambeveiliging op basis van vlamionisatie werkt niet bij waterstof en zal moeten worden vervangen (bijvoorbeeld door een thermische beveiliging).

Waterstofvlammen zijn nagenoeg onzichtbaar. Dit heeft consequenties voor de gebruiksveiligheid van kooktoestellen (en gasgestookte open haarden). Ook hiervoor zijn andere toestelconcepten nodig en/of zal er moeten worden uitgeweken naar elektrische kooktoestellen.

De kosten die samenhangen met de genoemde aanpassingen zijn weliswaar beperkt ten opzichte van de transitiekosten, maar de imago-aspecten zijn vermoedelijk aanzienlijk.

Voor hetzelfde vermogen wordt er ongeveer twee keer zoveel volume aan verbrandingsgassen geproduceerd (in de vorm van waterdamp). Een deel van deze waterdamp condenseert in het toestel (en draagt bij aan een hoger rendement), maar afvoersystemen en of de toestelventilatoren zullen moeten worden uitgelegd voor de hogere volumestroom. Kritische constructies zijn in dit verband de gecombineerde verbrandingsgas-afvoersystemen in de gestapelde bouw (CLV-systemen).

Indien waterstof alleen wordt gebruikt voor lagetemperatuur warmte en warm tapwater kan overwogen worden om toestellen buiten de woning in een aanbouw of stookruimte te plaatsen. Daarmee wordt voorkomen, dat er leidingen in de woning nodig zijn. Overigens is dit wellicht ook het overwegen waard bij het gebruik van aardgas (in de huidige situatie) en bij het gebruik van biomethaan. De daaraan gekoppelde kosten zijn, bij afschrijving over 40 jaar, maar zeer beperkt (circa 50 €/jaar).



De huidige gastoestellen voor verwarming en warmtapwaterbereiding zijn niet geschikt voor het verbranden van 100% waterstof. Waterstofvlammen zijn nagenoeg onzichtbaar. Dit heeft consequenties voor de gebruiksveiligheid van kooktoestellen (en gasgestookte open haarden). Ook hiervoor zijn andere toestelconcepten nodig en/of moet er worden uitgeweken naar elektrische kooktoestellen.

De afwezigheid van koolstofatomen in waterstof zorgt ervoor dat koolmonoxide-ongevallen tot het verleden behoren.

Effecten op de verbindingen in gasbinneninstallaties

Bij de binneninstallaties voor gas zijn de verbindingen altijd een punt van aandacht. Op dit moment zijn knelfittingen waarschijnlijk de meest toegepaste verbindingen, maar er zijn ook veel gesoldeerde verbindingen en schroefdraadverbindingen. Alle verbindingen kunnen in potentie lekkage geven. In de praktijk met aardgas is het risico daarvan acceptabel en geaccepteerd. Zoals hiervoor reeds aangestipt, zullen dezelfde spleten en gaatjes bij waterstof een 25% hogere volumestroom aan gas lekken, bij dezelfde gasdruk, dan bij aardgas.

De vraag hierbij is, of dezelfde lekken met waterstof, ondanks de geringere energie-inhoud en de hogere stijgkracht (buoyancy), toch niet tot meer ontploffingen leiden vanwege de lagere ontsteekenergie en de bredere explosiegrenzen (dit is in wezen eenzelfde soort vraagstuk als bij graafschades, maar in een andere omgevings-situatie).

In het onderzoek H21 ("Leeds") wordt het HyHouse project vermeld, waarin al enig onderzoek is verricht met betrekking tot het risico van waterstoflekkage in de gasbinneninstallatie [25]. Dit betrof een praktijkonderzoek in een oude boerderij.

De conclusie was, dat er geen ontsteekbare gas/luchtmengsels worden geproduceerd, die gevaarlijker zijn dan bij een vergelijkbaar methaanlek.

Naar de mening van Kiwa Technology is deze conclusie niet geheel terecht, daar er klaarblijkelijk in het HyHouse onderzoek geen sprake was van een gewone leefomgeving, met bijbehorende ontsteekbronnen. In de praktijk is een incident altijd een samenloop van ongunstige omstandigheden. Het is dan ook niet de vraag of een gasmengsel van een verbindingslek bijna nooit ontsteekt, maar of die 'bijna nooit' situatie bij waterstof onacceptabel veel vaker optreedt dan in de huidige praktijk met methaan. Deze vraag is helaas niet met laboratoriumexperimenten te beantwoorden. De aanbeveling is dan ook, om - bij de introductie van waterstof op grotere schaal - dit aspect van de gasbinneninstallatie nauwgezet te monitoren. Als er sprake zou zijn van een merkbare toename van het aantal incidenten met een lekkende binneninstallatie, dan kunnen in de loop van de transitie aanvullende maatregelen worden getroffen. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het proactief vervangen van specifieke soorten binnenleidingen en verbindingen.



5 Biomethaan

5.1 Samenstelling van biomethaan

Biomethaan kan uit zeer uiteenlopende organische bronnen en via specifieke biomassa-conversieprocessen worden gewonnen. Zo kan het worden verkregen uit het vergisten van biomassa of door het methaniseren van syngas. Als gevolg hiervan kan biomethaan andere componenten bevatten dan traditioneel gedistribueerd aardgas [27]. Door Liander is een lijst aangeleverd met de mogelijke samenstelling van opgewerkt syngas en geschoond biogas [28]. Binnen dit onderzoek is deze lijst aangehouden voor de beoordeling van de effecten van de componenten, die aanwezig kunnen zijn in biomethaan, op de materialen in het distributienet. In tabel 5-4 worden de bevindingen samenvattend gepresenteerd.

Gassamenstelling

De herkomst van biomethaan verschilt van die van fossiel aardgas, waardoor de samenstelling van biomethaan afwijkend zal zijn. Daarnaast is er sprake van verschillen in biomethaan samenstelling als gevolg van verschillen in productiewijze. In biomethaan dat is geproduceerd door het methaniseren van syngas, kunnen de volgende componenten aanwezig zijn: water, waterstof, waterstof sulfide, stikstof, mercaptanen, ammoniak, waterstof chloride, waterstof cyanide, koolmonoxide, koolstof dioxide, benzeen, toluen en andere koolwaterstoffen [28]. Biomethaan geproduceerd uit gereinigd biogas kan aanvullend zwavel, chloorhoudende componenten, fluorhoudende componenten, zuurstof, fosfinen en siliciumhoudende componenten bevatten [28]. De volledige lijst met componenten is opgenomen in bijlage IV.

Door de aanwezigheid van deze componenten verandert de gassamenstelling. De vraag is of de samenstelling van biomethaan invloed heeft op de integriteit van de gasinfrastructuur, alsook op de veiligheid van de eindgebruikers en van de monteurs, die onderhoudswerkzaamheden uitvoeren aan het net.

Veiligheid eindgebruikers en monteurs

Bij een gaslekage of bij het onverbrand vrijkomen van biomethaan in een woning, mengt het gas met de omgevingslucht. Hierbij worden zuurstof en biomethaan gemengd, waardoor een explosief gasmengsel kan ontstaan.

De laagste grenswaarde voor het ontstaan van een explosief gasmengsel¹ (LEL, Lower Explosion Limit) voor aardgas (G-gas) is 5,9 vol% gas in lucht [29]. Vanaf deze concentratie ontstaat een explosief gasmengsel. Volgens de VIAG en de ARBO wet mag er niet gewerkt worden bij een gasconcentratie van 10% LEL of hoger (0,59 vol% G-gas) [30].

Biomethaan bevat mogelijk een aantal giftige componenten. Er mag niet worden gewerkt in een omgeving, waarin de concentratie van deze componenten boven de maximaal toegestane waarde ligt [31]. Indien de 10% LEL, die in de VIAG wordt voorgeschreven, als maximum wordt aangehouden, kan de maximaal toegestane concentratie van deze gascomponenten in biomethaan worden berekend. Deze berekening is toegelicht in bijlage VII. Om het geheel praktisch hanteerbaar te houden zijn de uitkomsten van deze berekening afgerond en weergegeven in tabel 5-1.

¹ De onderste explosiegrens voor biomethaan ligt niet nauwkeurig vast. Hiervoor is in dit onderzoek 5% aangenomen.



| Component | | Maximaal toelaatbare concentratie [ppm] |
|--------------------|----------|---|
| Ammoniak | NH_3 | 1.800 |
| Benzeen | C_6H_6 | 20 |
| Fosfine | PH_3 | 10 |
| Koolstof dioxide | CO_2 | 500.000 |
| Koolstof monoxide | CO | 2.300 |
| Tolueen | C_7H_8 | 3.600 |
| Waterstof chloride | HCl | 500 |
| Waterstof cyanide | HCN | 90 |
| Waterstof sulfide | H_2S | 160 |

Tabel 5-1. Maximaal toelaatbare concentratie van componenten in biomethaan op basis van Tijdgewogen Gemiddelde Grenswaarden [32].

5.2 Invloed van biomethaan op de materialen in het gasnet

De resistentie van een materiaal tegen biomethaan is afhankelijk van het type materiaal, de in het biomethaan aanwezige gascomponent(en) en de omstandigheden. Daardoor is de gevoeligheid van het gasdistributienet voor biomethaan per situatie verschillend. Desondanks is de invloed van sommige stoffen te generaliseren. Dit betreft de componenten stikstof, THT (mercaptanen), zuurstof, elementair zwavel en siliciumhoudende componenten. Dit wordt hieronder verder toegelicht.

De bestandheid van de momenteel toegepaste gasdistributiematerialen tegen biomethaan is in de daarop volgende paragrafen en in bijlage V per type materiaal toegelicht.

5.2.1 Invloed van specifieke componenten in het biomethaan

Stikstof

Stikstof is een inert gas, dat onder normale omstandigheden niet reageert met materialen uit het gasdistributienet. Daarom wordt het in onderzoeken vaak als referentiegas gebruikt [16] [33]. Stikstof heeft geen waarneembare bijdrage in de veroudering en/of degradatie van het gasnet en wordt daarom niet meegenomen in de beschouwing.

THT

THT is een mercaptaan, die al sinds jaren als odorant aan aardgas wordt toegevoegd. Het gehalte aan mercaptanen wordt in biomethaan nauwelijks verhoogd in vergelijking tot de huidige situatie met aardgasdistributie [28]. Daarom wordt er geen invloed van mercaptanen op de materiaalkwaliteit verwacht.

Zuurstof

Zuurstof is een oxiderende stof. Kunststoffen en sommige metalen, zoals staal, zijn over het algemeen gevoelig voor oxidatie. Dit resulteert in achteruitgang van materiaaleigenschappen. Zuurstof komt veel in de atmosfeer voor. Daarom worden kunststofmaterialen ontworpen en ontwikkeld op resistentie tegen deze oxiderende stof, bijvoorbeeld door toevoeging van antioxidanten. Gezien de lage concentratie zuurstof die in biomethaan aanwezig is, wordt geen invloed van zuurstof verwacht. Stalen gasleidingen worden doorgaans door het aanbrengen van een coating (verf) aan de buitenkant beschermd tegen corrosie. Ook wordt kathodische bescherming, in combinatie met een PE-bekleding, toegepast om corrosie van de buitenkant te voorkomen. De binnenkant van leidingen wordt doorgaans niet beschermd. Als gevolg van het lage zuurstofgehalte in het biomethaan is de mate van inwendige corrosie, die hierdoor wordt veroorzaakt, te verwaarlozen [28].



Zwavel

In aanwezigheid van waterstof sulfide en zuurstof kan elementair zwavel worden gevormd. Elementair zwavel kan in zowel een droge als vochtige omgeving worden gevormd. Het is een vaste stof en kan daardoor voor verstoppingen van bijvoorbeeld drukregelaars zorgen [31]. Elementair zwavel is een oxiderende stof. In de chemische reactie is het niet in staat om elektronegatieve atomen te doneren (zoals bij veel oxiderende stoffen het geval is), maar het kan wel elektronen opnemen [34]. Hierdoor is elementair zwavel onder normale omstandigheden niet in staat om kunststoffen te degraderen [35]. Zwavel is echter wel in staat om metalen te corroderen.

Silicium

Silicium is nauwelijks reactief en zal weinig invloed hebben op de degradatie van metalen en kunststoffen. Hierdoor hebben siliciumhoudende componenten geen invloed op de integriteit van het gasdistributienet. Siliciumhoudende componenten worden tijdens de verbranding omgezet naar siliciumdioxide (SiO_2). Siliciumdioxide is een vaste stof, die zich kan afzetten op onderdelen van eindgebruikersapparatuur. Omdat in het gasdistributienet geen verbranding van biomethaan plaatsvindt, wordt in het net geen SiO_2 gevormd [36].

5.2.2 Bestandheid van de momenteel toegepaste gasdistributiematerialen tegen biomethaan

Voor de beschrijving van de bestandheid van de huidige gasdistributiematerialen tegen biomethaan wordt - evenals bij waterstof - onderscheid gemaakt in kunststoffen en metalen. Ook voor biomethaan geldt, dat beide materiaalgroepen significant andere degradatie-mechanismen kennen.

In deze paragraaf worden de resultaten op hoofdlijnen besproken. Voor een meer gedetailleerde onderbouwing wordt verwezen naar bijlage V.

Met name PE en PVC hebben een goede resistentie tegen de gascomponenten die aanwezig kunnen zijn in biomethaan. Er is geen noemenswaardige invloed van biomethaan op de verbindingen.

NBR en POM hebben weliswaar een goede resistentie tegen de meeste gascomponenten, maar ze zijn mogelijk gevoelig voor de zure gascomponenten. Daarom is het ook in dit verband aan te bevelen om de gaskwaliteit, die door de invoeder wordt geleverd, vast te leggen. Hierdoor wordt het mogelijk om tijdens de eerder genoemde gaskwaliteitscontroles vast te stellen of er off-spec verontreinigingen aanwezig zijn. Bijvoorbeeld omdat deze - zoals hierboven aangegeven - wellicht de rubberafdichtingen van de PVC-verbindingen of POM zouden kunnen aantasten.

De resistentie van de verschillende kunststoffen wordt in tabel 5-2 weergegeven. Opgemerkt moet worden, dat in de gevonden bronnen vaak concrete experimenten worden beschreven. Enkel voor de bij deze experimenten behorende omstandigheden kan een uitspraak worden gedaan. In de tabel zijn de omstandigheden, waar relevant, in de betreffende cel weergegeven.



| | | PE | PVC | NBR | POM |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Ammoniak | NH ₃ | tot 100 ppm | tot 100 ppm | tot 100 ppm | tot 100 ppm |
| Benzeen | C ₆ H ₆ | Niet vloeibaar | Niet vloeibaar | Niet vloeibaar | |
| Chloorhoudende componenten | | tot 1.000 mg/m ³ DCM | tot 1.000 mg/m ³ DCM | tot 1.000 mg/m ³ DCM | tot 1.000 mg/m ³ DCM |
| Fluorhoudende componenten | | | | | |
| Fosfine | PH ₃ | | | | |
| Koolstof dioxide | CO ₂ | | tot 59 mol% | tot 59 mol% | tot 59 mol% |
| Koolstofmonoxide | CO | | | | |
| Koolwaterstoffen | | Niet vloeibaar | Niet vloeibaar | Niet vloeibaar | |
| Mercaptanen | | | | | |
| Silicium houdende componenten | | | | | |
| Stikstof | N ₂ | | | | |
| Tolueen | C ₇ H ₈ | Niet vloeibaar | Niet vloeibaar | Niet vloeibaar | |
| Water | H ₂ O | | | | |
| Zoutzuur (Waterstof chloride) | HCl | | | | >3 ppm @82% R.V. ¹ |
| Waterstof cyanide | HCN | | | | |
| Waterstof | H ₂ | | tot 20 mol% | tot 20 mol% | tot 62 mol% |
| Waterstof sulfide | H ₂ S | tot 160 ppm | tot 160 ppm | tot 160 ppm | tot 160 ppm |
| Zuurstof | O ₂ | | | | |
| Zwavel | S ₈ / S _n | | | | |

| |
|----------------------------|
| Geen / acceptabele invloed |
| Vermoedelijk geen invloed |
| Onbekend |
| Mogelijk schadelijk |
| Schadelijk |

Tabel 5-2. De resistentie van PE, PVC, NBR en POM tegen componenten, die mogelijk aanwezig zijn in biomethaan.

Voor de metalen (staal, koper en aluminium) is de resistentie tegen de gascomponenten, die in biomethaan kunnen voorkomen, niet eenduidig. De aanwezigheid van water verhoogt de corrosiesnelheid van een aantal gasmengsels. Daarom wordt sterk aanbevolen om de aanwezigheid van water in het gasdistributienet te beperken.

Indien vanwege de giftigheid van waterstof sulfide de concentratie beperkt blijft tot maximaal 160 ppm, zullen de corrosiesnelheden van staal en koper daardoor beperkt blijven. Door ervoor te zorgen dat ook de zuurstofconcentratie laag is (<3 vol%) wordt de corrosiesnelheid tot acceptabele waarden teruggedrongen (levensduur leiding > 50 jaar). Koolstof dioxide beïnvloedt voor staal in combinatie met zuurstof en waterstof sulfide de corrosiesnelheid. De exacte grens van waterstof sulfide is niet bekend. Wel is bekend, dat tot een gehalte van 34 ppm H₂S de corrosiesnelheid van koper en staal relatief laag is (< 0,07 mm/jaar).

De invloed van koolstofmonoxide is niet bekend. Mogelijk vindt aantasting van staal en koper plaats in aanwezigheid van koolstofmonoxide en zuurstof. Ook voor

¹ R.V. = relatieve vochtigheid



koolstofmonoxide geldt, dat deze stof giftig is. Ook hierbij is het wenselijk om uit veiligheidsoogpunt de CO-concentratie te beperken.

Bij gietaluminium wordt geen corrosie waargenomen bij gasmengsels van 10 - 50 mol% CO₂ tot 3 mol% O₂ en tot 160 ppm H₂S (bij 30 mbar). Alleen bij afwezigheid van koolstof dioxide treedt in aanwezigheid van water corrosie op bij 3 mol% O₂ en 160 ppm H₂S, alsmede bij 0,5 mol% O₂ en 34 ppm H₂S met corrosiesnelheden van respectievelijk 0,31 en 0,19 mm/jaar. De resultaten zijn samengebracht in tabel 5-3.

| | | Staal | Koper | Aluminium |
|-------------------------------|-------------------------------|------------|-------------|--------------------------|
| Ammoniak | NH ₃ | | tot 50 ppm | Geen koper in legering |
| Benzeen | C ₆ H ₆ | | | |
| Chloorhoudende componenten | | Geen ionen | Geen ionen | Geen ionen |
| Fluorhoudende componenten | | Geen ionen | Geen ionen | Geen ionen |
| Fosfine | PH ₃ | | | |
| Koolstof dioxide | CO ₂ | * | Tot 50 mol% | Tot 50 mol% |
| Koolstofmonoxide | CO | * | * | |
| Koolwaterstoffen | | | | |
| Mercaptanen | | | | |
| Silicium houdende componenten | | | | |
| Stikstof | N ₂ | | | |
| Tolueen | C ₇ H ₈ | | | |
| Water | H ₂ O | * | * | * |
| Waterstof chloride | HCl | | | |
| Waterstof cyanide | HCN | | | Mits pH>4 |
| Waterstof | H ₂ | | Tot 20 mol% | Tot 20 mol% |
| Waterstof sulfide | H ₂ S | * | * | * Zonder CO ₂ |
| Zuurstof | O ₂ | * | * | * Zonder CO ₂ |
| Zwavel | S ₈ | | | |

| |
|-------------------------------------|
| Geen / acceptabele invloed |
| Vermoedelijk geen invloed |
| Onbekend |
| Mogelijk schadelijk |
| Schadelijk onder bepaalde condities |

*Zie bijlage V voor verdere specificaties.

Tabel 5-3. De resistentie van staal, koper en aluminium tegen componenten, die mogelijk aanwezig zijn in biomethaan.

5.2.3 Micro-organismen

Er zijn verschillende micro-organismen aangetroffen in biomethaan. Dit zijn bijproducten afkomstig uit bijvoorbeeld vergisters [31]. Van een aantal micro-organismen is bekend, dat ze de corrosie van metaal beïnvloeden door aantasting van de beschermende oxidehuid of doordat ze schadelijke componenten produceren [37]. Daarnaast kunnen micro-organismen ook kunststoffen aantasten. In het algemeen kunnen micro-organismen zich niet ontwikkelen in een relatief droog milieu [38]. De gasdistributienetten bezitten onder normale omstandigheden een lage waterdampspanning, waardoor zij als droog gekenmerkt kunnen worden. Dat de micro-organismen niet groeien in een droge omgeving wil nog niet zeggen, dat deze zullen afsterven. Eventueel aanwezige sporen van micro-organismen kunnen dan ook



door het gasnet getransporteerd worden. Om de groei van micro-organismen in het distributienet tegen te gaan moet het watergehalte van het gas bij voorkeur zo laag mogelijk gehouden worden.

5.2.4 Maximum concentraties

De maximum toelaatbare concentratie van de schadelijk stoffen die in biomethaan kunnen voorkomen, wordt bepaald door de combinatie van de grenzen volgens tabel 5-1, tabel 5-2, tabel 5-3 en de waarden, die in de in bijlage V vermelde studies worden genoemd. Het resultaat is weergegeven in tabel 5-4.

Deze grenswaarden gelden voor de gasdistributie. Bepaalde specifieke gastoepassingen (bijvoorbeeld voor mobiliteit) kunnen verdere aanscherping nodig maken.

| Gascomponent | | Maximum concentratie | Eenheid | Opmerking |
|---|----------|----------------------|-------------------|--|
| Ammoniak | NH_3 | 50 | ppm | |
| Benzeen | C_6H_6 | 20 | ppm | |
| Chloor /Fluor houdende componenten | | 1.000 | mg/m ³ | |
| Fosfine | PH_3 | 10 | ppm | |
| Koolstof dioxide | CO_2 | 500.000 (50) | ppm (%) | Niet in combinatie met O ₂ en H ₂ O |
| Koolstof monoxide | CO | 2.300 | ppm | |
| Tolueen | C_7H_8 | 3.600 | ppm | |
| Water | H_2O | | | Niet in vloeibare vorm ¹ |
| Waterstof chloride | HCl | 3 | ppm | |
| Waterstof cyanide | HCN | 90 | ppm | |
| Waterstof sulfide | H_2S | 160 | ppm | |
| Zuurstof | O_2 | 30.000 (3) | ppm (%) | Niet in combinatie met CO ₂ en H ₂ O |

Tabel 5-4 Maximaal toelaatbare concentratie van een aantal gascomponenten in biomethaan.

¹ In combinatie met water zijn veel metalen toch corrosiegevoelig. Verlaging van het watergehalte tot een dauwpunt van -3 °C, zoals in bijlage IV wordt genoemd, is acceptabel. Een dauwpunt tot de huidige waarde van -10 °C geeft vanuit materiaal oogpunt echter extra zekerheid.



De samenstelling van biomethaan verschilt van de samenstelling van fossiel aardgas. De lijst met componenten die voor kunnen komen in biomethaan is lang. Sommige componenten zijn (bij een bepaalde concentratie) giftig of hebben invloed op de levensduur van onderdelen van het gasdistributienetwerk. Daarom kan een netbeheerder niet zomaar elke samenstelling van biomethaan toelaten in de bestaande infrastructuur. Tabel 5-4 geeft een indicatie van de toegestane gasconcentraties.

Mits de samenstelling van het biomethaan deze indicatieve waarden respecteert, is het gasnet geschikt om biomethaan te transporteren

Als aan de bovenvermelde voorwaarden is voldaan, kunnen de momenteel toegepaste aanleg- en ontwerptechnieken tevens ingezet worden voor het aanleggen van nieuwe gasleidingen.

5.3 Veiligheidsaspecten bij de distributie en het gebruik van biomethaan

5.3.1 *Effectiviteit van de odorisatie*

De ervaring heeft geleerd, dat er in biogas en groengas verontreinigingen kunnen voorkomen, waarvan de geur de alarmerende - en wettelijk vereiste - herkenbare 'gas'-geur kan maskeren. Ook in de toekomst zal het, zoals dit momenteel ook voor groengas het geval is, de verantwoordelijkheid van de invoeders van biomethaan zijn om er voor te zorgen dat deze stoffen niet in het biomethaan zullen vóórkomen. Het zal ook in de toekomst de taak van de netbeheerder zijn om er op toe te zien, dat dit inderdaad het geval is en zo nodig in te grijpen.

5.3.2 *Maatregelen voor de bepaling van de gaskwaliteit*

Zoals hierboven reeds aangegeven, is het de verantwoordelijkheid van de invoeder om er voor te zorgen dat het ingevoede biomethaan voldoet aan de kwaliteitseisen, die eraan worden gesteld. Op dit moment zijn de eisen aan de gassamenstelling van aardgas en groengas vastgelegd in de MR-Gaskwaliteit. Om een toets aan de kwaliteitseisen voor biomethaan mogelijk te maken zal er een nieuwe biomethaan-samenstelling moeten worden afgesproken. Het ligt voor de hand dat de afspraken over de nieuwe biomethaan-samenstelling - vergelijkbaar met de huidige situatie - in een Ministeriële Regeling worden vastgelegd, maar dit kan evenzo een afspraak tussen de invoeder en de netbeheerder zijn. De gassamenstelling zoals vermeld in bijlage IV kan hierbij als voorzet dienen.

Ook bij het distribueren van biomethaan zullen de netbeheerders erop toe moeten zien dat de juiste gaskwaliteit wordt ingevoerd. Hiertoe zal een extra bewaking van de gaskwaliteit door de netbeheerders uitgevoerd moeten worden. Deze extra bewaking brengt kosten met zich mee in de vorm van meer en vaker analyseren van gasmonsters of in de vorm van gecertificeerde gegevensuitwisseling met de procesbewakingsapparatuur van de invoeders.

5.3.3 *Aanpassingen aan toestellen*

Voor de distributie van biomethaan zijn twee essentieel verschillende strategieën denkbaar.

Eén strategie zou kunnen inhouden, dat er uitsluitend biomethaan wordt toegelaten binnen de momenteel aangehouden beperkte band van de Wobbe-index en aangevuld met eventuele additionele beperkingen in verband met de aanwezigheid van andersoortige stoffen, die de verbrandingseigenschappen beïnvloeden (bijv. CO₂ en H₂). In dat geval zijn er geen aanpassingen aan de toestellen nodig.

De andere strategie behelst het verruimen van de Wobbe-band en/of het opleggen van minder beperkingen aan het CO₂- en het H₂-gehalte. Het voordeel hiervan is een vermindering van de kosten van de gasreiniging/conditionering bij de producent van



biomethaan. Het nadeel is dan de noodzaak tot het in meer of mindere mate vervangen van het toestellenpark. Verruiming van de Wobbe-band is in technisch opzicht mogelijk zonder dat er wezenlijk andere toestelconcepten geïntroduceerd hoeven te worden. Afhankelijk van de toegelaten variatie in gaskwaliteit, moet mogelijk een concessie worden gedaan aan de moduleerbaarheid van de toestellen. Dit heeft weer gevolgen voor het jaarrendement van de stookinstallatie.

5.3.4 Maatregelen met betrekking tot zwavel

In biomethaan kunnen, naast het toegevoegde THT als odorant, nog andere zwavelverbindingen aanwezig zijn. Hierbij moet vooral worden gedacht aan H₂S. Minder bekend is dat er ook elementair zwavel (in dampvorm: bij omgevings-temperatuur circa 0,1 ppm_v tot 1 ppm_v) in het gas aanwezig kan zijn. Deze damp kan neerslaan als vaste zwavel (S₈) en bijvoorbeeld in kleppen van gasdrukregelaars storingen veroorzaken. In de aanwezigheid van O₂ kan H₂S uiteenvallen in zwavel en water (H₂S + O₂ -> H₂O + 2S). In feite fungeert H₂S als een soort reservoir voor de productie van zwaveldamp in het gas [39]. De consequentie hiervan is, dat er meer storingen kunnen optreden in gasdrukregelen en beveiligingsinstallaties en er derhalve meer onderhoud nodig is.

5.4 Verrekening van biomethaan (energie)

Afhankelijk van de breedte van de afgesproken kwaliteitsbanden en de geaccepteerde meetonzekerheid, zijn er eventueel aanvullende maatregelen nodig voor een valide verrekening van verschillen in gaskwaliteit. Het kan hierbij gaan om regionale verschillen en verschillen in de tijd.

Als het uitsluitend een regionale afwijking betreft (bijvoorbeeld één net dat door één biomethaanproducent wordt gevoed) dan zijn er, aannemende dat de bewaking van de gaskwaliteit sowieso al plaatsvindt, slechts beperkte extra kosten in de vorm van een administratieve verantwoording.

Als er sprake is van meerdere invoeders, met wisselende debieten en kwaliteiten, dan moet er, afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid op het niveau van districtstations of op het niveau van de afzonderlijke afleverpunten worden gemeten. Met de huidige stand van de techniek (gaschromatograaf [GC]) bedragen de kosten hiervan ca 10.000 €/jaar per meetpunt. Het is niet realistisch om bij alle kleinverbruikers de gaskwaliteit te meten met de huidige GC-technieken, vanwege de logistieke en financiële consequenties van onderhoud en kalibratie. Hiervoor moeten óf innovatieve, goedkope meetmethoden worden ontwikkeld, óf er moet genoeg worden genomen met een benaderende administratieve verrekening.

Indien de kwaliteitsmeting op het niveau van het districtstation wordt uitgevoerd, dan bedragen de kosten tenminste ongeveer 10 €/jr per aansluiting.



6 Kosten

6.1 Aanpak

De transitie naar een duurzame energievoorziening gaat met hogere kosten gepaard. In dit hoofdstuk ligt de focus op de kosten, die in beginsel gemaakt gaan worden door de beheerders van gasnetten, voor zover de netten geschikt gemaakt moeten (en kunnen) worden voor waterstof en biomethaan. Om deze kosten in het juiste perspectief te plaatsen zal tevens worden ingegaan op kosten voor het gebruik en de productie van waterstof en biomethaan, die voor rekening zullen komen voor andere stakeholders. Overigens mag worden verwacht, dat de kosten die de netbeheerders zullen moeten maken in hun tarieven verwerkt zullen worden, zodat alles uiteindelijk door de eindgebruikers zal worden betaald.

De in dit hoofdstuk vermelde kosten zijn ordegrrootte schattingen op basis van de huidige stand van de techniek. De kosten zijn uitgesplitst naar éénmalige kosten en jaarlijks terugkerende extra kosten (extra ten opzichte van het handhaven van de huidige gasvoorziening met aardgas van Slochteren kwaliteit in een bepaald verzorgingsgebied). De kosten zijn verder opgedeeld in een eventueel basisbedrag (schaalgrootte onafhankelijk) en een bedrag per aansluiting in een verzorgingsgebied. Daar waar qua schaalgrootte sterke niet-lineaire effecten worden verwacht, is dat expliciet vermeld.

De kostenposten zijn generiek toebedeeld aan de volgende aandachtgebieden:

1. Veiligheid van transport en distributie
2. Leveringszekerheid en levensduur
3. Invoeding
4. Veiligheid van aflevering en eindgebruik
5. Aanpassingen installaties bij de eindverbruiker

Niet alle denkbare maatregelen zijn in de tabellen weergegeven. Er is een selectie gemaakt op basis van noodzaak en geschatte haalbaarheid.

Per kostenpost is tevens beoordeeld in hoeverre de post afhankelijk is van de penetratiegraad van het gasnet in de diverse scenario's en voorzieningsgebieden. Immers voor een gasnet tot aan of tot in de woning zijn bepaalde maatregelen nodig, die bij een gasnet tot aan de rand van een woonwijk (met stadverwarming) overbodig zijn.

Niet alle genoemde maatregelen zullen altijd worden toegepast. Sommige maatregelen hebben een goedkoper alternatief. In voorkomende gevallen sluiten bepaalde combinaties van maatregelen andere maatregelen uit of maken ze andere maatregelen overbodig. Dit wordt in de toelichtende tekst nader aangeduid.

De met het (geheel of gedeeltelijk) in stand houden en aanpassen van het gasnet verbonden méérkosten zijn per scenario, op basis van de in het CE-rapport 'Net voor de Toekomst' [7] (en het bijbehorende achtergrondrapport [8]) genoemde kentallen (verbruik per sector en verbruik per woningequivalent (WEQ)) doorgerekend.

In het rapport "Net voor de Toekomst" zijn voor de verschillende energiedragers de kosten ingeschat. Uit een toelichting door CE Delft blijkt, dat het inzetten van biomethaan - indien dit voorhanden is - de goedkoopste oplossing is. Na biomethaan lijkt waterstof de beste optie te zijn. Deze blijkt goedkoper dan "all electric". Laatstgenoemde optie lijkt weer vergelijkbare kosten te hebben ten opzichte van geothermie. De inzet van restwarmte, die qua kosten weer vergelijkbaar is met geothermie, zal vooral plaatsvinden in de gebieden waar deze restwarmte gedurende langere tijd aanwezig zal zijn.



6.2 Kosten van maatregelen voor het transport van waterstof

De onderstaande tabel geeft het overzicht van de belangrijkste maatregelen en de extra kosten ten opzichte van aardgasdistributie voor het kunnen gebruiken van de bestaande gasinfrastructuur voor de levering van waterstof aan eindgebruikers.

| Maatregel | Enmalig, basis | Enmalig per WEQ | Terugkerend basis | Terugkerend per WEQ |
|---|----------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| | k€ | €/WEQ | k€/jr | €/jr WEQ) |
| 1 Veiligheid transport en distributie | | | | |
| 1.1 Voorlichting en opleiding monteurs | ++ | + | 0 | 0 |
| 1.2 Aanpassen van werkprocedures voor aanleg en onderhoud | 0 | 0 | 0 | 10 |
| 1.3 Aanpassen van normen en voorschriften | ++ | 0 | 0 | 0 |
| 1.4 Toezicht houden bij graafwerkzaamheden | 0 | 0 | 0 | + |
| 1.5 Dynamisch/automatisch sectioneren van het gasnet | ++ | + | 0 | + |
| 2 Leveringszekerheid en instandhouding | | | | |
| 2.1 Aanpassingen gereedschap en meetinstrumenten | 0 | + | 0 | 0 |
| 3 Invoeding | | | | |
| 3.1 Extra controle op verontreiniging (S, CO, N ₂ , O ₂ , etc.) | 0 | 0 | 0 | +(++) |
| 4 Veiligheid van aflevering en eindgebruik | | | | |
| 4.1 Reclame-/voorlichtingscampagne | ++ | + | 0 | 0 |
| 4.2 Aanpassen van odorisatie | ++ | + | 0 | 0 |
| 4.3 Extra controle op odorisatie | 0 | 0 | + | + |
| 4.4 Aanpassen normen voor gasbinneninstallatie (lektheid) | ++ | 0 | 0 | 0 |
| 4.5 Aanpassen werkprocedures voor aanleg en onderhoud gasbinneninstallatie | 0 | 0 | 0 | + |
| 4.6 Geen open vlam kooktoestellen | 0 | ++ | 0 | 0 |
| 5 Aanpassingen installaties eindverbruikers | | | | |
| 5.1 Andere gasmeters (grotere balg) | 0 | + | 0 | 0 |
| 5.2 Andere gasmeters (ultrasoon) | 0 | + | 0 | 0 |
| 5.3 Extra controle gasbinneninstallatie (eenmalig/jaarijks) | 0 | 0 | 0 | ++ |
| 5.4 Andere toestellen (vervanging/ombouw van CV-toestel) | 0 | ++ | 0 | 0 |

Tabel 6-1. Extra kosten van de relevante maatregelen bij gebruik van de bestaande gasinfrastructuur voor het transport van waterstof.

++: grotere extra kostenpost,

+: beperkte extra kostenpost,

0: geen maatregel en/of geen extra kosten



Toelichting

- 1.1 De oorspronkelijk voor aardgas opgeleide monteurs (eigen personeel netbeheerders en aannemers) zullen moeten worden omgeschoold voor werkzaamheden met waterstof. Daarvoor moet eenmalig cursusmateriaal worden ontwikkeld en zullen eenmalig de monteurs in de regio moeten worden bijgeschoold. De ontwikkelkosten van de cursus en het cursusmateriaal voor Nederland (diverse opleidingsniveau's) zijn geschat op 200 k€. Per werknemer zijn twee cursusedagen à 0,5 k€/dag (alle kosten) aangehouden. Een persoon kan 1.000 WEQ bedienen met deze kennis.
- 1.2 Bij werkzaamheden aan een waterstofdistributienet zijn aanvullende maatregelen en procedures nodig om veilig werken mogelijk te maken. Deze maatregelen maken het jaarlijkse onderhoud (reparaties, vervangingen en aanpassingen van een bestaand net) 10% duurder (t.o.v. de huidige 100€/(WEQ jr)).
- 1.3 Normen en standaarden voor waterstofdistributienetten zijn nog niet beschikbaar. Een eenmalige uitbreiding/herziening van bestaande normen (bijv. NEN7244 / NEN2650 / NEN1059) is nodig.
- 1.4 Graafschades leveren, bij ongewijzigd beleid, mogelijk een verhoogd risico. Verzwaard toezicht bij graafwerkzaamheden wordt, op zijn minst aanvankelijk, noodzakelijk geacht. Er zijn circa 0,5 miljoen KLIC-meldingen per jaar. Een onbekend maar waarschijnlijk groot deel betreft gebieden met gasdistributieleidingen. Per melding 1 persoon/dag à 400 € leidt tot een totale kostenpost van 200 M€/jr., indien een 100% controle nodig zou zijn.
- 1.5 Graafschades leveren, bij ongewijzigd beleid, mogelijk een verhoogd risico. Eenmalige investering in sectionering van het net kan het effect van graafschades reduceren. Dit is een alternatief voor 1.4. Sectionering kost € 2.000 per automatisch op afstand bedienbare afsluiter en € 1.000 per Excess Flow Valve (EFV). Sectielengte ca. 1 km. Er is 0,02 km leiding per WEQ. De verhouding EFV/afsluiter is 4. Er is een eenmalige investering nodig (per regio) voor het integreren in de bedrijfsvoering. Jaarlijkse controle op gangbaarheid van de afsluiters (100 €/afsluiter/jr.)
- 2.1 Extra aanschaf van bijvoorbeeld waterstofalarm als persoonlijk beschermingsmiddel. Extra apparatuur voor spoelen van leidingen met inert gas. Aanpassen lekzoekapparatuur. Na de overgangsfase vervangt dit het huidige materieel, dus geen permanente kostenpost. Ca. 1.000 €/ medewerker.
- 3.1 Extra controle op verontreinigingen in het gas is alleen nodig als gevoelige brandstofcellen als eindgebruik zijn opgesteld. Circa 25 k€ voor 20 jr. per invoeding. Onderhoud en kapitaallasten verdubbelen deze jaarkosten. Kosten zijn sterk afhankelijk van de nu nog onbekende gemiddelde grootte van een waterstofinvoeder¹. Aanname: Er is één invoeder per 1.000 - 10.000 WEQ.
- 4.1 Reclame- en voorlichtingscampagne moet de eindgebruiker bewust maken van de andere eigenschappen van waterstof, zoals de eventuele andersoortige geur, de afwezigheid van CO-vergiftiging, het wellicht hogere toestelrendement, meer condens bij verbranding en het iets afwijkende gedrag bij lekkage.
- 4.2 Van belang bij brandstofcellen. Aanname is dat in het kader van de voorbereiding op een zwavelvrij gasnet de odorisatie wordt aangepast. Eenmalige ombouwkosten per odorisatie installatie. Voor Nederland: 100 x 10 k€ / 10 MWEQ.
- 4.3 Van belang in verband met de eventueel verhoogde risicoperceptie van waterstof en het grotere aantal invoedings/odorisatiepunten. Intensivering van steekproeven. De kosten bedragen nu circa 0,1 €/(WEQ jr). Permanent minimaal 1 controle per regio/jr + 1 per 1.000 WEQ/jr.

¹ Rapport "Green Liaisons – Contouren van een routekaart Hernieuwbare Gassen 2050" (De Gemeyn, april 2018) noemt een aantal van 3.350 installaties met een totale productie van 38,4 PJ totaal (som van duurzame energie in de vorm van elektriciteit, waterstof en biomethaan)



- 4.5 Betreft het gebruik van duurdere koppelingen en extra dichtheidstesten bij de aanleg van de gasbinneninstallatie. 10% kostenverhoging op 1.000 € installatiekosten/WEQ per 40 jr.
- 4.6 Conventionele kooktoestellen worden eenmalig versneld vervangen door katalytische branders onder glas of elektrische kookplaten.

De onderstaande tabel geeft de relevantie van de maatregelen in relatie tot de penetratiegraad van het in de regio aanwezige waterstofnet.

| Maatregel | Tot aan de stad (GOS) | Tot aan de wijk (DS) | Tot aan de hoek vd straat | Tot aan de woning | Tot in de woning |
|--|-----------------------|----------------------|---------------------------|-------------------|------------------|
| 1 Veiligheid transport en distributie | | | | | |
| 1.1 Voorlichting en opleiding monteurs | X | X | X | X | X |
| 1.2 Aanpassen van werkprocedures voor aanleg en onderhoud | X | X | X | X | X |
| 1.3 Aanpassen van normen en voorschriften | X | X | X | X | X |
| 1.4 Toezichthouden bij graafwerkzaamheden | | X | X | X | X |
| 1.5 Dynamisch/automatisch sectioneren van het gasnet | | X | X | X | X |
| 2 Leveringszekerheid en instandhouding | | | | | |
| 2.1 Aanpassingen gereedschap en meetinstrumenten | X | X | X | X | X |
| 3 Invoeding | | | | | |
| 3.1 Extra controle op verontreiniging (S, CO, etc.) | | X | X | X | X |
| 4 Veiligheid van aflevering en eindgebruik | | | | | |
| 4.1 Reclame-/voorlichtingscampagne | | X | X | X | X |
| 4.2 Aanpassen van odorisatie | | X | X | X | X |
| 4.3 Extra controle op odorisatie | | X | X | X | X |
| 4.4 Aanpassen normen voor de gasbinneninstallatie (lektheid) | | | | | X |
| 4.5 Aanpassen werkprocedures voor aanleg en onderhoud gasbinneninstallatie | | | | | X |
| 4.6 Geen open vlam toestellen | X | X | X | X | X |
| 5 Aanpassingen installaties eindverbruikers | | | | | |
| 5.1 Andere gasmeters (grotere balg) | | | | X | X |
| 5.2 Andere gasmeters (ultrasoon) | | | | X | X |
| 5.3 Extra controle gasbinneninstallatie (eenmalig/jaarlijks) | | | | | X |
| 5.4 Andere toestellen (vervanging/ombouw) | X | X | X | X | X |

Tabel 6-2. Maatregelen bij de distributie van waterstof, onderverdeeld per penetratiegraad (X = van toepassing).



6.3 Kosten van maatregelen voor de distributie van biomethaan

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de belangrijkste maatregelen en de extra kosten ten opzichte van aardgasdistributie voor het kunnen gebruiken van de bestaande gasinfrastructuur voor de levering van biomethaan aan eindgebruikers. Hierbij is uitgegaan van een afwijkende gassamenstelling ten opzichte van de MR-Gaskwaliteit. Indien de samenstelling van biomethaan overeenkomt met de huidige MR-Gaskwaliteit, vervallen deze kosten. Terugkerende kosten betreffen de hogere vervangingskosten van de gasmeter in verband met de interne calorische waarde correctie.

| | Maatregel | Eenmalig, basis | Eenmalig per WEQ | Terugkerend basis | Terugkerend per WEQ |
|----------|--|-----------------|------------------|-------------------|---------------------|
| | | k€ | €/WEQ | k€/jr | €/jr WEQ |
| 1 | Veiligheid transport en distributie | | | | |
| 1.1 | Voorlichting en opleiding monteurs | ++ | + | 0 | 0 |
| 1.2 | Aanpassen van werkprocedures voor aanleg en onderhoud | 0 | 0 | 0 | + |
| 1.3 | Aanpassen van normen en voorschriften | ++ | 0 | 0 | 0 |
| 2 | Leveringszekerheid en instandhouding | | | | |
| 2.1 | Aanpassingen gereedschap en meetinstrumenten | 0 | + | 0 | 0 |
| 2.2 | Sifons plaatsen (beheersen condensaatvorming) | 0 | + | 0 | + |
| 3 | Invoeding | | | | |
| 3.1 | Extra controle op verontreiniging (H ₂ S, CO, etc.) | 0 | 0 | 0 | +(++) |
| 4 | Veiligheid van aflevering en eindgebruik | | | | |
| 4.1 | Reclame-/voorlichtingscampagne | ++ | + | 0 | 0 |
| 4.2 | Aanpassen van odorisatie | ++ | + | 0 | 0 |
| 4.3 | Extra controle op odorisatie | 0 | 0 | + | + |
| 4.4 | Optionele plaatsing van gasdetectoren | 0 | ++ | 0 | 0 |
| 5 | Aanpassingen installaties eindverbruiker | | | | |
| 5.1 | Ander systeem van calorische waarde verrekening | +(++) | +(++) | 0 | 0(++) |
| 5.3 | Extra controle gasbinneninstallatie (eenmalig/jaarlijks) | 0 | 0 | 0 | ++ |
| 5.4 | Geen open vlam toestellen | 0 | ++ | 0 | 0 |
| 5.5 | Andere toestellen (vervanging/ombouw) | 0 | +(++) | 0 | 0 |

Tabel 6-3. Extra kosten voor de relevante maatregelen bij het gebruik van de bestaande gasinfrastructuur voor het transport van biomethaan.

++: grotere extra kostenpost,

+: beperkte extra kostenpost,

0: geen maatregel en/of geen extra kosten



Toelichting.

- 1.1 De oorspronkelijk voor aardgas opgeleide monteurs (eigen personeel netbeheerders en personeel van aannemers) zullen moeten worden omgeschoold voor werkzaamheden met biomethaan. Daarvoor moet eenmalig cursusmateriaal worden ontwikkeld en zullen eenmalig de monteurs in de regio moeten worden bijgeschoold. De ontwikkelkosten van de cursus en het cursusmateriaal voor Nederland (diverse opleidingsniveau's) zijn geschat op 10 k€/cursusdag. Per werknemer zijn twee cursusdagen à 0.5 k€/dag (alle kosten) voorzien. Een persoon bedient 1.000 WEQ met deze kennis.
- 1.2 Bij werkzaamheden aan het distributienet zijn op beperkte schaal aanvullende maatregelen en procedures nodig om de risico's op het huidige niveau te houden (maatregelen zijn voorzien met betrekking tot H₂S en microbiologische verontreiniging). Deze maatregelen maken het jaarlijkse onderhoud (reparaties, vervangingen en aanpassingen van een bestaand net) 2% duurder (t.o.v. de huidige 100 €/(WEQ jr)).
- 1.3 Normen en standaarden voor specifieke biomethaan-distributienetten zijn nog niet beschikbaar. Een eenmalige uitbreiding/herziening van bestaande normen (bijv. NEN7244, NEN2650, NEN1059) is nodig. Op dit moment geeft de gasdistributiesector circa 1 M€/jr uit aan het in stand houden van systeem- en componentnormen (NEN, CEN en ISO normen).
- 2.1 Extra aanschaf van bijvoorbeeld H₂S alarm als persoonlijk beschermingsmiddel. Aanpassen lekzoekapparatuur. Na de overgangsfase vervangt dit het huidige materieel, dus geen permanente kostenpost. Circa 500 €/medewerker.
- 2.2 Plaatsing kost 1.000 € per sifon. Er is één sifon per invoeder nodig. Kosten per WEQ dus afhankelijk van de gemiddelde grootte van een invoeder (1.000 à 10.000/ WEQ). Jaarlijkse inspectie nodig (100 € per beurt).
- 3.1 Extra gaskwaliteitsbewaking per invoeder. Capex: GC 50 k€ over 10 jaar. Opex: 5 k€. Voor installatie 1.000 m³/h = 10.000 WEQ. Kosten zijn sterk afhankelijk van de gemiddelde schaalgrootte van de toekomstige vergistingsinstallaties.
- 4.1 In het bijzonder voor de andersoortige ruikbaarheid van biomethaan en het verhoogde risico op gemaskeerde geur is een voorlichtingscampagne in dit kostenoverzicht opgenomen.
- 4.2 Deze post is overwogen, maar wordt als overbodig ingeschat, mits de odorisatie van biomethaan voldoende betrouwbaar is.
- 4.3 Voor de ombouw van bestaande odorisatie installaties en het toevoegen van deze installatie bij de biomethaan invoeders.
- 4.4 Extra controles op odorisatie worden geschat op maximaal enkele controles per jaar à enkele honderden euro's per verzorgingsgebied met enkele duizenden WEQ.
- 4.5 Plaatsing kost circa 100 € per (H₂S/CH₄) sensor. Deze beheersmaatregel is optioneel. In beginsel is odorisatie van biomethaan een afdoende maatregel om het huidige veiligheidsniveau te realiseren.
- 5.1 Kosten zijn sterk afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid en de toegestane variatie in calorische waarden. De methode kan variëren van een administratieve verrekening op basis van invoedingsgegevens tot een actuele meting van calorische waarde per eindgebruiker. De ontwikkeling en invoering van een nieuw systeem vergt aanzienlijke eenmalige kosten. Er is nog geen betaalbare technologie op de markt voor calorische waarde bepaling op de schaal van één aansluiting. De eenmalige kosten van technologie ontwikkeling zijn niet in de tabel opgenomen.
- 5.2 (item alleen voor waterstof van toepassing).
- 5.3 Om de eventuele extra risico's van biomethaanlekage te beheersen kan bij de introductie van biomethaan een regelmatige controle van de gasbinneninstallatie worden ingevoerd. Dit is gesteld op 1 controle per jaar. Indien uit de resultaten blijkt, dat de veiligheid met de huidige praktijk (alleen



- controle op initiatief van de huiseigenaar) voldoende geborgd is, kan deze extra inspectie op termijn weer vervallen.
- 5.4 Vanwege het eventuele risico op het incidenteel vrijkomen van H₂S en microbiologische vervuiling binnenshuis kan worden overwogen om open vlam toestellen te vervangen door andere typen (kook)toestellen.
- 5.5 De kosten voor het aanpassen van de toestellen zijn sterk afhankelijk van de toegelaten variatie in Wobbe-index. Het genoemde maximum bedrag betreft de vervanging van inspuisers en de afregeling van de branderdruk. Bij extreem brede toegelaten bandbreedte is vervanging van het toestel nodig (1.000 €/WEQ).

| Maatregel | Tot aan de stad (GOS) | Tot aan de wijk (DS) | Tot aan de hoek vd straat | Tot aan de woning | Tot in de woning |
|--|-----------------------|----------------------|---------------------------|-------------------|------------------|
| 1 Veiligheid transport en distributie | | | | | |
| 1.1 Voorlichting en opleiding monteurs | X | X | X | X | X |
| 1.2 Aanpassen van werkprocedures voor aanleg en onderhoud | X | X | X | X | X |
| 1.3 Aanpassen van normen en voorschriften | X | X | X | X | X |
| 2 Leveringszekerheid en instandhouding | | | | | |
| 2.1 Aanpassingen gereedschap en meetinstrumenten | X | X | X | X | X |
| 2.2 Sifons plaatsen (beheersen condensaatvorming) | | X | X | X | X |
| 3 Invoeding | | | | | |
| 3.1 Extra controle op verontreiniging (H ₂ S, CO, etc.) | X | X | X | X | X |
| 4 Veiligheid van aflevering en eindgebruik | | | | | |
| 4.1 Reclame-/voorlichtingscampagne | X | X | X | X | X |
| 4.2 Aanpassen van odorisatie | | X | X | X | X |
| 4.3 Extra controle op odorisatie | | | | X | X |
| 4.4 Optionele plaatsing van gasdetectoren | | | | | X |
| 5 Aanpassingen installaties eindverbruiker | | | | | |
| 5.1 Ander systeem van calorische waarde verrekening | X | X | X | X | X |
| 5.4 Geen open vlam toestellen | | | | | X |
| 5.5 Andere toestellen (vervanging/ombouw) | X | X | X | ? | ? |

Tabel 6-4. Maatregelen bij de distributie van biomethaan, onderverdeeld naar penetratiegraad (X = van toepassing).

6.4 Conclusie met betrekking tot de kostenraming

De huidige kosten voor de instandhouding van het gasnet bedragen 100 - 150 €/jr per WEQ. Veel van de beschouwde maatregelen hebben eenmalige kosten. Als deze worden uitgemiddeld over de toepassingsduur van een duurzaam net, zijn dit, voor zover het de gasdistributie betreft, kosten in de grootteorde van enkele euro's per WEQ/jr. De grootste kostenpost is wellicht het vervangen van de gasmeter en het ontwikkelen en implementeren van een eventuele andersoortige verrekeningsprocedure. De kosten van het meten van variaties in de calorische waarde op het niveau van een afzonderlijke woning zijn hoog en onzeker. Naar verwachting zal deze wijze van verrekening dan ook niet worden toegepast.



De eenmalige kosten geassocieerd met het (voortijdig) vervangen van gastoestellen bij de eindgebruiker zijn veel hoger dan eventuele extra gasnet-instandhoudingskosten (teruggerekend tientallen Euro's per WEQ/jr), maar zijn ook aan de orde bij de overgang naar warmte of "all-electric".

Van de terugkerende kosten zijn de posten met betrekking tot eventuele inspecties het hoogst. Extra inspectie bij graafwerkzaamheden is kostbaar. Een 100%-controle maakt gas(waterstof)levering 20 €/WEQ/jr duurder. Het alternatief van het sectioneren van het net is niet veel goedkoper en een deels onbeproeft techniek. Of deze maatregelen op de lange duur nodig zijn is onzeker en afhankelijk van praktijkervaring.

Een jaarlijkse inspectie van de gasbinneninstallatie en/of van gassensoren in de woning is kostbaar (grootte-orde 100 €/WEQ/jr) Ook hiervan is het nut en de noodzaak discutabel. Deze kosten zijn geen onderdeel van de instandhoudingskosten van het gasnet.

De overall-conclusie is, dat de kosten voor de instandhouding van het gasnet met minder dan 50% zullen stijgen. Afhankelijk van het nog door praktijkervaring te staven nut en de noodzaak van inspecties, is de best guess dat de additionele instandhoudingskosten uiteindelijk ongeveer 5% van de huidige kosten zullen bedragen (5 à 10 €/WEQ/jr)

6.5 Uitwerking van de scenario's

6.5.1 Aanpak

De Sankey diagrammen in het CE-rapport "Net voor de Toekomst" ([8], pag 75 e.v.) vormen het uitgangspunt voor het bepalen van de kosten voor de verduurzaming van het gasdistributienet.

De gasdistributienetten zijn voornamelijk van belang voor de levering van lagetemperatuur warmte. In het duurzame scenario kunnen ze waterstof en biomethaan aan woningen en utiliteitsgebouwen leveren, waar dit vervolgens wordt omgezet in de lagetemperatuur warmte voor verwarming en warmtapwaterbereiding.

Aangenomen wordt, dat dit in alle vier de scenario's 9 miljoen woningequivalenten (9 MWEQ) betreft en dat de omvang van de netten evenredig is met het relatieve aandeel dat waterstof respectievelijk biomethaan heeft in de totale energiestroom naar lagetemperatuur warmte. Eventueel geleverde elektriciteit wordt gewogen met een COP = 4.

Daar waar lagetemperatuur warmte wordt geleverd met biomethaan of waterstof, zal dat tot in de woning gebeuren. Bij het bepalen van de kosten zijn daarom alle daarmee verbonden maatregelen en kosten meegenomen. De basiskosten worden éénmaal in rekening gebracht en opgeteld bij de kosten per WEQ, maal het aantal WEQ.

Bij waterstof is gekozen voor intensieve controle bij graafwerkzaamheden tijdens de introductie periode, en het op termijn inzetten van innovatieve technieken om graafschades te voorkomen. Hierdoor is afgezien van segmenteren van het net.

De kosten voor het vervangen van toestellen worden niet meegenomen, omdat dezelfde kosten ook bij de uitrol van andersoortige netten (warmte of elektrisch) worden gemaakt. Voor de verrekening van biomethaan is uitgegaan van een midden niveau: eenmalig 30 €/WEQ en jaarlijks 3 €/WEQ.



6.5.2 Overzicht resultaten (4 scenario's)

De hierboven beschreven systematiek voor het bepalen van de kosten voor het distribueren van lagetemperatuur warmte, leidt tot het in tabel 6-5 vermelde overzicht. De tabel is opgebouwd uit het energiegebruik per scenario en het bij elk scenario behorende aantal woningequivalenten. De kosten zijn berekend door gebruik te maken van deze gegevens, alsmede van de kostengegevens uit tabel 6-1 tot en met tabel 6-4.

| | | 1. Regionaal | 2. Nationaal | 3. Internationaal | 4. Generieke Sturing |
|-------------------------------------|-------|--------------|--------------|-------------------|----------------------|
| Waterstof | PJ | 19,0 | 203,2 | 158,1 | 0,0 |
| Geothermie/restwarmte | PJ | 80,3 | 5,5 | 4,7 | 0,0 |
| Biomassa | PJ | 52,6 | 11,1 | 29,0 | 20,0 |
| Biomethaan | PJ | 67,9 | 64,9 | 137,7 | 344,0 |
| Elektriciteitsproductie | PJ | 77,3 | 54,0 | 44,8 | 43,9 |
| WKK (grootschalig) | PJ | 78,3 | 49,1 | 42,1 | 0,2 |
| Totaal LTW | | 607,3 | 549,8 | 550,8 | 539,8 |
| | | | | | |
| Totaal | Mweq | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| Waterstof | Mweq | 0,3 | 3,3 | 2,6 | 0,0 |
| Biomethaan | Mweq | 1,0 | 1,1 | 2,3 | 5,7 |
| | | | | | |
| Netkosten waterstof (NL eenmalig) | M€ | 59 | 678 | 527 | 0 |
| Netkosten biomethaan (NL eenmalig) | M€ | 38 | 40 | 81 | 202 |
| | | | | | |
| Netkosten waterstof (NL jaarlijks) | M€/jr | 36 | 422 | 328 | 0 |
| Netkosten biomethaan (NL jaarlijks) | M€/jr | 125 | 132 | 279 | 711 |

Tabel 6-5. Totaal overzicht kosten voor het implementeren van de relevante maatregelen per scenario. De kosten weerspiegelen de omvang van de netten en niet zozeer de intrinsieke verschillen tussen waterstof en biomethaan.

6.5.3 Samenvattende beschouwing

De transitie naar een duurzame energievoorziening vergt zowel aanpassingen bij transport- en distributienetten, als aanpassingen bij de eindgebruiker.

De aanpassingen bij de eindgebruiker (per WEQ) blijken veelal één à twee ordegrootten méér te kosten dan de aanpassingen van het gasnet (omgeslagen per WEQ).

Het valt buiten de scope van dit rapport om een vergelijking te maken met de eventuele aanpassingskosten (uitbreidingskosten) van elektriciteits- of warmtenetten, maar de auteurs hebben de indruk dat deze kosten voor E en W per WEQ waarschijnlijk hoger zullen uitvallen. Hierbij moet worden bedacht, dat na het verwijderen van de gasaansluiting, er nog aanzienlijke installatietechnische aanpassingen in de woning noodzakelijk zijn. De hiermee samenhangende kosten



zijn minstens van dezelfde orde grootte als het vervangen of aanpassen van de gastoestellen.

Het voornaamste kostenverschil tussen de gasnetten voor waterstof en voor biomethaan zijn de kosten van het vervangen van de gasmeter. Bij waterstof is er in ongunstige situaties een andere gasmeter nodig, bij biomethaan kan dezelfde gasmeter gebruikt blijven worden, als tenminste de kwaliteitsband van het gedistribueerde gas voldoende scherp begrensd blijft.

Nader onderzocht moet worden of eenzelfde ultrasone gasmeter wellicht voor zowel waterstof als voor biomethaan kan worden ingezet, eventueel slechts met een kleine aanpassing in software (en met een, verzegelde, schakelknop).

Als er variaties in de calorische waarde van biomethaan worden toegestaan, zijn de extra kosten voor de biomethaanmeting afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid, de toegestane bandbreedte en de mate van variatie in tijd en plaats. Op dit moment is er geen technologie beschikbaar, die tegen acceptabele kosten en met de huidige nauwkeurigheid (< 0.5%) de gaskwaliteit bij de individuele eindgebruiker kan vaststellen. Mogelijk dat hiervoor in de toekomst goedkope sensoren ontwikkeld kunnen worden [40].

De voornaamste hindernis voor het hergebruik van de gasnetten vormen dan ook niet de technische beperkingen van het net of de financiële consequenties, maar de beschikbaarheid van de alternatieve gasvormige energiedragers waterstof en biomethaan.

Een belangrijk voordeel van gas als energiedrager is de mogelijkheid om daarmee energie goedkoop op te slaan en zonder verlies te bewaren. Deze kostenvoordelen zijn niet in het overzicht verwerkt.

Voor het veilig bedienen en in stand houden van de netten, die waterstof en biomethaan transporteren naar de eindgebruiker, zijn beperkte aanpassingen aan procedures en instrumenten nodig. De kosten van deze aanpassingen zijn gering ten opzichte van de kosten van het vervangen van toestellen bij de eindgebruiker.



7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

De bestaande gasdistributenetten zijn geschikt om biomethaan of 100% waterstof te transporteren. Ook de moderne materialen als slagvast PVC, PE en kathodisch beschermd staal zijn geschikt voor het gebruik van deze duurzame gasen. Bij het toestaan van zowel waterstof als biomethaan in de gasnetten moet het duurzame gas droog zijn.

De maximumwaarden voor biomethaan zijn reeds weergegeven in tabel 5-4.

Deze maximumwaarden gelden ook voor het te distribueren waterstof. De verwachting is echter dat in de praktijk waterstof ruimschoots hieraan zal voldoen.

De resulterende tabel voor beide duurzame gasen is hieronder voor de volledigheid herhaald (tabel 7-1).

| Gascomponent | | Maximum concentratie | Eenheid | Opmerking |
|---|----------|----------------------|-------------------|--|
| Ammoniak | NH_3 | 50 | ppm | |
| Benzeen | C_6H_6 | 20 | ppm | |
| Chloor /Fluor houdende componenten | | 1.000 | mg/m ³ | |
| Fosfine | PH_3 | 10 | ppm | |
| Koolstof dioxide | CO_2 | 500.000 (50) | ppm (%) | Niet in combinatie met O ₂ en H ₂ O |
| Koolstof monoxide | CO | 2.300 | ppm | |
| Tolueen | C_7H_8 | 3.600 | ppm | |
| Water | H_2O | | | Niet in vloeibare vorm ¹ |
| Waterstof chloride | HCl | 3 | ppm | |
| Waterstof cyanide | HCN | 900 | ppm | |
| Waterstof sulfide | H_2S | 160 | ppm | |
| Zuurstof | O_2 | 30.000 (3) | ppm (%) | Niet in combinatie met CO ₂ en H ₂ O |

Tabel 7-1 Maximumwaarde per gascomponent voor biomethaan en waterstof (gebaseerd op acceptabele waarden voor de giftigheid en de bestandheid van de gasdistributie-materialen)

In de vermelde concentraties is nog geen rekening gehouden met eventuele beperkingen, die door verbruikerstoestellen worden opgelegd, zoals een maximumwaarde voor siliciumverbindingen.

Voor het transporteren van ruw biogas zijn de metalen gasnetten, maar ook het materiaal POM, dat veelvuldig wordt toegepast in verbindingen, huisdrukregelaars en gasmeters, niet geschikt.

¹ In combinatie met water zijn veel metalen toch corrosiegevoelig. Verlaging van het watergehalte tot een dauwpunt van -3 °C, zoals in bijlage IV wordt genoemd, is acceptabel. Een dauwpunt tot de huidige waarde van -10 °C geeft vanuit materiaal oogpunt echter extra zekerheid.



Een aanpassing van de momenteel toegepaste aanleg- en ontwerptechnieken is niet nodig. Deze kunnen ook ingezet worden voor het aanleggen van nieuwe biomethaan- en waterstofgasleidingen.

Voor het veilig bedienen en in stand houden van de netten, die waterstof (100%) of biomethaan transporteren naar de eindgebruiker, zijn beperkte aanpassingen aan procedures en meetinstrumenten nodig.

Tijdens de introductie van deze duurzame gassen zal vanwege de afwijkende kenmerken extra aandacht aan de veiligheid besteed moeten worden. Nadat hiermee ervaring is opgedaan, kan de noodzakelijkheid van de extra maatregelen heroverwogen worden.

De kosten van de maatregelen, die door de netbeheerder genomen moeten worden, zijn relatief gering ten opzichte van de kosten van het vervangen van toestellen bij de eindgebruiker.

Bij de introductie van 100% waterstof distributie moet rekening worden gehouden met de gasmeter. Per woning moet namelijk een bijna 3x zo groot gasvolume geleverd worden voor dezelfde energievraag. Indien de huidige gasmeter al op de maximum belasting werkt, zal deze vervangen moeten worden door een groter exemplaar. Als alternatief kan ook worden gekozen voor ultrasone meters.

Als gevolg van de lagere energie-inhoud van waterstof ten opzichte van aardgas zal waterstof bij eenzelfde energievraag met een hogere snelheid getransporteerd moeten worden. De drukval over de leidingen blijft echter gelijk door de lagere viscositeit. Hierdoor blijft de capaciteit van het net nagenoeg onveranderd. De huidige ontwerpnormen voor het net kunnen dus gehandhaafd blijven. Door de hogere stroomsnelheid kan de geluidsproductie veranderen. Of dit een probleem gaat vormen is nu nog onbekend.

De kosten voor het transporteren van biomethaan verschillen weinig van de huidige distributiekosten voor fossiel aardgas, zolang een beperkte bandbreedte van de calorische waarde (in dezelfde orde van grootte als op dit moment het geval is) gehandhaafd blijft. Als er een grotere bandbreedte wordt toegestaan, zijn aanvullende verrekenningsprocedures nodig. De kosten hiervan zijn afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid, de toegestane bandbreedte en de mate van variatie in tijd en plaats. Op dit moment is er geen technologie beschikbaar die tegen acceptabele kosten en met de huidige nauwkeurigheid (< 0.5%) de gaskwaliteit bij de individuele eindgebruiker kan vaststellen.

Drie van de vier scenario's voorzien in een substantieel aantal woning-equivalenten, die met behulp van condenserende CV-toestellen of hybride warmtepompen in hun lagetemperatuur warmtevraag voorzien. Voor deze eindverbruikers zal een gasdistributienet tot in de woning aanwezig zijn (dan wel in stand worden gehouden). In het scenario Regie Regionaal is een bescheiden rol weggelegd voor een lokaal biomethaan distributienet tot aan of in de woningen.

Het bestaande 8 bar gasnet, evenals uiteraard het GTS transportnet, kan dienen als verbinding vanaf de productielocaties (waterstof en biomethaan) naar de stadsverwarmingcentrales en de buffers. Hiertoe zijn wel aanpassingen nodig aan de gasontvangststations, waar het gas van het 8 bar net naar de hogere druk in het GTS net moet worden gebracht. De hiermee samenhangende kosten zijn overigens gering ten opzichte van het opnieuw aanleggen van leidingen.

Of een lokaal gasnet gebruikt zal worden voor biomethaan of voor waterstof is sterk afhankelijk van de lokale beschikbaarheid van deze energiedragers. In alle scenario's is biomethaan het goedkoopste alternatief, maar de beschikbaarheid is (in



verschillende mate) beperkt. In gebieden waar geen gas kan worden geleverd vanwege een landelijk tekort aan gasvormige energiedragers of omdat deze lokaal niet beschikbaar zijn, zal de goedkoopste van de duurdere alternatieven zoals “all electric” of geothermie worden ingezet en wordt daarmee het bestaande gasnet (lokaal) overbodig. De duurdere alternatieven zijn niet alleen duurder qua productiekosten, maar ook qua transportkosten. Verwacht mag worden dat duurzaam geproduceerde elektriciteit en geothermische of restwarmte zoveel mogelijk in de gebieden in de nabijheid van de productie gebruikt zullen worden en dat in de overige gebieden tussen regio's het (hoge druk) gasdistributienet in stand zal blijven.

De kosten voor de benodigde maatregelen bij de gasdistributie zelf bij het overstappen van aardgas naar waterstof (100%) en biomethaan (en die dus in eerste instantie door de netbeheerder gemaakt worden), zijn betrekkelijk gering ten opzichte van de kosten die direct voor rekening komen van de eindgebruiker (zoals de aanschaf van nieuwe toestellen).

7.2 Aanbevelingen

- In de regio's waar geen concrete plannen zijn voor een algehele overstap op “all-electric” of op een warmtenet, waarbij het gasnet overbodig wordt, is het raadzaam om het bestaande gasnet vooralsnog in stand te houden.
- Gebruik bij netuitbreiding en vervanging de thans toegepaste materialen (slagvast PVC, PE100 en staal). De keuze van het leidingmateriaal hangt niet zozeer af van de kwaliteit van het duurzame gas, maar meer van de lokale omstandigheden (reeds aanwezige materialen) en van de (logistieke) voorkeur van de netbeheerder. Mocht het watergehalte van het duurzame gas worden verhoogd, dan hebben kunststofleidingen de voorkeur, vanwege de mogelijke corrosie van metalen leidingen.
- Streef bij het vervangen van de gasmeter naar een instrument dat ook geschikt is, of tegen lage kosten geschikt te maken is, voor 100% waterstof.
- Houdt bij eventuele verbreding van de toegestane bandbreedte van de energetische waarde (Wobbe-index) van biomethaan rekening met de daarmee verbonden kosten voor verrekening van de calorische waarde. Deze kosten kunnen hoger zijn dan de kosten voor de productie van het biomethaan. Wees daarom terughoudend om voor biomethaan een al te grote bandbreedte voor de calorische waarde toe te staan.
- Beoordeel alle nieuwe materialen en componenten voor het gasnet, die op de markt komen tevens op hun bestendigheid tegen de combinatie van $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ in lage concentraties, alsook op de bestandheid tegen 100% H_2 . Dit voorkomt dat deze materialen tegen hoge kosten vóór het einde van hun economische/technische levensduur moeten worden vervangen, wanneer duurzame gassen beschikbaar komen.
- Verzamel zoveel mogelijk praktijkervaring over het ontsteekgedrag en de explosieveiligheid van waterstof, zodat er een onderbouwde risico-inschatting van graaactiviteiten en storingen aan gasbinneninstallaties mogelijk is, zodra waterstof beschikbaar komt, zodat de proportionaliteit van eventuele aanvullende maatregelen kan worden afgewogen. Monitor de praktijkervaringen tijdens de introductie van de duurzame gassen, door tijdelijk intensievere inspectie en controle.



- Onderzoek de opties van een zwavelvrije odorant voor waterstof, dat de goede werking van brandstofcellen niet hindert. Voor de veiligheid van waterstof in de openbare gasvoorziening is de ruikbaarheid van het gas essentieel.
- Onderzoek of de hogere snelheid van waterstofgas in leidingen gevolgen heeft voor eventuele geluidshinder. Bij gelijkblijvende energievraag wordt de stromingssnelheid in het gasnet hoger, wanneer overgeschakeld wordt van aardgas naar waterstof. Dit kan extra geluidshinder veroorzaken, met name rondom stations (bij gelijkblijvende dimensionering). Ervaringen en informatie hierover ontbreken nog. Verzamel daarom ervaringen in de praktijk of door middel van beproevingen in het laboratorium.
- Onderzoek of, en zo ja welke aanpassingen aan werkinstructies en normen moeten worden gedaan, om het huidige hoge veiligheidsniveau van het (aardgas)net ook in de toekomst met duurzame gassen op peil te houden.
- Houd bij de overgang naar duurzame gassen rekening met een adequate opleiding van (technisch) personeel en zorg voor een campagne voor publieke bewustwording van het afwijkende gedrag van duurzame gassen .



8 Referenties

- [1] Ministerie van Economische Zaken, Energieagenda. Naar een CO2-arme energievoorziening, 2015.
- [2] RVO, CO2 emission factors for fuels in the Netherlands, 2002.
- [3] Rijksoverheid, „Minder gaswinning Groningen,” [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/gaswinning-in-groningen/minder-gaswinning-groningen>.
- [4] Gemeente Amsterdam, „Amsterdam stoomt op naar een aardgasvrije stad,” [Online]. Available: <https://www.amsterdam.nl/wonen-leefomgeving/duurzaam-amsterdam/aardgasvrij/amsterdam-stoomt/>.
- [5] Binnenlands Bestuur, „Leiden stap dichterbij een aardgasvrij stad,” [Online]. Available: <http://www.binnenlandsbestuur.nl/ruimte-en-milieu/kennispartners/overmorgen/leiden-stap-dichterbij-een-aardgasvrije-stad.9566122.lynx>.
- [6] Energieoverheid, „Grote ambities energieneutraal Utrecht,” [Online]. Available: <http://www.energieoverheid.nl/2015/07/06/grote-ambities-energieneutraal-utrecht/>. [Geopend 22 02 2018].
- [7] CE Delft, „Net voor de Toekomst,” 2017.
- [8] CE Delft, „Net voor de Toekomst. Achtergrondrapport.,” 2017.
- [9] H. Freese en E. Fennema, „Higher efficiencies for micro-CHP using fuel cells,” Kiwa Technology, Apeldoorn, 2014.
- [10] „Aanvullende Voorwaarden RNB Groen Gas Invoeders versie D14.0,” 15 01 2009. [Online]. Available: https://www.liander.nl/sites/default/files/Aansluitingen-Voorlopige_aanvullende_voorwaarden-RNB-Groen_Gas_Invoeders.pdf. [Geopend 24 04 2018].
- [11] ASUE (Arbeitsgemeinschaft für umweltfreundlichem Energieverbrauch), Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung, ASUE, maart 2016.
- [12] E. Baur, K. Ruhrberg en W. Woishnis, Chemical Resistance of Commodity Thermoplastics, Plastics Design Library, 2016.
- [13] „Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst,” NATURALHY, 2010.
- [14] H. Iskov en S. Kneck, „Using the natural gas network for transporting hydrogen - Ten years of experience,” International Gas Union, Rio de Janeiro, 2017.



- [15] M. Kippers en H. Ophoff, „Waterstof in aardgas op Ameland,” Kiwa Gas Technology, Apeldoorn, 2012.
- [16] J. d. Bruin, W. Rittel, F. Scholten, E. v. d. Stok en J. Weller, „Impact of Sustainable Gases on Joints used in Gas Distribution Networks. Final Report,” Kiwa Technology, Apeldoorn, 2015.
- [17] ISO/TR 7620, „Rubber materials - Chemical resistance,” ISO, 2005.
- [18] ISO/TR 10358, „Plastics pipes and fittings - Combined chemical-resistance classification table,” ISO, 1993.
- [19] H. Iskov, „Field test of hydrogen in the natural gas grid,” Dansk Gasteknisk Center, Horsholm, 2010.
- [20] M. Melaina, O. Antonia en M. Penev, „Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues.,” National Renewable Energy Laboratory, Denver, 2013.
- [21] C. San Marchi en B. Somerday, „Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials,” Sandia National Laboratories, Albuquerque New Mexico Livermore California, 2012.
- [22] P. van Norden, „Kenniscentrum Gasnetbeheer,” 14 9 2016. [Online]. Available: <https://www.kenniscentrumgasnetbeheer.nl/Activiteiten/Risicobeheersing/2016/Drie-generieke-Bowties-beschikbaar.aspx>. [Geopend 28 02 2018].
- [23] M. Crowther, G. Orr, J. Thomas, G. Stephens en L. Summerfield, „Energy Storage Component Research & Feasibility Study Scheme HYHouse,” Kiwa Gastec, Cheltenham, 2015.
- [24] US department of Energy, „Hydrogen safety fact sheet”.
- [25] Kiwa UK, „Leeds City Gate. H21,” 2016.
- [26] H. Rijpkema, „VGI\ 880\Rpk: Registratie van gasinstallatieongevallen achter de meter; Jaaroverzicht 2016,” Kiwa Technology, Apeldoorn, juni 2017.
- [27] J. d. Bruin, R. Hermkens, H. Ophoff, P. Postma, W. Rittel, F. Scholten en E. v. d. Stok, „Effects of Wide band gases on Materials used in Gas Distribution Networks, Literature Review,” Kiwa Technology, Apeldoorn, 2012.
- [28] Liander, „Gassamenstellingen van duurzame gassen in het toekomstbestendige gasnet (versie 0.91),” Liander, 2017.
- [29] N.V. Nederlandse Gasunie, Physical Properties of Natural Gases, Groningen: N.V. Nederlandse Gasunie, 1980.
- [30] „Beleidsregels Arbo betreden besloten ruimte, artikel 4.6-2,” 1998.



- [31] L. Sanders, E. Fleury, M. Pale, W. Rittel en R. Hermkens, „GERG project on biomethane trace components and their potential impact - phase 1,” Engie, Saint-Denis, 2017.
- [32] SER, „SER/ Grenswaarden,” SER, 2017. [Online]. Available: <https://www.ser.nl/nl/grenswaarden>. [Geopend 2018].
- [33] J. d. Bruin, W. Rittel, E. v. d. Stok en J. Weller, „Effects of Wide Band Gases on Materials used in Gas Distribution Networks, Final Report,” Kiwa Technology, Apeldoorn, 2017.
- [34] „22.3 Oxidizing and Reducing Agents,” CK-12 Foundation, 2018. [Online]. Available: <https://www.ck12.org/book/CK-12-Chemistry-Concepts-Intermediate/section/22.3/>. [Geopend februari 2018].
- [35] M. M. Ibrahim en M. S. Seehra, „Sulfur-Promoted Degradation of Polyethylene/Polypropylene Detected by Electron Spin Resonance Spectroscopy,” *Energy Fuels*, vol. 4, pp. 926-930, 1997.
- [36] M. v. Essen, S. Gersen, P. Visser, R. Klein-Douwel, D. Vainchtein, J. T. M. D. Hosson, A. Mokhov en H. Levinsky, „Onderzoek naar verbrandingsaspecten van siloxanen in biogas,” KEMA en RUG, 2011.
- [37] „Injection of Hydrogen/Natural Gas Admixtures in Underground Gas Storage (UGS),” Marcogaz, Brussels, 2017.
- [38] „Water activity controls microbial growth,” Meter Food, 2018. [Online]. Available: <https://www.metergroup.com/food/articles/microbial-growth/>. [Geopend 24 April 2018].
- [39] C. Taylor, L. Kimtantas en A. Martin, „An Effective Solution for Elemental Sulfur Deposition in Natural Gas Systems,” Bechtel Hydrocarbon Technology Solutions Inc., 2014.
- [40] „Brightlands Materials Center: nieuwe gassensortechnologie,” TNO, [Online]. Available: <https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2016/4/brightlands-materials-center-nieuwe-gassensortechnologie/>. [Geopend maart 2018].
- [41] J. Bruin, P. Postma, W. Rittel, F. Scholten, E. v. Stok, R. Hermkens en J. Heerings, „Impact of Sustainable Gases on Joints used in Gas Distribution Networks, Literature Review,” Kiwa Technology, Apeldoorn, 2012.
- [42] H. Ophoff, „Methaanemissie door Gasdistributie, Rapportage over 2016 volgens het Monitoringsprotocol Methaanemissie Gasdistributie.” Kiwa Technology, Apeldoorn, 2017.
- [43] „KE-7 Buigbare gasmeteraansluitingen,” Kiwa Nederland BV., Apeldoorn, 2012.
- [44] „Material Grade Comparison Chart - Pipes,” Arcelor Mittal.



- [45] API 5L/ISO 3183, „Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems,” 2009.
- [46] S. D. Paul E. Dodds, „Conversion of the UK gas system to transport hydrogen,” *Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 7189-7200, 2013.
- [47] D. H. Herring, „Hydrogen Embrittlement,” *The Heat Treat Doctor*, Elmhurst, 2010.
- [48] Y. H. Zhang, „Review of the effect of hydrogen gas on fatigue performance of steels,” TWI, 2010.
- [49] C. S. Marchi en B. P. Somerday, „Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials,” Sandia , Albuquerque, 2012.
- [50] W. L. Jolly, „Hydrogen,” *Encyclopaedia Britannica, inc.*, 21 december 2017. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/hydrogen/Reactivity-of-hydrogen> . [Geopend januari 2018].
- [51] API RP 941, „Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures,” American Petroleum Institute, 2016.
- [52] M. Hommes en V. Monsma, „Materiaalinventarisatie in het Gasunienetwerk,” Kema, Groningen, 2011.
- [53] C. S. Marchi en B. Somerday, „Technical Reference on Hydrogen Compatability of Materials, Plain Carbon Ferritic Steels,” Sandia National Laboratories, Livermore, 2007.
- [54] J. R. Spingarn, „Weldments, Hydrogen Embrittlement of Pipeline,” Sandia Laboratories, Livermore, 1980.
- [55] M. Janssen, J. Zuidema en R. Wanhill, *Fracture Mechanics*, Delft: DUP Blue Print, 2002.
- [56] P. Schreurs, „Bepaling van spanningsintensiteiten in gasdistributieleidingen tbv beoordeling op het ontstaan van vermoeiingsscheuren in waterstofmilieu,” Sintra, 2012.
- [57] BS 7910, „Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.”.
- [58] K. Matsuno, H. Matsunaga, M. Endo en K. Yanase, „Effect of hydrogen on uniaxial tensile behaviors of a ductile cast iron,” *Advanced Materials Development and Performance*, vol. 6, pp. 407-412, 2012.
- [59] J. Huttenrauch en G. Muller-Syring, „Assessment of repair and rehabilitation technologies relating to the transport of hythan (hydrogen- methane-mixture),” NATURALHY, 2006.
- [60] NEN 7200, „Kunststofleidingen voor het transport van gas, drinkwater en afvalwater - Stuiklassen van buizen en hulpstukken van PE 63, PE 80 en PE 100,” NEN 7200, 2004.



- [61] TR-19, „Chemical Resistance of Thermoplastics Piping Materials,” Plastics Pipe Institute, Irving, 2007.
- [62] S. Ciaraldi, „Stress corrosion cracking of carbon and low-alloy steel,” *Stress corrosion cracking*, ASM International, pp. 41-57, 1992.
- [63] CCGG Projectgroep Inwendige Corrosie, „Inwendige corrosie van stalen en gietijzeren gasnetten door CO₂ en/of O₂ in aardgas,” Nederlandse Gasunie, VEG-Gasinstituut, 1980.
- [64] C. Bowker, „Corrosion of an asbestos cement sewer rising main due to hydrogen sulphide,” *75th Annual water industry engineers and operators' Conference Bendigo Exhibitoin Centre*, pp. 91-97, 2012.
- [65] L. K. Massey, *Permeability properties of plastics and elastomers*, Norwich: Plastics Design Library, 2003.
- [66] S. Schütz, J. König, J. Glandien, W. Wessing en S. Gollanek, „Permeationsuntersuchungen an Kunststoffrohren,” *gwf Gas+Energie*, vol. 9, pp. 58-65, 2017.
- [67] S. C. George en S. Thomas, „Transport phenomena through polymeric systems,” *Progress in polymer science*, vol. 26, pp. 985-1017, 2001.
- [68] E. Suloff, „Permeability, Diffusivity and Solubility of Gas and Solute Through Polymers,” in *Thesis 'Sorption behavior of an aliphatic series of aldehydes in the presence of poly(ethylene terephthalate) blends containing aldehyde scavenging agents*, 2002, pp. 29-99.
- [69] Y. Naito, K. Mizoguchi, K. Terada en Y. Kamiya, „The effect of pressure on gas permeation through semicrystalline polymers above the glass transition temperature,” *Journal of polymer science*, vol. 29, pp. 457-462, 1991.
- [70] J. Humpenoder, „Gas permeation of fibre reinforced plastics,” *Cryogenics*, vol. 38, pp. 143-147, 1998.
- [71] S. Schütz, J. König, J. Glandien, W. Wessing en S. Gollanek, „Permeationsuntersuchungen an Kunststoffrohren,” *gwf Gas+Energie*, 2017.
- [72] F. Scholten en M. Wolters, „Methane permeation through advanced high-pressure plastics and composite pipes,” *Kiwa Gas Technology*, Apeldoorn, 2008.
- [73] „Gross and Net Heating Values for Some Common Gases,” *The Engineering Toolbox*, [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/gross-net-heating-values-d_420.html. [Geopend December 2017].
- [74] A. v. d. Noort, W. Sloterdijk en M. Vos, „Verkenning waterstofinfrastructuur, Ministerie van Economische Zaken,” DNV-GL, Groningen, 2017.



- [75] D. Sadler, A. Cargill, M. Crowther, A. Rennie, J. Watt, S. Burton en M. Haines, „H21 Leeds City Gate,” 2017.
- [76] Composite Agency, „CH4 or H2 diffusion through schedule 40 PVC pipe,” Composite Agency, [Online]. Available: <http://www.composite-agency.com/messages/489.html>. [Geopend januari 2018].
- [77] W. J. Jasionowski, J. B. Pangborn en D. G. Johnson, „Gas distribution equipment in hydrogen service,” *Hydrogen Energy*, vol. 5, pp. 323-336, 1980.
- [78] E. Huijzer, F. Scholten en A. v. Rens, „Inzet waterstof in het huidige gasnet, deel 1, Distributie,” Gastec NV, Apeldoorn, 1998.
- [79] J. M. Ohi en N. Vanderborgh, „Hydrogen Fuel Quality Specifications for Polymer Electrolyte Fuel Cells in Road Vehicles,” U.S. Department of Energy, 2016.
- [80] Papavinasam en W. Revie, „Validation of a predictive model for microbiologically influenced corrosion,” NACE, 2008.
- [81] Institute, *Plastics Pipe, Handbook of PE Pipe*, 2011.
- [82] „Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production - Part 1: Thermoplastics,” *NEN-EN-ISO 23936-1*, p. 42, 2009.
- [83] B. Aristov, I. Y. Badkin, F. K. Borisova, A. V. Kiselev en A. Y. Korolev, „Change in the properties of a polyethylene surface during oxidative treatment,” *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, Division of chemical science*, vol. 12, nr. 6, pp. 927-930, 1963.
- [84] Plastex, „The chemical resistance of P.V.C.,” Plastic Extruders Limited, Wickford, 2003.
- [85] S. Ebnesajjad en W. Woishnis, *Chemical resistance of thermoplastics, volume 1 & 2*, London: Elsevier, 2012.
- [86] J. Jansen, „Plastic Failure Through molecular Degradation,” January 2015. [Online]. Available: <http://read.nxtbook.com/wiley/plasticsengineering/january2015/consultantscorner.html>. [Geopend April 2017].
- [87] J. d. Bruin, „Het effect van limoneen en cymeen op PE en rubber,” *Kenniscentrum Gasnetbeheer Nieuwsbrief 2012-3*.



I Belangrijkste materialen die in het gasdistributienetwerk aanwezig zijn

| Gasdistributie | | | | |
|---|-------------------|----------------|---|--|
| | Aansluitleidingen | Hoofdleidingen | Componenten buiten (bv. koppeling, afsluiter, filter, drukregelaar) | Componenten binnen (bv. koppeling, gasmeter, huisdrukregelaar) |
| PE (PE50, PE80 en PE100) | X | X | X | X |
| Hard PVC | X | X | X | |
| Slagvast PVC | X | X | X | |
| NBR | | | X | X |
| SBR | | | X | X |
| POM | | | X | X |
| Asbest-cement | | X | | |
| Gerelined grijs-gietijzer | | X | | |
| Grijs-gietijzer | | X | X | |
| Nodulair-gietijzer | | X | X | X |
| Koper/koperlegeringen | X | X | | X |
| Koolstof staal (St 37/ 235) | X | X | X | X |
| Roestvast staal (AISI 316 soorten) | | | X | x |
| Aluminiumlegeringen | | | X | X |
| Tin-lood legering | | | | X |
| Hennep/lood-striktouw | | | X | X |
| Lood-striktouw reparatie (Encapress, Polyfill¹) | | | X | |
| Loctite (Methacrylate Ester) | | | X | X |

Tabel I-1. Materialen die in het huidige gasdistributienet worden toegepast

Bronnen:

[41] en [42]

Aanvulling: Stedin, Liander, Rendo, Enduris

¹ Op basis van Acrylonitril.

Bron: <http://www.gastek.nl/werkzaamheden/polyfill/>

(geraadpleegd op 10 januari 2018)



II Samenstelling van waterstof

Als referentie voor de samenstelling van waterstofgas wordt vaak uitgegaan van 'technisch waterstof' als voorbeeld van wat haalbaar is. Daarnaast zijn er normen opgesteld voor de gassamenstelling voor PEMFC brandstofcellen (ISO 14687-2) en geven leveranciers ook hun eigen grenswaarden op. Tabel II-1 geeft een overzicht.

| norm/klasse | Technisch waterstof | | | Waterstof voor brandstofcellen | |
|--|------------------------------|--|--|--------------------------------|--------------------------------|
| | 3.0 | 5.0 | 6.0 | ISO 14687-2 (2012) | eis van brandstofcel producent |
| H ₂ gehalte | ≥99,9 | ≥99,999 | ≥99,9999 | ≥99,997 | |
| N ₂ +Ar (ppm _v) | | ≤3 | ≤0,5 | ≤100 | ≤100 |
| H ₂ O (ppm _v) | ≤30 | ≤5 | ≤0,5 | ≤5 | ≤5 |
| O ₂ (ppm _v) | | ≤2 | ≤0,5 | ≤5 | ≤5 |
| C _x H _y ^a (ppm _v) | | ≤0,5 | ≤0,1 | ≤2 | ≤2 |
| CO ₂ (ppm _v) | | | ≤0,1 | ≤2 | ≤1 |
| CO (ppm _v) | | | ≤0,1 | ≤0,2 | ≤0,1 |
| S ^b (ppb _v) | | | | ≤4 | ≤1 |
| NH ₃ (ppb _v) | | | | ≤0,1 | ≤1 |
| Halogenen (ppm _v) | | | | ≤0,05 | ≤0,05 |
| Formaldehyde (ppm _v) | | | | ≤10 | |
| CH ₄ +N ₂ +Ar (ppm _v) | | | | ≤100 | |
| Deeltjes (mg/kg) | | | | ≤1 | |
| niet-H ₂ (ppm _v) | | | | ≤300 | |
| toepassingen (niet uitputtend) | reducerend gas (metallurgie) | Gaschromatografie, gasdetectie, solderen | productie van halfgeleiders, in kalibratiegassen | PEMFC | PEMFC |
| bron | Linde | Linde | Linde | US Dept. of Energy, 2016 | Ballard Power Systems |

a: uitgezonderd methaan

b: optelling van zwavelhoudende componenten die doorgaans in aardgas voorkomen

Tabel II-1. Vergelijking tussen technisch waterstof en kwaliteitseisen ten behoeve van brandstofcellen



III Invloed van waterstof op het distributienet

Kunststoffen

De belangrijkste kunststoffen, die in het gasdistributienet voorkomen, zijn de drie generaties PE, hard- en slagvast PVC, de rubbers NBR en SBR en de kunststof POM. Het betreft hier niet alleen leidingmaterialen, maar ook rubbers die worden gebruikt voor afdichtingen in verbindingen en afsluiters, alsmede voor onderdelen van drukregelaars en gasmeters.

Kunststoffen kunnen worden aangetast doordat ze chemisch reageren met waterstof of doordat hun fysische eigenschappen veranderen door bijvoorbeeld absorptie of zwellen [12]. De gevoeligheid van het materiaal voor waterstof is afhankelijk van factoren zoals druk, tijdsduur, temperatuur en gassamenstelling. Er zijn veel uiteenlopende proeven gerapporteerd.

Gebaseerd op ISO/TR 7620 "Rubber materials – Chemical resistance" wordt geconcludeerd dat waterstof nauwelijks tot geen invloed heeft op SBR en NBR [17] [18].

Ook de resistentie van MDPE, HDPE en PVC is beoordeeld voor zuiver waterstof gedurende relatief kortdurende testperiodes (± 60 dagen). Hieruit concluderen de rapporteurs, dat de materialen resistent zijn. Er wordt weinig tot geen invloed gevonden op de mechanische eigenschappen van de onderzochte materialen. Ook de massa- en volumemetingen laten geen verandering zien. De materialen in deze bron worden als resistent beoordeeld voor puur waterstof [12].

Daarnaast is de veroudering van PE80 en PE100 onderzocht bij een gasdruk van 100 bar en gasmengsels bestaande uit aardgas en waterstof (tot 100% waterstof) [13]. De conclusie uit dit onderzoek was dat beide PE soorten bestand zijn tegen waterstof.

De invloed van waterstof op het distributienet is in een project op Ameland onderzocht. Gedurende 4 jaar werden hard PVC, PVC/CPE, PVC/A, PE100, POM en de rubberen materialen NBR en SBR blootgesteld aan een gasmengsel tot 20% waterstof, aangevuld met aardgas. Gedurende deze periode zijn geen verschillen in materiaaleigenschappen aangetoond [15].

In een ander onderzoek is POM gedurende 600 dagen bij 8 bar blootgesteld aan 62% waterstof. Na deze periode is er geen significante verandering in fysische en mechanische parameters waargenomen. POM is als resistent tegen waterstof beoordeeld [16].

In een ander project zijn PE100 buizen, na 4 jaar blootstelling aan aardgas, uit een bestaand gasnet gehaald. Vervolgens zijn de buizen in een pilottraject gedurende 10 jaar blootgesteld aan 4 bar waterstof. Bij analyse van de buizen werd geen invloed van waterstof gevonden. Op basis daarvan werd geconcludeerd, dat waterstof de veroudering van PE100 materialen niet beïnvloedt [14] [19].

Metalen

Door waterstof kunnen metalen degraderen en in kwaliteit achteruit gaan. Kritische faalmechanismen die hier in beschouwing worden genomen, zijn verandering in treksterkte, vermoeiing en het optreden van verbrossing. Voor metalen zijn veel verschillende proeven gerapporteerd. Ook deze informatie is gebruikt om een verwachting te kunnen geven.



Staal

Door de jaren heen zijn diverse soorten staal gebruikt in onder andere buizen, fittingen en andere componenten. Toegepaste staalsoorten zijn bijvoorbeeld St 37/235, ASTM A106 gr. B, API 5L gr. B en roestvaststaal AISI 316 L en 316 TI [27] [43]. Het ASTM A106 gr. B is nagenoeg gelijk aan API 5L gr. B en is redelijk gelijk aan API 5L gr. X42 (X70) [44] [45]. Het voornaamste verschil tussen API 5L gr. B en API 5L gr. X42 is dat B een lagere vloeigrens mag hebben (B: 245 MPa en X42: 290 MPa). De minimale vereisten, die gesteld worden aan de maximale verlenging en treksterkte, zijn gelijk. Daarnaast staat API 5L gr. B toe, dat de buis een langснаad heeft. Vanwege de gelijkheid met ASTM A106 gr. B staal is API 5L gr. X42 ook beoordeeld [45]. API 5L gr. X70 (X70) is een vergelijkbare maar modernere staalsoort.

Waterstofverbrossing

De degradatie van de mechanische eigenschappen en de daaraan gekoppelde breukmechanismen kunnen per materiaal en per gassamenstelling verschillen. De invloed van waterstof op deze breukmechanismen is bepalend voor de toepasbaarheid van waterstof in het huidige gasnet. In de literatuur komt de term waterstofverbrossing als breukmechanisme veelvuldig voor. De gevoeligheid voor waterstofverbrossing is niet eenduidig. Enkele bronnen stellen dat met name hoge sterkte stalen gevoelig zijn voor deze vorm van verbrossing [27] [46] [47], terwijl een andere bron stelt dat de sterkte van de staalsoort nauwelijks van invloed is [48].

Bij waterstofverbrossing wordt aan het metaaloppervlak moleculair waterstof omgezet in atomair waterstof. Het atomaire waterstof lost op in het metaal en diffundeert door het metaal. Bij defecten in het metaal kan atomair waterstof weer samenkomen en moleculair waterstof vormen. Moleculair waterstof is nauwelijks in staat om door het metaal te diffunderen en is dus opgesloten. Indien dit proces doorgaat, zal de druk bij deze defecten toenemen. Dit zorgt voor een ongelijkmatige spanningsverdeling in het materiaal en leidt uiteindelijk tot verbrossing van het metaal [47] [49].

Waterstof heeft een hoge dissociatie-energie (104 kcal/mol). Er is dus veel energie nodig om atomair waterstof te vormen. Daarom treedt dit proces alleen bij hoge temperaturen of bij elektrische ontlading op [50]. Waterstofverbrossing kan optreden tijdens het productieproces van metalen onderdelen, omdat hierbij hoge temperaturen worden gebruikt om het metaal te bewerken. In het distributienet zijn de temperaturen zo laag en zijn elektrische ontladingen zo beperkt, dat er geen waterstofverbrossing te verwachten is.

Atomair waterstof kan ook via elektrochemische processen worden gevormd [51]. Voor een elektrochemisch proces zijn specifieke omstandigheden vereist. Zo moet er onder andere een kathode, anode en elektrolyt aanwezig zijn. Als één van deze elementen ontbreekt kan het proces niet verlopen. In de leiding zijn kathode en anode altijd aanwezig. Vloeibaar water is doorgaans het elektrolyt. Als water ontbreekt, zal er geen elektrochemische reactie optreden en dus geen atomair waterstof gevormd worden. Daarom is het belangrijk om alleen droog gas te transporteren. Daarnaast is uit meerdere onderzoeken al naar voren gekomen, dat de aanwezigheid van water ook ongewenst is, omdat dit tot corrosie van de metalen leidt [27] [31].

In het Europese project NATURALHY zijn verschillende metalen onderzocht met betrekking tot de toepasbaarheid van het gasnet voor het transport van waterstof. Hierbij zijn verschillende soorten staal (X70 en X50, inclusief lassen) onder verschillende omstandigheden (druk, wisselende mechanische spanningen [vermoeiing]) onderzocht. Gedurende deze experimenten is geen waterstofverbrossing waargenomen. De experimenten zijn zodanig uitgevoerd, dat deze overeenkomen met een gebruiksduur in de praktijk van 40 jaar.

De compressoren in het landelijke transportnet worden aangedreven door gasturbines. Deze gasturbines worden gevoed met gas uit het gasnet. Wanneer de



gassamenstelling in het net verandert, verandert ook de brandstofkwaliteit voor de gasturbines. De temperatuur in de turbine kan oplopen tot maximaal 1.200°C en de temperatuur van de uitlaatgassen is 450-500 °C [52]. Dit zijn voldoende hoge temperaturen om eventueel aanwezig waterstof te dissociëren en waterstofverbranding in het verbrandingsgaszijdige deel van de compressor te veroorzaken. De kans op waterstofverbranding blijkt per staalsoort nog afhankelijk te zijn van de temperatuur, de druk en het materiaal en zal per situatie moeten worden beoordeeld [51].

Mechanische eigenschappen

De invloed van waterstof op de mechanische eigenschappen van verschillende soorten staal is onderzocht. Hierbij zijn de resultaten van een trekproef in een omgeving van waterstof bij 69 bar op kamertemperatuur vergeleken met resultaten onder standaard condities (lucht, 1 bar gasdruk en kamertemperatuur) [53]. Bij de ongekerfde A106 gr. B, X42 en X70 stalen is nauwelijks een verschil waargenomen in de treksterkte. Wel is de rek bij breuk voor A106 gr. B staal 21% kleiner. Bij gekerfde A106 gr. B en X70 stalen zijn nauwelijks verschillen in treksterkte waargenomen. Voor zowel de gekerfde als ongekerfde materialen neemt de flexibiliteit van de materialen als gevolg van de blootstelling aan waterstof af [53] [54].

| Staalsoort | Mechanische eigenschap | Lucht | 69 bar H ₂ | Vershil [%] |
|-------------------|------------------------------|-------|-----------------------|-------------|
| A106 gr. B | Bovenste vloeispanning [MPa] | 462 | 503 | 8,9 |
| | Treksterkte [MPa] | 559 | 576 | 3,0 |
| | Rek bij breuk [%] | 14 | 11 | -21,4 |
| X42 | Bovenste vloeispanning [MPa] | 366 | 331 | -9,6 |
| | Treksterkte [MPa] | 511 | 483 | -5,5 |
| | Rek bij breuk [%] | 21 | 20 | -4,8 |
| X70 | Bovenste vloeispanning [MPa] | 584 | 548 | -6,2 |
| | Treksterkte [MPa] | 669 | 659 | -1,5 |
| | Rek bij breuk [%] | 20 | 20 | 0,0 |

Tabel III-1. De invloed van 69 bar waterstof op de trekeigenschappen van A106 gr.B, X42 en X70 staal. [53]

Breuktaaiheid

Breuktaaiheid is de resistentie tegen breukgroei [53] [55]. De gassamenstelling, de aangebrachte spanning en de gasdruk zijn bepalend voor de breuktaaiheid. In vergelijking met puur methaan neemt de breuktaaiheid voor X70 staal bij 69 bar bij zowel waterstof als een mengsel van waterstof en methaan (60/40%) met ongeveer 50% af tot een waarde van 95 MPa m^{1/2}. Deze waarde wordt door de onderzoekers nog steeds als hoog beoordeeld [53]. Het materiaal wordt dan ook nog steeds geschikt geacht. Deze resultaten komen overeen met de resultaten uit NATURALHY, waarbij bij een waterstofdruk van 69 bar een afname van 30-50% is waargenomen ten opzichte van aardgas [13]. De breuktaaiheid van X42 staal neemt door invloed van 20 bar waterstof met 13-30% af [53].

Vermoeiing

Vermoeiing is het ontstaan en doorscheuren van een breuk onder invloed van een cyclische belasting. Over het algemeen versnelt waterstof de scheurgroei van het metaal. Dit is mede afhankelijk van de gassamenstelling, waarbij bijvoorbeeld zuurstof en koolmonoxide de verhoging van de scheursnelheid tegengaan [53]. Er is geen toename van vermoeiing geobserveerd bij een gasmengsel van 75/25 (aardgas/H₂) voor X70 staal en 50/50 (aardgas/H₂) voor X52 staal. Indien het waterstofgehalte wordt verhoogd, neemt de scheurgroeisnelheid toe. Dit effect kan worden tegengegaan door de toevoeging van een kleine hoeveelheid zuurstof. Na toevoeging van 250-500 ppm zuurstof aan zuiver waterstof is de vermoeiing van het



metaal even groot als bij het gebruik van aardgas [13]. Vermoeiing is niet waargenomen bij de analyse van de las van een X70 stalen buis [13] [19].

De maximale spanningsintensiteit is berekend voor een 8 bar gasnet (7 MPa m^{1/2}). Hierbij is tevens rekening gehouden met periodieke schommelingen in de gasdruk en de invloed van zwaar verkeer. Daaruit wordt geconcludeerd, dat de scheurgroeisnelheid van X42 staal in een waterstofomgeving volgens BS7910 acceptabel is [27] [56] [57] (scheurgroeisnelheid 0,01 µm/cyclus) . Op basis van dezelfde berekening is ook de scheurgroeisnelheid van X70 en X52 staal acceptabel, ongeacht de waterstofconcentratie [13] [49].

Gietijzer

Er is weinig literatuur betreffende de interactie van waterstof met gietijzer. Vermoedelijk gedraagt het materiaal zich ongeveer als koolstofstaal. Wel is er een onderzoek bekend waarbij de invloed van waterstof op gietijzer zeer snel wordt gesimuleerd. Het metaal wordt gedurende 24 uur met geladen waterstof in contact gebracht, waardoor waterstof versneld aan het metaal oppervlak absorbeert. Dit proces komt in de praktijk niet voor. De conclusie is dan ook, dat de treksterkte van gietijzer nauwelijks verandert door de blootstelling aan waterstof. De verlenging neemt wel af, het materiaal wordt brosser [58].

Veel leveranciers van reparatie- en vervangingstechnieken voor gietijzeren buizen garanderen de chemische resistentie van hun product tegen waterstof [59].

Koper en aluminium

Koper wordt vooral toegepast in aansluitleidingen, terwijl aluminium in huisdrukregelaars en gasmeters wordt toegepast. Deze materialen worden dus op relatief lage druk gebruikt. Gedurende een pilotproject zijn de materialen gedurende 4 jaar aan een waterstof/methaan mengsel blootgesteld met maximaal 20 vol% waterstof. Na deze periode functioneerden de huisdrukregelaars en gasmeters nog volgens de norm en ook visueel is er geen aantasting waargenomen. In de koperen leidingen en messing koppelingen zijn geen lekkages waargenomen ten gevolge van waterstof [15].



IV Samenstellingen van duurzame gassen in het toekomstbestendige gasnet

Deze bijlage omvat onderstaand door Liander ingebrachte document (integraal overgenomen).

Datum: 15 november 2017
Versie: 0.91



Op basis van de thans beschikbare kennis heeft Liander, in samenwerking met Kiwa, onderstaand overzicht van gassamenstellingen van duurzame gassen opgesteld. Hiermee wordt een beeld gegeven van de gassamenstellingen, die in de toekomst door onze gasnetten kunnen stromen. Voor met name biogas en syngas zijn meerdere varianten aan gaskwaliteit mogelijk. Het is minder waarschijnlijk dat de ruwe productie-kwaliteit (direct uit vergister/vergasser) over gasnetten getransporteerd gaat worden, daarom is voor biogas en syngas ook een meer transportabele kwaliteit (opgeschoond) benoemd.

De volgende duurzame gassen zijn benoemd:

- Aardgas/groengas;
- LNG: hoewel niet duurzaam is voor de volledigheid opgenomen;
- Biogas (uit vergisting);
- Ruw biogas (direct uit de vergister);
- Geschoond biogas (transportkwaliteit);
- Syngas (uit vergassing);
- Ruw syngas (direct uit de vergasser);
- Methaniseringsgas (eerste opschoning en methanisering);
- Waterstof.

In onderstaande tabel zijn de gassamenstellingen weergegeven van deze duurzame gassen:



| Component | Unit | Aardgas / groengas | LNG | Ruw biogas (vergisting) | Geschoond biogas (vergisting) | Ruw syngas (vergassing) | Methaniseringsgas | Waterstof Standard Industrial gas |
|--|-----------------------|--------------------|---------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Waterdauwpunt | °C @ barg | -10 C ° @ 8 barg | | (nat) | -3 °C @ barg | 6% water | ? | -50 °C |
| Teerdauwpunt | °C @ barg | | | | | < 15 | | |
| Temperatuur | °C | 5 – 20 | | 0 – 50 | 40 | | | |
| Methaan (CH ₄) | mol % | 70 – 100 | 81 – 98 | 40 – 68 | 40 – 68 | 15 – 30 | 20-55 | 0,001 |
| Stikstof (N ₂) | mol % | 14,32 | < 1 | 0 – 17 | 0 – 17 | 0 – 5 | 1-5 | 0,04 |
| Zwavel (total) | mg/m ³ (n) | 16,5 | | | 250 | | | |
| Anorganisch gebonden zwavel (H ₂ S) | mg/m ³ (n) | 0 – 5 (3 ppm) | | 10 - 4300 (2900 ppm) | 240 (160ppm) | 100-3000 | | |
| Mercaptanen | mg/m ³ (n) | | | < 20 ppm | | 100 | | |
| Odorant (THT) | mg/m ³ (n) | 10 – 40 (nom. 18) | | | | | | |
| Chloorhoudende componenten (uitgezonderd HCl) | mg/m ³ (n) | < 5 | | 0 – 735 | 0 – 735 | Sporen | | |
| Fluorhoudende componenten | mg/m ³ (n) | < 5 | | 0 – 256 | 0 – 256 | Sporen | | |
| Ammoniak (NH ₃) | ppm | < 0,1 | | 0 – 100 | 100 | 4000 | 0-500 | |
| Waterstof chloride (HCl) | ppm | < 1,0 | | sporen | sporen | 400 | | |
| Waterstof cyanide (HCN) | ppm | < 1,0 | | sporen | sporen | 3000 | | |
| Koolstof monoxide (CO) | ppm | < 100 | | | | 100.000-500.000 | 0-20.000 | 10 |
| Koolstof dioxide (CO ₂) | ppm | 8900 | | 240.000 – 520.000 | 240.000 – 520.000 | 100.000 – 3000.000 | 100.000-350.000 | 10 |
| Aromatische koolwaterstoffen | ppm | 500 | | sporen | sporen | | | |
| Benzeen | ppm | | | 0 – 36 | 0 – 11,4 | 10.000 – 40.000 | | |
| Tolueen | ppm | | | 0 – 290 | 0 – 76,2 | 1000 – 10.000 | | |
| Zuurstof (O ₂) | ppm | < 100 | | 0 – 26000 | 1 mol % | 0 | | 10 |
| Waterstof (H ₂) | vol % | < 0,5 | | 0 – 190 mg/m ³ | 0,2 | 7 – 30 | 20-50 | > 99,95 % |
| Ethaan (C ₂ H ₆) | mol % | 0,06 – 15 | 2 – 14 | | Sporen | 0 – 4 | | |
| C ₂ H ₄ (behalve C ₂ H ₆) | mol % | | | sporen | Sporen | 1 – 25 | | |
| C ₃ H ₄ | mol % | 0 – 10 | 0 – 4 | sporen | Sporen | 0 – 10 | | |
| C ₄ H ₄ | mol % | 0 – 3,5 | 0 – 2 | sporen | Sporen | 0 – 4 | | |
| C ₅ H ₄ | mol % | 0 – 0,6 | | sporen | Sporen | 0 – 0,3 | | |
| C _x H _y | mol % | sporen | | Sporen | Sporen | sporen | | |
| Fosfine | mg/m ³ (n) | | | < 0,7 | < 0,7 | | | |
| Silicium houdende componenten | mg/m ³ (n) | < 0,1 | | < 20 | < 20 | | | |
| Metalen (koper, kwik) | ppm | Sporen | Sporen | Sporen | Sporen | Sporen | | |
| Teer | mg/m ³ (n) | | | | | 200 | | |
| Naphtaleen | mg/m ³ (n) | | | | | 2,5 | | |



V Invloed van biomethaan op het distributienet

Kunststoffen

De materiaaleigenschappen van kunststoffen kunnen via een aantal mechanismen worden beïnvloed door een gascomponent.

Allereerst kan de component het polymeer chemisch aantasten. Dit leidt tot chemische degradatie. Hiervoor is het wel vereist, dat de component onder de heersende omstandigheden in staat is om met het polymeer te reageren.

Daarnaast kan een component door de kunststof worden geabsorbeerd. Hierdoor zwelt het materiaal. De mate van zwellings is sterk afhankelijk van de affiniteit tussen de kunststof en de gascomponent. Indien het volume van de kunststof na blootstelling aan de component niet méér dan 3% verandert, is te stellen dat het materiaal resistent is tegen de betreffende gascomponent [12].

De gascomponent kan bepaalde stoffen, bijvoorbeeld additieven of polymeer, aan het polymeer onttrekken. Hierdoor neemt de massa van de kunststof af. Indien de massa niet méér dan 0,5% afneemt, wordt het materiaal als resistent beoordeeld [12].

De hierboven genoemde processen zijn in beschouwing genomen voor het beoordelen van de resistentie van de kunststoffen tegen de gascomponenten.

Polyetheen (PE)

Er wordt geen aantasting van PE verwacht door de componenten, die in biomethaan aanwezig zijn. Dit is deels gebaseerd op experimenten, waarbij de invloed van specifieke gehalten van gascomponenten is onderzocht. Het kan niet worden uitgesloten, dat het PE boven deze gehalten nog steeds resistent is. Dit wordt hieronder nader toegelicht.

In het kader van het EDGaR-project is onder meer de chemische resistentie van HDPE 50, MDPE 80 en HDPE 100 op een aantal biogascomponenten onderzocht. Gedurende deze proeven zijn de materialen 600 dagen aan verschillende gasmengsels blootgesteld bij een constante trekspanning van 20 MPa. Na deze periode zijn de mechanische eigenschappen van de materialen beoordeeld met behulp van een trekproef. Tevens zijn veranderingen in fysische parameters (zoals massa en volume) geanalyseerd. Op basis van deze experimenten kan worden gesteld, dat PE resistent is tegen [33]:

- Waterstof sulfide (H₂S) tot 160 ppm;
- Dichloormethaan (DCM) tot 1.000 mg/m³; in het EDGaR-onderzoek gebruikt als referentie voor chloorhoudende en fluorhoudende componenten;
- Ammoniak (NH₃) tot 100 ppm.

Gedurende de experimenten zijn hogere concentraties van de componenten niet onderzocht [28]. Mogelijk is bijvoorbeeld het gehalte aan ammoniak in gemethaniseerd syngas gelijk aan 500 ppm.

Siliconen (een vorm van siliciumhoudende componenten) hebben een negatieve invloed op de lasbaarheid van PE. In biomethaan kunnen organische siliconen voorkomen. Daarom is in het kader van het EDGaR-project de lasbaarheid van PE onderzocht, nadat een PE buis gedurende 90 dagen in contact was geweest met organische siliconen. Na deze periode zijn stuiklas- en elektrolasverbindingen gemaakt. De stuiklassen zijn gemaakt volgens NEN 7200 "Kunststofleidingen voor het transport van gas, drinkwater en afvalwater" [60]. De elektrolassen zijn gemaakt volgens de instructies van de fabrikant. Vervolgens werden de stuiklassen getest volgens NEN 7200 en de elektrolassen volgens ISO 13953. De onderzochte verbindingen voldeden aan alle criteria. PE buizen zijn dan ook lasbaar na contact met organische siliconen.



Voor EDGaR zijn tevens literatuurstudies uitgevoerd. Op basis van de resultaten van deze studies is beoordeeld, dat PE resistent is voor zuurstof (O₂) en koolstof dioxide (CO₂). Uit deze studies volgt tevens, dat PE gevoelig is voor hogere koolwaterstoffen (benzeen, toluen, e.d.). Dit is met name het geval voor vloeibare koolwaterstoffen (gascondensaat). De aanwezigheid van vloeibare koolwaterstoffen moet daarom worden voorkomen [27]. Onbekend is of, en zo ja in welke mate, dit voorkomt in gemethaniseerd syngas.

Voor een literatuurstudie ten behoeve van GERG is de resistentie van PE beoordeeld voor koolmonoxide (CO), waterstof cyanide (HCN), waterstof sulfide (H₂S), ammoniak (NH₃), chloorhoudende en fluorhoudende componenten. Relatief kortdurende resistentieproeven onder standaarddruk volgens (ISO/TR 10358 [18] en PPI TR-19 [61]) geven aan, dat PE resistent is tegen CO, HCN, H₂S en NH₃ tot een temperatuur van 60 °C. De resistentie tegen chloor- en fluorhoudende componenten is echter niet eenduidig. De kans op aantasting door deze gascomponenten wordt als laag ingeschat [31].

Op basis van testen volgens ISO/TR 10358 [18], PPI TR-19 [61] is PE resistent tegen waterstof chloride, fosfine en zwavel [12], al zijn er geen langdurige experimenten uitgevoerd om dit te bevestigen. Wel zijn de experimenten uitgevoerd bij zeer hoge concentraties (vaak tot 100%) en hoge temperaturen (60 °C). Vanwege het relatief lage gehalte aan componenten in het biomethaan wordt daarom aangenomen, dat PE ook op de lange duur resistent is tegen deze componenten.

Polyvinylchloride (PVC)

Er wordt geen aantasting van PVC verwacht door de gascomponenten, die aanwezig zijn in biomethaan. Dit is gebaseerd op experimenten, waarbij de invloed van specifieke gehalten van gascomponenten is onderzocht. Het kan niet worden uitgesloten, dat boven deze gehalten het PVC alsnog resistent is.

Dit wordt hieronder verder toegelicht.

In het kader van het EDGaR-project is de resistentie van hard PVC en slagvast PVC (PVC-CPE en PVC-A) beoordeeld. Hierbij werden de monsters gedurende 600 dagen blootgesteld aan diverse biomethaan componenten, waarbij de materialen een constante trekspanning van 20 MPa ondervonden. Op basis van fysische en mechanische metingen is de degradatie van de materialen beoordeeld. Op basis van deze experimenten is vastgesteld, dat PVC resistent is tegen [33]:

- Koolstof dioxide (CO₂) tot 59 mol%;
- Waterstof sulfide (H₂S) tot 160 ppm;
- Dichloormethaan (DCM) tot 1.000 mg/m³; in het EDGaR-onderzoek gebruikt als referentie voor chloorhoudende en fluorhoudende componenten;
- Ammoniak (NH₃) tot 100 ppm.

Gedurende de experimenten zijn hogere concentraties van de componenten niet onderzocht. Mogelijk is bijvoorbeeld het gehalte aan ammoniak in gemethaniseerd syngas hoger dan 100 ppm [28].

Uit de literatuurstudies, die in het kader van het EDGaR-onderzoek zijn uitgevoerd, is op basis van diverse bronnen vastgesteld, dat PVC resistent is tegen koolwaterstoffen, mits deze niet gedurende lange periodes in vloeibare vorm (gascondensaat) aanwezig zijn [27].

Op basis van testen conform ISO/TR 10358 [18], PPI TR-19 [61] is PVC als resistent tegen ammoniak, koolmonoxide, waterstof chloride, waterstof cyanide, fosfine, zuurstof en zwavel tot een temperatuur van 60 °C beoordeeld [12]. Het betreft hier relatief kortdurende experimenten bij standaarddruk. De experimenten zijn uitgevoerd bij zeer hoge concentraties (vaak tot 100%) en hoge temperaturen (60 °C). Vanwege het relatief lage gehalte van genoemde componenten in biomethaan wordt daarom aangenomen, dat PVC ook op lange termijn resistent is tegen deze componenten.



Nitril Butadieen Rubber (NBR)

NBR is mogelijk niet goed bestand tegen zuren en oxiderende stoffen. Hierdoor is het materiaal mogelijk gevoelig voor waterstof chloride en waterstof cyanide. De mate van degradatie is in dat geval wel afhankelijk van de concentratie. De invloed van fosfine is onbekend. NBR is, met beperkingen, resistent voor ammoniak, koolwaterstoffen, chloor- en fluorhoudende componenten, waterstof sulfide, zuurstof en elementair zwavel. Dit wordt hieronder verder toegelicht.

In het kader van het EDGaR-project is de resistentie van NBR voor diverse gascomponenten beoordeeld. Hierbij werd het rubber voor 600 dagen aan de verschillende gassen blootgesteld. Op basis van de fysische en mechanische eigenschappen is beoordeeld, dat NBR resistent is tegen:

- Propeen (C₃H₆) tot 2 vol-%; in het EDGaR-onderzoek gebruikt als referentie voor koolwaterstoffen;
- Koolstof dioxide (CO₂) tot 59 %;
- Waterstof sulfide (H₂S) tot 160 ppm;
- Dichloormethaan (DCM) tot 1.000 mg/m³; in het EDGaR-onderzoek gebruikt als referentie voor chloorhoudende en fluorhoudende componenten;
- Ammoniak (NH₃) tot 100 ppm.

Gedurende de experimenten zijn hogere concentraties van de componenten niet onderzocht. Mogelijk is het gehalte aan ammoniak en propeen in gemethaniseerd syngas hoger dan de onderzochte concentraties [28]. Het effect van deze hogere concentraties op NBR is onbekend.

Uit de literatuurstudies van EDGaR is naar voren gekomen, dat NBR niet resistent is voor vloeibare koolwaterstoffen (gascondensaat). NBR is wel resistent tegen koolmonoxide.

Indien er voldoende antioxidanten (een beschermstof tegen degradatie door zuurstof) aanwezig zijn, is het materiaal ook resistent tegen zuurstof [27].

Op basis van testen uitgevoerd conform ISO/TR 7620 "Rubber Materials - Chemical Resistance" [17] blijkt, dat NBR resistent is tegen ammoniak, koolstof dioxide, koolmonoxide, water en zuurstof [12]. De experimenten zijn bij hoge concentraties (tot 100%) en bij hoge temperatuur (60 °C) gedurende relatief korte perioden uitgevoerd. Omdat deze componenten in het gasnet in lage gehalten en bij lage temperatuur aanwezig zijn, wordt aangenomen dat NBR resistent is tegen deze componenten.

Op basis van hetzelfde onderzoek [12] is vastgesteld, dat NBR slecht bestand is tegen een combinatie van hoge concentraties zuren, zoals waterstof sulfide, en de aanwezigheid van water. Het volume van het rubber verandert voor meer dan 60% en de hardheid verandert met meer dan 30 IRHD. De experimenten zijn bij hoge concentraties (tot verzadiging) in waterige oplossingen en voor korte duur onder standaarddruk uitgevoerd. Dit zijn omstandigheden, die normaliter niet in het gasnet zullen voorkomen. Het is bij het gebruik van biomethaan echter niet uit te sluiten, dat een dergelijke combinatie incidenteel wel voor kan komen. In dat geval zal het NBR dan ook kunnen degraderen en zijn functie (deels) kunnen verliezen.

Polyoxymethyleen (POM)

POM is niet goed bestand tegen waterstof chloride (3 ppm) bij hoge relatieve vochtigheid (82%) [16]. Daarnaast is het materiaal mogelijk gevoelig voor waterstof cyanide. De effecten van de concentraties, die aanwezig zijn in biomethaan zijn onbekend. Wel is vastgesteld, dat bij hogere concentraties degradatie optreedt. De invloed van koolmonoxide en fosfine is onbekend. Voor de overige componenten, die aanwezig kunnen zijn in biomethaan is het materiaal, met beperkingen, resistent voor ammoniak, koolwaterstoffen, chloor- en fluorhoudende koolwaterstoffen, kooldioxide, waterstof sulfide en elementair zwavel. Dit wordt hieronder verder toegelicht.



In het kader van het EDGaR-project is POM (homopolymeer) aan diverse biogas componenten blootgesteld om de resistentie van het materiaal te beoordelen. Gedurende 600 dagen zijn de monsters aan verschillende gasmengsels blootgesteld. Op basis van fysische en mechanische eigenschappen is vastgesteld dat POM resistent is tegen [16]:

- Koolstof dioxide (CO_2) tot 59 mol%;
- Waterstof sulfide (H_2S) tot 160 ppm;
- Dichloormethaan (DCM) tot 1.000 mg/m^3 ; in het EDGaR-onderzoek gebruikt als referentie voor chloorhoudende en fluorhoudende componenten;
- Ammoniak (NH_3) tot 100 ppm.

Gedurende de experimenten zijn hogere concentraties van de componenten niet onderzocht. Mogelijk is bijvoorbeeld het gehalte aan ammoniak in gemethaniseerd syngas hoger dan 100 ppm [28]. De invloed van dit gehalte hoger dan 100 ppm NH_3 zal apart beoordeeld moeten worden.

POM is niet bestand tegen 3 ppm waterstof chloride (zoutzuur) bij een relatieve vochtigheid van 82%. Dit resulteerde in een verlaging van de treksterkte. Ook werd er lokale aantasting in de vorm van putjes waargenomen [16].

Uit de EDGaR-literatuurstudie volgt, dat POM zeer resistent is tegen koolwaterstoffen (zowel alifatische, als aromatische). POM is echter niet resistent tegen sterke basen, zuren en oxiderende stoffen, zoals bijvoorbeeld waterstof chloride, waterstof cyanide en waterstof sulfide [41] hetgeen in overeenstemming is met de eerder gemelde gevoeligheid voor zoutzuur.

Metalen

Externe corrosie is na graafschade het meest voorkomende faalmechanisme voor metalen leidingen. Interne corrosie wordt sterk beïnvloed door de gassamenstelling. De aanwezigheid van water is een randvoorwaarde voor corrosie. Corrosie kan al plaatsvinden bij een relatieve luchtvochtigheid van 60-70%. Daarom wordt op basis van EDGaR-onderzoek aanbevolen om de relatieve vochtigheid onder 70% te houden. Daarnaast kan water ook via de leiding zelf in het gasnet treden, bijvoorbeeld door lekkage, inwatering of permeatie [27].

Anders dan voor kunststoffen is de gassamenstelling zeer bepalend voor de resistentie van het metaal tegen corrosie. Uit de vakliteratuur is bekend, dat staal in combinatie met koolstof dioxide een beschermend laagje ijzercarbonaat (FeCO_3) vormt. Deze carbonaatlaag functioneert als een barrière, waardoor de corrosiesnelheid afneemt. Waterstof sulfide gaat de vorming van deze bescherm laag tegen, waardoor de corrosiesnelheid toeneemt. Zo kan het dus zijn dat de resistentie van een metaalsoort tegen CO_2 voldoende is, maar tegen CO_2 met een klein beetje H_2S onvoldoende. Met dit inzicht is binnen het EDGaR-onderzoek de corrosiesnelheid van verschillende metalen (staal, koper en aluminium) bij verschillende gasmengsels (CO_2 , O_2 en H_2S) onderzocht [27].

Staal

Waterstof chloride en elementair zwavel zijn in combinatie met water mogelijk schadelijk voor staal, omdat ze putcorrosie kunnen veroorzaken. Een gasmengsel van koolstof dioxide, zuurstof en waterstof sulfide is bij bepaalde gehalten erg corrosief (corrosiesnelheid tot 1,13 mm/jaar bij aanwezigheid van vloeibaar water). Een gasmengsel van koolstof dioxide, koolmonoxide en zuurstof kan corrosief zijn voor staal. Dit is echter niet experimenteel onderbouwd. Waarschijnlijk hebben ammoniak, chloor- en fluorhoudende componenten en waterstof cyanide, mede vanwege het lage gehalte van deze stoffen in biomethaan, weinig invloed op de corrosiesnelheid van het staal. Voor de koolwaterstoffen wordt verwacht dat deze nauwelijks invloed hebben op de degradatie van staal. Dit wordt hieronder verder uitgewerkt.



Er zijn veel uiteenlopende staalsoorten, waarbij de materiaalsamenstelling, de buis productie, de leeftijd, enz. invloed hebben op de materiaaleigenschappen. Voor de inzichtelijkheid wordt in deze beschouwing een selectie gemaakt van stalen, die veel in het distributienet worden toegepast. Deze selectie bestaat uit; ST 37/235, ASTM A106 gr. B, API 5L gr. B en - zij het in mindere mate - roestvast staal. Roestvast staal wordt binnen de gasdistributie uitsluitend toegepast voor meetleidingen met een kleine diameter in gasstations en als flexibele gasmeter aansluiting. Hiervoor wordt doorgaans RVS van het type 316 L of 316 Ti toegepast.

Koolstof dioxide, zuurstof en waterstof sulfide

In het EDGaR-onderzoek is van staal (St 37/235) bij verschillende koolstof dioxide, zuurstof en waterstof sulfide gasmengsels en onder verschillende omstandigheden de corrosiesnelheid bepaald. Bij alle experimenten werd het staalmonster deels in vloeibaar water en deels in de dampfase gehouden. Hierdoor kon de invloed van vloeibaar water in de beschouwing worden genomen. Opgemerkt dient te worden, dat de relatieve luchtvochtigheid van de gasfase dus 100% bedroeg. Uit de experimenten kwam het volgende naar voren [33].

In aanwezigheid van vloeibaar water treedt er een relatief grote mate van corrosie op, onder de volgende omstandigheden:

- Een koolstof dioxide/zuurstof gasmengsel van respectievelijk 50 mol% CO₂ en 3 mol% O₂ resulteerde bij een druk van 30 mbar in een corrosiesnelheid van 1,13 mm/jaar;
- Een zuurstof/waterstof sulfide gasmengsel van respectievelijk 0,5 mol% O₂ en 34 ppm H₂S resulteerde bij een druk van 30 mbar in een corrosiesnelheid van 0,13 mm/jaar;
- Een koolstof dioxide/zuurstof/waterstof sulfide gasmengsel van respectievelijk 10 mol% CO₂, 0,1 mol% O₂ en 34 ppm H₂S resulteerde bij een druk van 30 mbar in een corrosiesnelheid van 0,32 mm/jaar;

In de gasfase treedt een relatief grote mate van corrosie op onder de volgende omstandigheden:

- Een koolstof dioxide/zuurstof/waterstof sulfide gasmengsel van respectievelijk 50 mol% CO₂, 0,01 mol% O₂ en 160 ppm H₂S bij een druk van 8 bar resulteerde in een corrosiesnelheid van 0,18 mm/jaar.

In de gasfase treedt voor staal een acceptabele waarde van de corrosiesnelheid op onder de volgende omstandigheden:

- Een koolstof dioxide/zuurstof/waterstof sulfide gasmengsel tot 50 mol% CO₂ en tot 160 ppm H₂S met minder dan 30 ppm O₂ of met 3 mol% O₂. De corrosiesnelheid heeft een niet-lineaire correlatie met het gehalte aan zuurstof. Er ligt een maximum tussen de 30 ppm en 100 ppm O₂. De exacte ligging en invloed van dit optimum is niet experimenteel vastgelegd. Bij een druk van 30 mbar resulteerde dat in een corrosiesnelheid van minder dan 0,07 mm/jaar.

De experimenten zijn uitgevoerd bij een temperatuur van 25°C. De temperatuur is in de praktijk lager dan de testtemperatuur. Hierdoor ligt de corrosiesnelheid in de praktijk ook lager. Daarnaast zijn enkele experimenten bij een relatief lage druk uitgevoerd. Bij toenemende druk neemt de partiële druk (de druk van één gascomponent ten opzichte van de absolute totale gasdruk) van de gascomponenten toe, waardoor de corrosiesnelheid weer wat hoger wordt.

Koolstof dioxide, zuurstof en koolmonoxide

Koolmonoxide en koolstof dioxide kunnen in aanwezigheid van water resulteren in spanningscorrosie. De invloed van zuurstof op dit proces is nog onduidelijk. Zo wordt door de ene bron [62] gemeld dat zuurstof de corrosie vertraagt, terwijl een andere bron [63] meldt dat zuurstof de corrosie versnelt. Vanwege deze onzekerheid kan spanningscorrosie niet worden uitgesloten [27].



Andere gascomponenten

Koolstofstaal wordt veel gebruikt voor het transport van ammoniak bij zeer hoge concentraties. Het is bekend, dat ammoniak in combinatie met zuurstof kan resulteren in spanningscorrosie, waarbij koolstof dioxide het proces kan beïnvloeden. Vanwege het lage gehalte aan zuurstof en ammoniak wordt een beperkte invloed van deze gascomponenten op de corrosiesnelheid verwacht. Dit is echter niet experimenteel onderbouwd [33].

Waterstof sulfide vormt met water een corrosief medium. Hierbij kan het waterstofverbrossing en spanningscorrosie veroorzaken. Indien de partiële gasdruk beneden de 3 mbar blijft (333 ppm bij 8 bar) en de pH boven 3,5 blijft, dan wordt er nauwelijks aantasting van staal waargenomen. Tevens wordt er door oxidatie een passieve FeS-laag gevormd. Hierdoor neemt de corrosiesnelheid af. Waterstof cyanide echter, beïnvloedt de passieve oxidelaag van FeS. Hierdoor neemt de corrosiesnelheid toe bij toenemende H₂S concentratie [31]. Vanwege het lage gehalte aan H₂S wordt er nauwelijks invloed van deze componenten op de totale corrosiesnelheid verwacht. Waterstof cyanide kan in aanwezigheid van water resulteren in spanningscorrosie. Het is onbekend wat de invloed van het in biomethaan aanwezige gehalte aan HCN is op de corrosiesnelheid van het staal [31].

Chloor-ionen en/of fluor-ionen kunnen de corrosie van staal sterk beïnvloeden. Dit resulteert doorgaans in putcorrosie. Deze elementen hebben geen invloed op de corrosie, indien chloor of fluor sterk is gebonden aan de koolwaterstoffen. Als de chloor- en fluorhoudende componenten in aanwezigheid van water niet uiteenvallen in chloor- en fluor-ionen, worden geen nadelige effecten verwacht. Waterstof chloride is wel in staat om chloor-ionen af te scheiden en is daardoor in combinatie met water wel schadelijk [27].

Staal wordt in de praktijk zonder problemen veelvuldig toegepast bij het gebruik van koolwaterstoffen. Daarom wordt er voor koolwaterstoffen geen invloed verwacht op staal [27].

Elementair zwavel is een sterke oxidator. In aanwezigheid van vloeibaar water kan het voor zeer lokale corrosie zorgen (putcorrosie) [31]. De invloed van elementair zwavel is niet experimenteel vastgesteld.

Gietijzer

Binnen het EDGaR-project is geen onderzoek uitgevoerd aan grijs of nodulair gietijzeren buizen. Er wordt verwacht dat deze op een gelijke manier als staal corroderen [33].

Koper en koperlegeringen

Bij een gehalte van 3 % O₂ en 160 ppm H₂S bij een relatieve vochtigheid van 100% is het gasmengsel corrosief voor koper (corrosiesnelheid tot 0,19 mm/jaar). Bij lagere gehalten aan O₂ en/of H₂S is de corrosiesnelheid relatief laag. Bij 50 ppm ammoniak is de corrosiesnelheid tevens laag. Met het oog op het lage gehalte aan koolmonoxide en waterstof cyanide in biomethaan zal de invloed van deze componenten op de corrosiesnelheid beperkt zijn. Voor koolwaterstoffen wordt verwacht, dat deze nauwelijks invloed hebben op de degradatie van koper en koperlegeringen. Dit wordt hieronder verder besproken.

Koolstof dioxide, zuurstof en waterstof sulfide

In het EDGaR-project is voor koper, bij verschillende koolstof dioxide, zuurstof en waterstof sulfide gasmengsels en onder verschillende omstandigheden de corrosiesnelheid bepaald. Bij alle experimenten werd het kopermonster deels in vloeibaar water en deels in de gasfase gehouden. Hierdoor kon de invloed van vloeibaar water in beschouwing worden genomen. Opgemerkt dient te worden dat de



relatieve luchtvochtigheid van de gasfase dus 100% bedroeg. Uit de experimenten bleek het volgende [33].

In de gasfase treedt een relatief grote mate van corrosie op onder de volgende omstandigheden:

- Een zuurstof/waterstof sulfide gasmengsel van respectievelijk 3 mol% O₂ en 160 ppm H₂S bij een druk van 30 mbar resulteert in een corrosiesnelheid van 0,08 mm/jaar. Indien er 50 mol% CO₂ is bijgemengd resulteert dit in een corrosiesnelheid van 0,19 mm/jaar.

In de gasfase is koper geschikt onder de volgende omstandigheden:

- Een koolstof dioxide/zuurstof/waterstof sulfide gasmengsel tot 50 mol% CO₂ en tot 160 ppm H₂S, mits de O₂ concentratie lager is dan 3 mol% of een gasmengsel tot 50 mol% CO₂ en tot 3 mol% O₂, mits de H₂S concentratie lager is dan 160 ppm. De exacte ligging van deze grenswaarde voor zuurstof en waterstof sulfide is niet bekend. De corrosiesnelheid bij een druk van 30 mbar is hierbij minder dan 0,03 mm/jaar;
- Een koolstof dioxide/zuurstof/waterstof sulfide gasmengsel van 50 mol% CO₂, 0,01 mol% O₂ en 160 ppm H₂S resulteerde bij een druk van 8 bar in een corrosiesnelheid van 0,01 mm/jaar.

De experimenten zijn uitgevoerd bij een temperatuur van 25°C. De temperatuur is in de praktijk lager dan deze testtemperatuur. Hierdoor is de corrosiesnelheid in het gasdistributienet iets lager.

Ammoniak

In het EDGaR-project is voor een koperlegering geen spanningscorrosie waargenomen na 19 maanden blootstelling aan 50 ppm ammoniak bij een relatieve vochtigheid van 50%. De aangebrachte spanning lag hierbij boven het spanningsniveau, dat aanwezig is bij normale installatie van mechanische fittingen [16]. Opgemerkt dient te worden, dat ammoniak bekend is vanwege het veroorzaken van spanningscorrosie in koper [27] [31]. Daarnaast kan de ammoniakconcentratie in biomethaan oplopen tot 500 ppm [28]. Aanbevolen wordt daarom om de invloed van hogere ammoniakconcentraties, in combinatie met zuurstof, te beoordelen of om een lager ammoniakgehalte in biomethaan te eisen.

Andere gascomponenten

Koper en koperlegeringen zijn ongevoelig voor droog koolmonoxide en voor zowel droog als nat waterstof cyanide. In de aanwezigheid van water kan koolmonoxide resulteren in corrosie. Experimentele gegevens betreffende deze corrosie ontbreken voorsnog. De resistentie tegen chloor- en fluorhoudende componenten is niet eenduidig [31]. Indien de chloor- en fluorhoudende componenten in aanwezigheid van water niet uiteenvallen in chloor- en fluor-ionen, worden er geen nadelige effecten verwacht. Waterstof chloride is wel in staat om chloor-ionen af te scheiden en is daardoor in combinatie met water wel schadelijk [27].

Koper wordt in de praktijk zonder problemen veelvuldig toegepast voor het transport van koolwaterstoffen. Daarom wordt er voor koolwaterstoffen geen invloed verwacht op koper [27].

Waterstof sulfide in combinatie met elementair zwavel resulteert in een verhoging van de corrosiesnelheid. Hierbij kan elementair zwavel lokaal voor aantasting zorgen, resulterend in putcorrosie [31]. De invloed van elementair zwavel is niet experimenteel vastgesteld.

Aluminium

Aluminium is goed bestand tegen gasmengsels van zuurstof en waterstof sulfide, mits er koolstof dioxide aanwezig is. Daarnaast wordt, met beperkingen, geen invloed van ammoniak, koolwaterstoffen, koolmonoxide, chloor- en fluorhoudende componenten



en waterstof cyanide verwacht. Waterstof chloride is mogelijk schadelijk voor aluminium. Dit wordt hieronder verder toegelicht.

Uit het onderzoek van EDGaR [33] komt naar voren, dat gegoten aluminium (zoals bijvoorbeeld wordt gebruikt bij huisdrukregelaars) goed bestand is tegen waterstof sulfide in combinatie met koolstof dioxide. Het materiaal is getest bij verschillende koolstof dioxide/zuurstof/waterstof sulfide gasmengsels onder verschillende omstandigheden. Hierbij werden de monsters deels blootgesteld aan water en aan damp, waar een relatieve vochtigheid van 100% heerste. Er werd geen corrosie waargenomen bij gasmengsels met een druk van 30 mbar van 10-50 mol% CO₂ tot 3 mol% O₂ en tot 160 ppm H₂S. Alleen in afwezigheid van koolstof dioxide trad in de waterfase corrosie op bij 3 mol% O₂ en 160 ppm H₂S en bij 0,5 mol% O₂ en 34 ppm H₂S met corrosiesnelheden van respectievelijk 0,31 en 0,19 mm/jaar. Daarnaast is aluminium ook bestand gebleken tegen een gasmengsel van koolstof dioxide/zuurstof/waterstof sulfide met 50 mol% CO₂, 0,01 mol% O₂ en 160 ppm H₂S bij een druk van 8 bar. Hier werd verwaarloosbaar weinig corrosie waargenomen.

Uit de literatuurstudie van EDGaR volgt, dat aluminium een goede resistentie heeft tegen ammoniak en koolwaterstoffen [27]. In een GERG-onderzoek wordt beschreven, dat koolmonoxide, op basis van literatuur, geen invloed heeft op aluminium. Waterstof cyanide heeft ook geen invloed op aluminium, mits dit in combinatie met water niet resulteert in een verzuring van de omgeving (pH <4). Aluminium heeft een goede resistentie tegen ammoniak, mits er geen koper in de aluminiumlegering is verwerkt (zoals bijvoorbeeld bij de 2.000 en 7.000 series). De resistentie tegen chloor- en fluorhoudende componenten is niet eenduidig [31]. Indien de chloor- en fluorhoudende componenten in aanwezigheid van water niet dissociëren in chloor- en fluor-ionen, worden er geen nadelige effecten verwacht. Waterstof chloride is wel in staat om in waterige milieus chloor-ionen af te scheiden. Dit resulteert vaak in putcorrosie. Bovendien is waterstof chloride een sterk zuur, hetgeen kan resulteren in algemene corrosie, omdat de oxidehuid oplost bij een pH lager dan 4 [27].

Overige materialen

Asbest-cement

Asbest-cement buizen bestaan uit verschillende componenten. De buizen zijn opgebouwd uit asbest, cement (calciumwaterstofsilicaat) en silica (zeer fijne zanddeeltjes). Asbest is thermisch zeer stabiel en chemisch resistent. Er wordt geen aantasting van het asbest verwacht. Colin Bowker beschrijft een proces, waarbij water in combinatie met waterstof sulfide resulteert in het uitspoelen van de calcium component. Hierdoor gaat de bindende kracht in de buiswand verloren, waardoor de mechanische sterkte verloren gaat [64]. Andere zure componenten zijn ook in staat tot het uitspoelen van het calcium. Het betreft hier bijvoorbeeld waterstof cyanide en waterstof chloride. Voorwaarde is dan wel, dat er voldoende vloeibaar water aanwezig moet zijn, zodat deze uitloging kan plaatsvinden. Onder normale omstandigheden zal zich een dergelijke situatie in het gasnet niet voordoen, zodat het gevaar van het gaszijdig uitlogen van cement verwaarloosbaar is.



VI Permeatie

Bij het onderzoek naar de geschiktheid van het huidige gasdistributienet voor het transport van waterstof moet niet uitsluitend worden nagegaan of het gasnet bestand is tegen waterstof, maar moet tevens worden nagegaan wat de invloed van het gasnet is op de kwaliteit van de waterstof, die via het net wordt getransporteerd. We onderscheiden bij het laatstgenoemde aspect twee processen:

- permeatie van componenten vanuit de omgeving van de leiding naar het waterstofgas;
- uitdampen van aardgascomponenten, die in/aan de binnenwand van de leiding zijn geadsorbeerd.

Daarnaast is het van belang om inzicht te krijgen in de mate, waarin waterstof door de wand van een - met name - kunststof buisleiding permeëert.

Permeatie vanuit de omgeving

Alle kunststof leidingen in het gasdistributienet hebben last van permeatie. Dit betreft zowel bepaalde componenten van het te transporteren gas (permeatie van binnen naar buiten), als voor componenten in de directe omgeving van de gasbuizen (permeatie van buiten naar binnen).

De in de omgeving van de gasleiding aanwezige componenten, zoals water(damp), stikstof en zuurstof (de belangrijkste componenten uit de lucht), kunnen daarbij door de wand van buiten naar binnen permeëren.

De drijvende kracht achter permeatie is het absolute drukverschil van de te beschouwen component. In het geval van zuurstof zal de heersende partiële druk aan de buitenkant van de leiding circa 0,2 bar(a) bedragen. Bij de invoeding van zuiver waterstof zal de partiële druk van zuurstof aan de binnenkant van de leiding circa 0 bar(a) bedragen. Door dit drukverschil zal er altijd enige zuurstof door de buiswand naar binnen permeëren.

Een vergelijkbaar proces vindt ook voor waterdamp en stikstof plaats.

Het gevolg hiervan is, dat de zuivere waterstof langzaam verontreinigd wordt met zuurstof, waterdamp en stikstof.

Omdat de benodigde zuiverheid van de waterstof voor de huidige generatie PEM brandstofcellen hierdoor niet gehaald kan worden, zal het gebruik van waterstof, die wordt aangevoerd via een (deels) kunststoffen gasdistributienet, in dergelijke brandstofcellen zonder een extra reinigungsstap in de nabijheid van de brandstofcel niet mogelijk zijn.

De permeatie van waterdamp kan bij leidingen, die onder het grondwaterpeil liggen (gestuurde boringen), aanzienlijk groter zijn dan bij aan lucht en droge bodem blootgestelde leidingen.

Uitdampen van aardgascomponenten

Zoals hiervoor reeds aangegeven, vragen sommige toepassingen, zoals PEM brandstofcellen, een hoge waterstofzuiverheid. De vraag is echter of deze hoge zuiverheid gegarandeerd kan worden, indien we gebruik maken van het bestaande gasdistributienet. Tijdens het gebruik ervan voor de distributie van aardgas (en daarvoor wellicht van stadsgas) hebben bepaalde gascomponenten zich middels adsorptie gehecht aan de (metalen of kunststoffen) buiswand. Bij kunststoffen kunnen sommige aardgascomponenten bovendien in de buiswand zijn opgenomen (absorptie).

Indien overgeschakeld wordt van aardgas op waterstof, wordt het bestaande evenwicht tussen de concentraties van componenten in het gas en de concentraties in of op de buiswand verstoord en zal zich een nieuw evenwicht in gaan stellen.

Tijdens dit proces zullen de gascomponenten, die eerder geadsorbeerd of geabsorbeerd waren, weer vrij komen. Dit kunnen bijvoorbeeld hogere koolwaterstoffen zijn, maar ook THT. Hoe snel dit proces van vrijkomen van deze



componenten verloopt is onbekend. Voor THT is vanuit de praktijk bekend, dat kunststof leidingen maanden na uitname uit het net nog steeds naar THT ruiken. Nu heeft THT een erg lage reukgrens (ordegrootte van enkele ppb), maar het zwavel in de THT is schadelijk voor PEM brandstofcellen.

De betekenis hiervan voor de praktijk is, dat er naar verwachting gedurende de eerste maanden na overschakeling van aardgas op waterstof nog aardgascomponenten, zij het in afnemende en lage concentraties, in de waterstof zullen worden aangetroffen.

Permeatie van waterstof

De permeatie van een medium door een materiaal is van zeer diverse factoren afhankelijk. Deze factoren zijn onder te verdelen in drie groepen: het materiaal, het medium en de omstandigheden. Zo zijn onder andere het type buismateriaal, de fabricagewijze van de buis, de wanddikte, de verbinding tussen de buizen, de gassamenstelling, de temperatuur en de gasdruk bepalend voor de permeatie van waterstof [65] [66] [67] [68]. De daadwerkelijke permeatie verschilt dus per situatie en onderzoeksresultaten variëren met de omstandigheden in de praktijk.

Bij sterk verhoogde druk kan de permeabiliteit voor waterstof van materialen veranderen, doordat de materiaalstructuur verandert als gevolg van de druk. In LDPE blijft de permeatiecoëfficiënt voor waterstof nagenoeg gelijk, zelfs bij een alzijdige druk van 100 atmosfeer [69]. De verwachting is, dat dit ook voor het bij de gasdistributie gebruikte MDPE en HDPE geldt. Tevens is voor PE80 en PE100 geen effect op de permeatie waargenomen, indien waterstof wordt gemengd met aardgas. De permeatiecoëfficiënt van PE 80 en PE 100, gemeten na een veroudering bij 60 °C, bleek niet veranderd [13]. Voor waterstof kan dan ook worden gesteld, dat veranderingen in druk en fysische veroudering van het materiaal naar verwachting niet tot verandering van de permeatiegedrag van PE voor waterstof zullen leiden.

De permeatiecoëfficiënt wordt sterk beïnvloed door de omgevingstemperatuur en de kristalliniteit van het PE. Voor een bepaald type HDPE is de permeatiecoëfficiënt van waterstof bij een druk van 17 bar bij drie verschillende temperaturen bepaald, zie tabel VI-1. De sterke temperatuurafhankelijkheid van de permeatiecoëfficiënt wordt ook beschreven door J. Humphenor. In zijn studie wordt aangetoond, dat de permeatie van een gas volgens een Arrhenius-vergelijking verloopt [70]. De permeatiecoëfficiënt verschilt dus per materiaal en de genoemde resultaten zijn sterk afhankelijk van de temperatuur, waarbij de analyse is uitgevoerd. Dit moet in beschouwing worden genomen als verschillende studies met elkaar worden vergeleken.

| Temperatuur (°C) | Permeatiecoëfficiënt (cm ³ *mm)/(m ² *atm*dag) |
|------------------|--|
| -15 | 31,9 |
| 25 | 156 |
| 68 | 761 |

Tabel VI-1. Permeatiecoëfficiënt van HDPE bij 17 bar waterstof [65]

De permeatiecoëfficiënt van HDPE rond kamertemperatuur is voor waterstof 108-156 (cm³*mm)/(m²*dag*atm) en voor methaan 21-56 (cm³*mm)/(m²*dag*atm) [65] [71] [72]. In de praktijk zal de permeatiecoëfficiënt lager liggen, omdat de bodemtemperatuur lager is. Onder gelijke omstandigheden is de permeatie van waterstof daardoor 3-5 keer hoger dan voor methaan. De energetische waarde van waterstof is echter 3 keer lager dan die van G-gas, respectievelijk 12 MJ/Nm³ en 35 MJ/Nm³ [73] [74]. Op basis van de permeabiliteit van HDPE is het verlies in energetische waarde als gevolg van lekkage voor waterstof dus groter dan voor aardgas [75]. NATURALHY stelt dat de permeatie van waterstof door PE-buizen 6 tot 7 keer hoger ligt dan voor methaan, wat grofweg resulteert in een verdubbeling van het verlies in energetische waarde ten opzichte van aardgas [13]. DNV-GL stelt dat



het transport van waterstof door polyetheen ongeveer 5 keer hoger is dan voor aardgas [74].

Over de permeatie van methaan en waterstof door PVC zijn minder bronnen voorhanden. Zo wordt in [65] wel de permeatie van waterdamp, maar die voor waterstof niet genoemd.

Uit [76] en eerder verzamelde permeatiecoëfficiënten voor PVC blijken deze voor waterstof bij 20°C te variëren tussen 100 - 115 (cm³*mm)/(m²*dag*atm).

Ter vergelijking: de in [76] genoemde permeatiecoëfficiënt voor methaan bedraagt 1,9 (cm³*mm)/(m²*dag*atm).

Schatting

Om een beeld te vormen met betrekking tot de invloed van de permeabiliteit op de totale gasemissie is hiervan een schatting gemaakt.

Hiervoor is een drietal berekeningen uitgevoerd:

1. De permeatie van waterstof door HDPE.
 - a. Voor een 110 mm SDR-11 buis.
 - b. Bij de maximale gasdruk van het lagedruk distributienet (100 mbar) en het hogedruk distributienet (8 bar), alsmede bij een gasdruk van 200 mbar.
 - c. Voor de berekening worden de verbindingen tussen de leidingen niet meegenomen. Omdat deze veelal gelast zijn, worden deze voor wat permeatie betreft gelijkgesteld aan het leidingmateriaal.
 - d. Aangenomen wordt, dat de permeatiecoëfficiënt 156 (cm³*mm)/(m²*dag*atm) [65] bedraagt. Deze waarde is gebaseerd op de hoogst gemeten permeatiecoëfficiënt bij 25°C.
2. De permeatie van waterstof door hard PVC zonder verbindingen.
 - a. Voor een 110 mm SDR-41 buis.
 - b. Bij de maximale gasdruk van het lagedruk distributienet (100 mbar) en bij een gasdruk van 200 mbar.
 - c. Voor de berekening worden de verbindingen tussen de leidingen niet meegenomen.
 - d. Aangenomen wordt dat de permeatiecoëfficiënt 112 (cm³*mm)/(m²*dag*atm) [76] bedraagt. Deze waarde is gebaseerd op de hoogst gemeten waarde van de permeatiecoëfficiënt.
3. De permeatie van waterstof door PVC-HI inclusief verbindingen.
 - a. In NATURALHY is de permeatie voor 110 mm buizen bepaald [13]
 - b. Voor PVC-HI zijn de verbindingen meegenomen in de analyse.
 - c. De testtemperatuur bedroeg 16°C en testdruk was 200 mbar.

De resultaten van de berekening zijn weergegeven in tabel VI-2.

| m ³ /(km.jaar) | 100 mbar | 200 mbar | 8 bar |
|----------------------------------|----------|---------------|-------|
| HDPE | 1,9 | 2,1 (en 1,9*) | 15,9 |
| PVC zonder verbindingen | 5,6 | 6,1 | - |
| PVC-HI incl. verbindingen | - | (4,8*) | - |

* waarden zijn afkomstig uit NATURALHY waarbij andere materialen en testcondities zijn toegepast

Tabel VI-2. Waterstofpermeatie door 110 mm buizen van HDPE en PVC-HI

In tabel VI-2 is bij HDPE bij 200 mbar te zien dat de berekening weinig verschilt van de gemeten waarde uit NATURALHY. Het verschil wordt veroorzaakt doordat onder andere omstandigheden is getest.



Opvallend is dat PVC met verbindingen een lagere waterstofpermeatie heeft in vergelijking met PVC zonder verbindingen. Dit verschil wordt vermoedelijk veroorzaakt door de verschillende test omstandigheden. Wel geeft dit het sterke vermoeden dat PVC verbindingen weinig invloed hebben op het totale verlies aan waterstof. Daarmee wordt aangenomen, dat PVC verbindingen relatief lek dicht zijn.

Jaarlijks wordt er een schatting gemaakt van de methaanemissie als gevolg van de gasdistributie. Deze schatting wordt gebaseerd op de lekkages, die aanwezig zijn in het distributienet en de permeatie van methaan door de buiswand. Voor PVC-HI en PE wordt aangenomen, dat er 51 m^3 methaan/(km.jaar) voor het lagedruk distributienet (tot en met 100 mbar) en 75 m^3 methaan/(km.jaar) voor drukken boven de 200 mbar verloren gaat [42]. De permeatie van waterstof ligt ver onder deze waarden en heeft een relatief kleine bijdrage aan de totale gasemissie.

De transitie van aardgas naar waterstof zal ook invloed hebben op het verlies van getransporteerd gas als gevolg van lekkages. Dit is afhankelijk van de eigenschappen van het gas. Zo is de dichtheid van waterstof lager dan de dichtheid van methaan, respectievelijk $85,5$ en $678,6 \text{ g/Nm}^3$. Hierdoor lekt waterstof sneller uit openingen dan bijvoorbeeld methaan. Onder gelijke omstandigheden lekt er naar verhouding 2,8 keer meer waterstof dan methaan (in volume). De energetische waarde van waterstof is 3 keer zo laag ten opzichte van methaan, respectievelijk 12 MJ/Nm^3 en 35 MJ/Nm^3 [73] [74]. Het verlies in energetische waarde als gevolg van lekkage is voor waterstof dus ongeveer gelijk aan dat van methaan [75] [77].



VII Berekening maximaal acceptabele concentratie

In deze bijlage wordt de achterliggende informatie gegeven, die geleid heeft tot tabel 5-1 "Maximaal toelaatbare concentratie van componenten in biomethaan op basis van Tijdgewogen Gemiddelde Grenswaarden".

Tevens wordt een voorbeeldberekening uitgevoerd voor de bepaling van de maximaal acceptabele concentratie van een gascomponent in biomethaan.

Deze berekening berust op de volgende aannamen:

- De LEL (Lower Explosion Limit) van biomethaan bedraagt (aannahme) circa 10% in lucht.
- De TGG8 grenswaarde (Tijdgewogen Gemiddelde Grenswaarde gedurende 8 uur; equivalent met de eerder gehanteerde MAC-waarde) [32] van de gascomponent is afhankelijk van het type gascomponent.
- Werkzaamheden worden volgens de thans vigerende VIAG uitgevoerd.

Volgens de VIAG mag er niet worden gewerkt bij een gasconcentratie boven 10% LEL. In dit geval mag er dus worden gewerkt tot een gasconcentratie van:

$$10\% \text{ (LEL)} * 10\% = 1\%$$

Bij deze gasconcentratie mag de gascomponent de TGG8-waarde niet overschrijden. Omdat het biomethaan in deze situatie 100 keer wordt verdund, mag het gehalte van een bepaalde component van het biomethaan dus 100 keer hoger liggen. De op deze wijze berekende maximaal acceptabele concentraties van de diverse componenten, die in biomethaan kunnen voorkomen, zijn weergegeven in tabel VII-1.

| Component | | TGG8-waarde mg/m ³ [32] | Berekende TGG8 [ppm _v] | Maximaal acceptabele concentratie [ppm _v] |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Ammoniak | <i>NH₃</i> | 14 | 18 | 1.800 |
| Benzeen | <i>C₆H₆</i> | 0,7 | 0,2 | 20 |
| Fosfine | <i>PH₃</i> | 0,14 | 0,1 | 10 |
| Koolstof dioxide | <i>CO₂</i> | 9.000 | 5.000 | 500.000 |
| Koolstof monoxide | <i>CO</i> | 29 | 23 | 2.300 |
| Tolueen | <i>C₇H₈</i> | 150 | 36 | 3.600 |
| Waterstof chloride | <i>HCl</i> | 8 | 5 | 500 |
| Waterstof cyanide | <i>HCN</i> | 1 | 0,9 | 90 |
| Waterstof sulfide | <i>H₂S</i> | 2,3 | 1,6 | 160 |

Tabel VII-1. Maximale concentratie van componenten in biomethaan op basis van TGG8-grenswaarden.

Op basis van gezondheids- en veiligheidsoverwegingen wordt geadviseerd om de maximaal toegestane concentraties van de componenten in de rechter kolom van deze tabel aan te houden.