

Den Haag, 10 oktober 2020

## Gedrag van Waterstoflekkages

### Toelichting op het rapport

Vanaf 2030 willen de netbeheerders waterstof in de gebouwde omgeving, naast bijvoorbeeld all-electric en warmtenetten, kunnen inzetten als volwaardige optie. De bestaande aardgasinfrastructuur is immers met relatief kleine aanpassingen geschikt voor waterstof. Uiteraard moet waterstof distributie door bestaande gasleidingen, net als aardgas, op een veilige manier gebeuren. Aangezien waterstof een ander gas is, met andere eigenschappen, dient onderzocht te worden in hoeverre de bestaande beheersmaatregelen aangepast moeten worden. Om dit voor elkaar te krijgen zijn we als netbeheerders actief bezig met een waterstof programma, waar we gezamenlijk onderzoek doen. Een overzicht van de hele onderzoeksroadmap is hier te vinden: <https://www.netbeheernederland.nl/waterstof>

Een van de onderzoeken uit dit programma is het onderzoek naar het gedrag van waterstof bij lekkages. Dit rapport is een eerste theoretisch onderzoek in opdracht van de gezamenlijke netbeheerders, uitgevoerd door DNV-GL en gereviewed door KIWA. Uit het rapport blijkt dat de risico's bij lekkages van waterstof voor een groot deel vergelijkbaar of zelfs kleiner zijn dan die van aardgas. In specifieke gevallen waarbij een concentratie hoger dan 10% in een gesloten ruimte ontstaat, kunnen de risico's echter groter zijn.

Het is belangrijk te benoemen dat veiligheid bij de netbeheerders nu en in de toekomst altijd voorop staat. Dat betekent dat we verder onderzoek gaan doen naar de veiligheidsaspecten van waterstof distributie en net als bij aardgas naar de beheersmaatregelen om waterstof veilig in te kunnen zetten. Hierbij kijken we ook naar nationale en internationale ontwikkelingen omtrent waterstof, om zo ook elders bestaande kennis en ervaring te gebruiken.

### Uitgevoerde stappen

- ✓ • Theoretisch onderzoek naar het gedrag en de risico's van waterstoflekkages
- ✓ • Inzicht in mogelijke veiligheidsmaatregelen

### Vervolgstappen

- Delen van het onderzoek met relevante stakeholders
- Selecteren van veiligheidsmaatregelen voor voorkomen van ongewenste uitstroom en snelle detectie
- Externe onderzoeken interpreteren zoals H21 en Hy4Heat onderzoek (UK)
- Bepalen vervolg onderzoek vanuit de onderzoeksroadmap waterstof (praktijkonderzoek 2021)

RAPPORTAGE

# Gedrag van waterstof bij lekkages in het gasdistributienet

Netbeheer Nederland

**Report No.:** OGNL.184991

**Date:** 30-07-2020



Project name: Rapportage DNV GL  
Report title: Gedrag van waterstof bij lekkages in het Energieweg 17  
gasdistributiesysteem 9743 AN Groningen  
Customer: Netbeheer Nederland  
Customer contact: R. van Hooijdonk  
Date of issue: 30-07-2020  
Project No.: 10169684  
Organisation unit: Flow & Fuels Advisory  
Report No.: OGNL.184991

Prepared by:



Albert van den Noort



Jochum Douma



Ton van Wingerden

Verified by:



Harm Vlap



Sander Gersen

Approved by:



Johan Knijp  
Head of Section Flow & Fuels Advisory

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

DNV GL Distribution:

- OPEN. Unrestricted distribution, internal and external.  
 INTERNAL use only. Internal DNV GL document.  
 CONFIDENTIAL. Distribution within DNV GL according to applicable contract.  
 SECRET. Authorized access only.

Keywords:

Waterstof; Lekkage; Risico; Vergelijk  
aardgas; gasdistributie

*Kiwa Technologie heeft een review uitgevoerd op een conceptversie van het rapport. De hiermee verkregen waardevolle opmerkingen en aanvullingen zijn verwerkt in deze eindversie.*

## INHOUDSOPGAVE

INHOUDSOPGAVE .....	II	
SAMENVATTING.....	1	
1	INTRODUCTIE .....	4
1.1	Doelstelling	4
1.2	Methode	4
1.3	DNV GL-risicomodel	4
2	AARD EN OMVANG VAN LEKKAGES .....	8
2.1	Aardgas	8
2.2	Aard en omvang van waterstoflekkages	8
3	VERSPREIDING EN INSTROOM IN ANDERE RUIMTES.....	18
3.1	Opbouw van concentraties in open lucht	18
3.2	Opbouw van concentratie in gesloten ruimtes	20
3.3	Conclusies en aanbevelingen verspreiding waterstof	24
4	KANS OP ONTSTEKING.....	26
4.2	Conclusies en aanbevelingen	31
5	GEVOLGEN ONTBRANDING OF EXPLOSIE.....	32
5.1	Ontbranding	32
5.2	Explosies	35
5.3	Conclusies en aanbevelingen	40
6	RISICOVERGELIJKING .....	42
6.1	Bepaling risico	42
6.2	Aanbevelingen	45
7	LITERATUURLIJST.....	47
BIJLAGE A: LEKFREQUENTIE EN OMVANG VOOR AARDGASDISTRIBUTIE .....	49	

## SAMENVATTING

De energietransitie naar een duurzaam energiesysteem is in volle gang en heeft grote impact op de distributienetten van de regionale netbeheerders. Zowel het elektriciteitsnet als het gasnet zal op een andere manier benut gaan worden. Deze netten leveren veel energie in de gebouwde omgeving, met name voor de verwarming van huishoudens. Naast een elektrificatie van deze warmtevraag zien de netbeheerders nog steeds een duidelijke rol voor de gasdistributienetten. Een mogelijke oplossing voor de verwarming van huishoudens is het gebruik van duurzaam geproduceerd waterstof. Een van de te beantwoorden vragen is hoe waterstof op een veilige manier ingezet kan worden in de distributienetten. Netbeheer Nederland heeft daarvoor een onderzoeksprogramma opgezet. Een belangrijk thema daarbij is om te weten hoe waterstof zich, in verhouding tot aardgas, gedraagt bij lekkages in het gasdistributiesysteem. Als onderdeel van het onderzoeksprogramma wordt in deze studie een literatuur inventarisatie gemaakt van het huidige kennisniveau op dit thema.

### Risicoanalysemodel


De aanpak van het onderzoek is gebaseerd op een standaard DNV GL-risicoanalyse model voor lekkages in gasdistributienetten. Onder andere in het H21 programma in het Verenigd Koninkrijk (VK), wordt onderzoek gedaan onder welke voorwaarden waterstof geen groter risico veroorzaakt vergeleken met het huidige aardgasdistributiesysteem. Als onderdeel van het Engelse onderzoeksprogramma worden momenteel experimenten uitgevoerd door DNV GL ter onderbouwing van het risicoanalyse model voor waterstofdistributienetten. Op het moment van schrijven van dit rapport zijn deze resultaten nog niet bekend.

Het risicomodel onderscheidt een aantal stappen waarin eerst het aantal en de omvang van lekkages wordt beschreven. Vervolgens wordt bekeken hoe de vrijgekomen hoeveelheid gas zich verspreidt, zowel in de open lucht, onder de grond als in gesloten ruimtes. Voor een opgebouwde concentratie gas wordt bekeken of deze ontstoken kan worden en wat vervolgens de gevolgen daarvan zijn. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen branden en explosies en de daarbij horende gevolgen. De inzichten voor de verschillen tussen aardgas en waterstof in de verschillende stappen worden achtereenvolgens beschreven. De vergelijking van het risico tussen aardgas en waterstof in het distributiesysteem hangt af van de kans op lekkage, het ophopen van een gevaarlijke concentratie gas, de kans op ontsteking en de gevolgen van deze ontsteking. Elk van deze kansen kan door middel van mitigerende maatregelen verkleind worden. Voor een aantal situaties worden hiervoor suggesties gedaan.

### Aard en omvang van lekkages

De meeste lekken in aardgasdistributienetten ontstaan in de aansluitleiding, gevolgd door de metaaraansluiting en binnenleiding; dus in en dichtbij de woning. Verreweg het grootste deel van deze lekken wordt gedetecteerd door gasluchtmeldingen omdat derden het geodoriseerde gas ruiken en herkennen. De meeste lekken in het aardgasdistributiesysteem treden op bij distributiematerialen zoals grijs en nodulair gietijzer, asbest cement en staal. Met uitzondering van staal worden deze materialen al geruime tijd niet meer gebruikt en worden structureel gesaneerd uit het gasdistributienet. Met betrekking tot de gebruikte materialen in het distributienet voor waterstof is de verwachting dat er niet meer lekken zullen ontstaan. Voor de detectie van waterstoflekkages door gasluchtmeldingen wordt aanbevolen om het gas te odoriseren.

Bij een lekkage van waterstof is de volume uitstroom groter dan bij aardgas. Bij een klein lek, in de orde grootte van een liter per uur of lager, kan de stroming laminair zijn en stroomt er zo'n 30% meer waterstof uit op volumebasis. Bij grotere lekken wordt de stroming turbulent en stroomt er op



volumebasis 190% meer waterstof uit dan aardgas. Voor laagcalorisch gas is de hoeveelheid vrijgekomen energie op bovenwaarde ongeveer gelijk en op basis van onderwaarde iets lager dan bij aardgas. Voor de lekgrootteverdeling en detectie in distributienetten is voor waterstof nog geen statistiek opgebouwd. Een registratie van gevonden lekken en omvang in toekomstige waterstof distributienetten, in analogie met de huidige registratie van aardgaslekken, kan deze bevindingen onderbouwen.

### **Verspreiding**

Ondergrondse uitstroom van waterstof door de bodem blijkt goed beschreven te kunnen worden met modellen, mits de doorlaatbaarheid van typische grondsamenstellingen bekend zijn. De doorlaatbaarheid wordt naast de grondsamenstelling ook beïnvloed door weersomstandigheden (regen, vorst). Bij gelijke drukken lijkt waterstof eerder tot kratervorming te kunnen leiden in vergelijking met aardgas. Dit kan vooral optreden bij hogere drukken in het gasdistributiesysteem (>200 mbar) en niet bij lage drukken (<200 mbar). Kratervorming zou gunstig zijn als daarmee de waterstof sneller in de atmosfeer terecht komt en niet ondergronds diffundeert naar gesloten ruimtes. Aanvullende experimentele data is nodig om gevalideerde modellen voor de Nederlandse situatie te maken.

Door de lagere dichtheid zal waterstof sneller opstijgen bij afblazen of lekkage naar de open lucht. In vergelijking met aardgas leidt dit niet tot hogere risico's. Er stroomt ongeveer evenveel energie weg en eerste berekeningen van de veiligheidscontouren rond een lek in een distributieleiding, laten zien dat deze kleiner zijn dan voor aardgas. De contour van de gaswolk is vergelijkbaar met die van aardgas.


In gesloten ruimtes verspreidt waterstof zich sneller dan aardgas. Uit experimenten en simulaties blijkt dat bij een lekkage in een niet-geventileerde ruimte, waterstof zich door het verschil in dichtheid aanvankelijk boven in een gesloten ruimte ophoopt en vervolgens mengt tot een homogeen mengsel. In situaties waar voldoende ventilatie is kan het gas ontsnappen naar naastgelegen ruimtes. Daardoor blijft de concentratie van waterstof laag en zal het eerder geroken worden, mits het geodoriseerd is. Aardgas vertoont een soortgelijk gedrag maar omdat het dichtheidsverschil met lucht veel kleiner is zal de verspreiding minder snel verlopen. Waterstof zal in vergelijking met aardgas, bij een gelijke lekgrootte tot hogere concentraties leiden dan aardgas.

### **Ontsteking**

De ontstekingsenergie van een brandbaar mengsel van waterstof en lucht is afhankelijk van de concentratie. Bij een stoichiometrisch mengsel is de minimale ontstekingsenergie van waterstof in lucht veel lager dan voor aardgas, en daarmee zijn ontstekingsbronnen met zwakke statische ontlading in principe voldoende om het mengsel te doen ontsteken. Mengsels van lucht en waterstof met lage concentraties, tot ongeveer 8 – 10 vol% hebben echter een lagere kans op ontsteken dan aardgas. Vonken veroorzaakt door elektrische apparatuur of schakelaars zouden in theorie voldoende moeten zijn om ook deze lage concentraties te doen ontsteken. Er is in de literatuur echter geen eenduidig beeld over welke bronnen wel of niet tot ontsteking leiden: hoewel getest wordt met ontstekingsbronnen die voldoende energie voor ontsteking hebben, blijken deze lang niet altijd een brandbaar mengsel te ontsteken.

### **Gevolgen: brand of explosie**

Om de gevolgen van ontsteking te bepalen wordt onderscheid gemaakt tussen het verbranden van waterstof middels een vlam of middels een deflagratie of denotatie. In een open ruimte en bij lage concentraties (<10 vol% waterstof in lucht) zal een brand optreden. In de gevonden experimenten worden geen overdrukken geconstateerd bij concentraties onder de 10% waterstof. Bij gesloten ruimtes of bij hogere concentraties kunnen explosies optreden.



Branden van waterstof hebben bij een gelijk vermogen een gelijke of lagere hittestraling vergeleken met aardgas. Gelijke hittestraling treedt op bij branden waarbij ook stof/aarde mee verbrand wordt. Voor vrije vlammen van waterstof, die tevens minder zichtbaar zijn, zal de hittestraling lager zijn dan voor aardgas. Bij gelijke drukken zal bij een lagere energie-uitstroom het effect van de vlam kleiner zijn dan van aardgas. Dit wordt bevestigd door metingen.

Experimenten laten zien dat bij waterstof de overdruk bij ontbranding toeneemt vanaf concentraties boven 10 vol%. Bij een stoichiometrisch mengsel (rond de 30 vol%) kunnen overdrukken ontstaan die boven de 100 mbar uitkomen. Voor aardgas is het stoichiometrische mengsel 9,5 vol%. Bij metingen bij aardgasexplosies zijn overdrukken tot 6 bar gemeten. Bij overdrukken van 140 mbar stortten muren in en bij 420 mbar worden huizen grotendeels verwoest. Door de hogere reactiviteit van waterstof, wordt verwacht dat een stoichiometrisch mengsel van waterstof eerder een detonatie kan veroorzaken. Nader onderzoek is nodig om dit te bevestigen en de gevolgen in vergelijking met aardgas verder vast te stellen.

### **Risicovergelijking en aanbevelingen**

De vergelijking tussen de risico's van aardgas en waterstof is situatieafhankelijk. Samenvattend wordt verwacht dat bij vrije uitstroming in de buitenlucht de risico's van aardgas en waterstof vergelijkbaar zijn. Bij ondergrondse lekken is er een verwachte lagere kans op een onveilige situatie als er een doorlaatbare bovenlaag aanwezig is, maar een verhoogde kans als de bovenlaag ondoorlaatbaar (met name bij vorst) is, door migratie van waterstof naar gebouwen.

Indien er een lek in een woning is of waterstof via migratie door de bodem in de woning komt, dan is het risico afhankelijk van de concentratie die kan worden opgebouwd: Indien de concentratie van waterstof onder de 10 vol% blijft dan is dit een lagere kans op schade omdat de kans op ontsteking lager is dan bij aardgas en omdat er bij ontsteking waarschijnlijk geen explosie zal plaats vinden.

Voor concentraties boven 10 vol% geeft waterstof een hogere kans op schade omdat dan de kans op een deflagratie hoger is dan bij aardgas en de drukopbouw veel sneller verloopt. Met name bij grote lekken (vanaf 100 tot 300 l/min) kunnen deze concentraties worden overschreden, vooral als het lek in een beperkte ruimte (meterkast, kruipruimte, e.d.) ontstaat. Om deze risico's te verlagen worden een aantal suggesties gegeven voor mitigerende maatregelen, zoals bijvoorbeeld het gebruik van LEL-sensoren, odorisatie of de toepassing van automatische kleppen.

Om uiteindelijk te komen tot een acceptabel risico voor het gebruik van waterstof in distributienetten zal overeenstemming moeten worden gevonden over te nemen maatregelen. Het is daarbij van belang dat de onzekerheid in de kansen en gevolgen voor de verschillende aspecten zoveel mogelijk verkleind worden. Voor toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving betekent dat dat er statistiek en praktijkervaring opgebouwd dient te worden. Binnen het H21 project worden momenteel diverse experimenten uitgevoerd die verdere inzichten zullen opleveren. Het betreft hierbij onder andere metingen aan de opbouw aan concentratie van waterstof in huizen, verspreiding door de bodem en de ontsteking door verschillende bronnen. Het verdient de aanbeveling om de uitkomsten van deze experimenten te vertalen naar de Nederlandse situatie, en daar waar nodig aan te vullen met noodzakelijke experimenten.



# 1 INTRODUCTIE

De aanleiding van dit onderzoek ligt in het onderzoek 'Toekomstbestendige gasdistributienetten' [1]. Daarin wordt beschreven dat met kleine aanpassingen het bestaande gasdistributienet geschikt gemaakt kan worden voor het transport van (zuiver) waterstof. Als verenigde Nederlandse netbeheerders wil Netbeheer Nederland onderzoeken hoe dit op een veilige manier kan. Daarvoor is in samenwerking met de andere Nederlandse netbeheerders een onderzoeksprogramma opgezet. De in dit rapport beschreven literatuurinventarisatie naar het gedrag van waterstof bij lekkage maakt daar deel van uit.

## 1.1 Doelstelling

Het doel van de studie is de kennis te verzamelen die beschrijft hoe waterstof zich gedraagt bij lekkages, zich verspreidt na lekkage en welke effecten ontstaan bij ontbranding of explosie. Deze kennis is van belang om de veiligheid van de introductie van waterstof te waarborgen en de juiste beheersmaatregelen te kunnen nemen.

Met beschikbare kennis wordt bedoeld datgene dat bekend is vanuit de literatuur of uit modellen (bijvoorbeeld CFD-simulaties van uitstroom), met een interpretatie naar de toekomstige distributie van waterstof. In de studie dient vooral een vergelijk te worden gemaakt met het bestaande gasdistributiesysteem (30 mbar tot en met 8 bar) en daarmee het gedrag van aardgas bij lekkages.

## 1.2 Methode

De aanpak van dit onderzoek is gebaseerd op een standaard DNV GL-risicoanalyse model voor gaslekken. Het model hanteert een bepaalde methodiek welke is vergeleken met de in de uitvraag gestelde vragen. Op basis hiervan is er een verdeling gemaakt tussen de verschillende modules in het model en wordt de aanpak in deze studie verdeeld in 3 verschillende stappen.

Stap 1: Inventarisatie van het aantal en de aard van lekken

Stap 2: Verspreiding en instroom in andere ruimtes en ontstekingskans

Stap 3: Gevolgen van ontsteking: brand en/of explosie

Hieronder wordt het model nader toegelicht en wordt de methode per stap verder beschreven en een verwijzing gegeven naar het hoofdstuk van dit rapport waarin deze aspecten worden besproken.

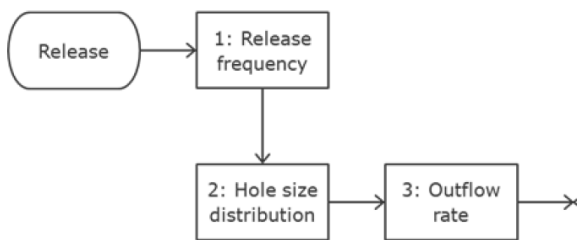
Het H21-project en de daaraan gerelateerde projecten maken deel uit van de Engelse ambitie om in een groot deel van het Noorden van Engeland (VK) het aardgasnet om te zetten naar waterstof. Voor het gebruik van (zuiver) waterstof in distributienetten is het VK wereldwijd voorloper. DNV GL is partner in het H21 project en doet daarin vooral onderzoek naar de risico's van de inzet van waterstof. Daarbij vormt het genoemde risicomodel de basis. Voor de aanpassing van het model naar waterstof, is een literatuuronderzoek gedaan naar de huidige stand van zaken voor de verschillende onderdelen. Vervolgens zijn een aantal aanvullende experimenten gedefinieerd, waarvan de resultaten waarschijnlijk in de zomer van 2020 gepubliceerd worden. Het H21 literatuuronderzoek vormt de basis van dit verkennend rapport.

## 1.3 DNV GL-risicomodel

Binnen DNV GL is een gestandaardiseerde risicoanalyse methode ontwikkeld voor gaslekken. Deze methodiek is uitvoerig beschreven voor aardgassystemen [2] en wordt nu ook getest voor waterstoftransportsystemen binnen het H21 project [3, 4]. Het model kan gebruikt worden zowel voor







**Figuur 2. Onderverdeling van stappen in het "Pipe Fracture Model"**

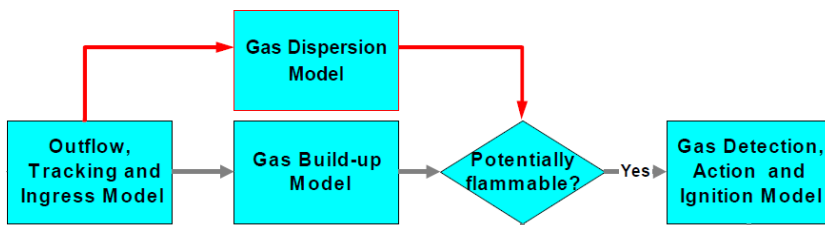
Stap 1 geeft inzicht in de aard en omvang van de lekkages in het aardgasdistributiesysteem en omvat de volgende vragen:

- Hoe vaak komen lekken op dit moment voor in het aardgasdistributiesysteem?
- Wat is de aard van deze lekken? Grootte, snelheid van ontwikkeling.
- Hoe zal dit verschillen als er waterstof in plaats van aardgas in het distributiesysteem zit?

Deze stap wordt besproken in hoofdstuk 4

### 1.3.2 Stap 2: Verspreiding en ontstekingskans

De in stap 1 bepaalde uitstroomhoeveelheid zal zich na uitstroming gaan verspreiden. In de tweede stap wordt bepaald hoe deze verspreiding plaatsvindt en wat de ontstekingskans is van de vrijgekomen waterstof. Zoals weergegeven in Figuur 3 wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen waterstof die in de vrije lucht vrijkomt en waterstof die in gesloten ruimten ophoopt.



**Figuur 3. Stappen voor verspreiding en ontstekingskans**

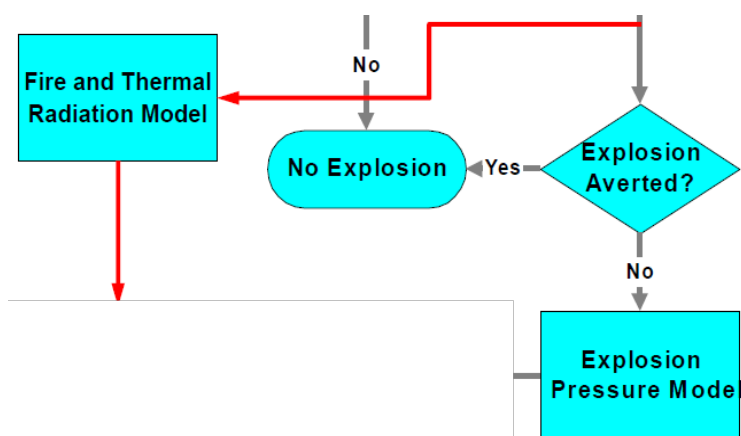
De hoeveelheid gas die uit een lek stroomt wordt bepaald door de lek grootte, de gasdruk, de tegendruk die het uitstromende gas ondervindt, of en wat voor gronddekking en toplaag (tegels, klinkers, asfalt, gras) er is en waar het naar toe kan stromen (kruipruimte, kelder, meterkast, woning, grondoppervlak en dergelijke). Deze stap wordt besproken in hoofdstuk 5 over verspreiding en hoofdstuk 6 over ontsteking.

### 1.3.3 Stap 3: Gevolgen

In stap 2 wordt de opgebouwde concentratie en ontstekingskans van de gelekte waterstof bepaald onder verschillende omstandigheden (ondergronds/in gesloten ruimtes bij verschillende lekgroottes en drukken).

Afhankelijk hiervan kan het mengsel ontbranden of exploderen (zowel deflagratie als detonatie). Op basis van modellen en beschikbaarheid van uitkomsten van experimenten zullen de volgende uitkomsten worden geschat:

- Hittebelasting en drukgolfbelasting bij een explosie of brand bij een bovengronds lek
- Hittebelasting en drukgolfbelasting bij een explosie of brand bij een ondergronds lek
- Hittebelasting en drukgolfbelasting bij een explosie of brand bij een in pandig lek



**Figuur 4. Stappen voor ontbranding en explosies**

Doel daarbij is te bepalen wat het verschil is tussen aardgas, welke meer energie bevat, en waterstof. Daar waar van toepassing zullen representatieve situaties worden geïdentificeerd.

Deze stap wordt besproken in hoofdstuk 7.

### 1.3.4 Risicovergelijking

Op grond van bovenstaande stappen worden de resultaten in het laatste hoofdstuk samengebracht waarbij zowel de uitkomsten voor aardgas als voor waterstof worden weergegeven voor een aantal situaties. Dit wordt besproken in hoofdstuk 8.

## 2 AARD EN OMVANG VAN LEKKAGES

### 2.1 Aardgas

Eén van de risico's van gasdistributie ontstaat bij het weglekken van aardgas. Er ontstaan lekken door het falen van componenten, het degenereren van verbindingen, corrosie, eigen werkzaamheden en externe interferentie (third party damage). Lekkages worden door de regionale netwerkbedrijven proactief en reactief aangepakt:

1. Door inspecties en preventief onderhoud wordt de staat van de infrastructuur vastgesteld en verbeterd. Hiermee wordt het ontstaan van lekken tegengegaan.
2. Door lekzoeken wordt vastgesteld waar in het netwerk (hoofdleidingen en aansluitleidingen) lekken zijn ontstaan. Dit is beschreven in NEN 7244-9<sup>1</sup>.
3. In de gasdrukregelstations worden éénmaal per jaar een functionele inspectie uitgevoerd waarbij ook op lekkages wordt gecontroleerd. Dit is beschreven in NEN 1059.
4. Gasluchtmeldingen worden door de netwerkbedrijven afgehandeld.
5. Gasongevallen en ernstige incidenten<sup>2</sup> worden door de netwerkbedrijven aangepakt, geregistreerd, onderzocht<sup>3</sup> en afgehandeld.

In bijlage A zijn de lekfrequenties en omvang voor lekken in het aardgasdistributie systeem opgesomd. De belangrijkste conclusies kunnen als volgt worden samengevat:

1. De hoogste frequentie lekken in het aardgasdistributiesysteem treedt op bij distributiematerialen zoals grijs en nodulair gietijzer, asbest cement en staal. Met uitzondering van staal worden deze materialen al geruime tijd niet meer aangelegd en worden structureel gesaneerd uit het gasdistributienet.
2. De meeste gaslekken ontstaan in de aansluitleiding, gevolgd door de meteraansluiting en binnenleiding, dus in en dichtbij de woning. Verreweg het grootste deel van deze lekken wordt geconstateerd door gasluchtmeldingen omdat derden het geodoriseerde gas ruiken en herkennen. Ongeveer 1/6<sup>e</sup> van de lekkages ontstaat buiten het huidige domein van de netbeheerder in met name de binnenleidingen.

### 2.2 Aard en omvang van waterstoflekkages

Waterstof heeft geen negatieve invloed op de materialen die in het (Nederlandse) aardgasdistributienet worden gebruikt [1]. Het aantal lekken zal hierdoor dus niet toenemen. Met betrekking tot lagedruk distributie van waterstof door leidingen blijkt er noch in de openbare literatuur noch binnen DNV GL praktijkinformatie beschikbaar over de aard en omvang van lekkages. Dit betreft zowel de faalfrequentie als de details van de lekken zelf. Dit valt te verklaren uit de beperkte praktische ervaring die is opgedaan met distributienetten voor waterstof.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt ervanuit gegaan dat de oorzaak van de lekkage niet verschilt tussen het aardgas en waterstofsysteem. Dat wil zeggen, lekkages kunnen veroorzaakt worden door externe factoren (beschadigen van leidingen van buitenaf) of door bijvoorbeeld niet sluitende koppelingen of afdichtingen.

<sup>1</sup> Specifieke functionele eisen voor de afhandeling van gasmeldingen en periodiek gaslek onderzoek.

<sup>2</sup> Volgens "Handelswijze ten aanzien van het melden van incidenten en ongevallen aan het Staatstoezicht op de Mijnen en Kiwa Technology"

<sup>3</sup> Dit gebeurt in sommige gevallen door derden.

Om toch een inschatting te kunnen maken voor de verschillen tussen aardgas- en waterstoflekkages in lagedruk netten, zijn verschillende modellen ontwikkeld. Door middel van experimenten kunnen deze modellen verder gevalideerd worden.

Op basis van verschillen in fysische eigenschappen tussen aardgas en waterstof, laten de modellen voorspelbaar gedrag zien voor de uitstroom van een gas uit lekken: de massastroom is lager voor waterstof terwijl de volumestroom groter is<sup>4</sup>.

De geometrie van de lekkages is niet eenduidig en maakt het modelleren van de uitstroom complex. Het gat kan een spleet zijn tussen een niet passende koppeling of bijvoorbeeld een lek door corrosie van de leiding. In de paper van Swain [5] wordt getracht voor verschillende type lekken een bijpassend model voor de uitstroom te vinden. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen drie verschillende mechanismen voor lekken: diffusie, laminaire uitstroom en turbulente uitstroom. De gemeten diameter van de spleet is in de orde van 0,02 – 0,07 cm met een lengte van 0,5 cm. Dit soort spleten veroorzaakt laminaire stroming, waarbij de volume hoeveelheid ongeveer 1,3 keer zo veel is als bij methaan. Voor turbulente stroming is dit 2,9 keer en voor diffuse stroming 3,1 keer.

Naast deze vrij algemene benadering kan de uitstroom worden berekend met de volgende formule [6]:

$$q_v = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \frac{p_1}{\rho_1} \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

Hierin is:

$q_v$ : de volumestroom (Nm<sup>3</sup>/s)

$p_1$ : de druk in de leiding (Pa)

$p_2$ : de druk buiten de leiding (luchtdruk) (Pa)

$\gamma$ : de warmtecapaciteit ratio ( $c_p/c_v$ ). Deze is voor aardgas (methaan) 1,32 en voor waterstof 1,41 (-)

C: de drukverliescoëfficiënt, die voor aardgas en waterstof gelijk is:  $\approx 0,62$

A: de grootte van het gat (m<sup>2</sup>)

Deze formule is geldig tot een bepaalde drukverhouding wordt bereikt Dit fenomeen wordt beschreven door:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Boven deze druk is de uitstroom alleen afhankelijk van de opwaartse druk. Deze drukverhouding is 1,89 voor waterstof en voor aardgas 1,93. De uitstroom van waterstof is dan 2,9 maal die van aardgas.

Voor het aansluiten van binneninstallaties geldt in Nederland een maximale aanvaardbare lekstroom van 1 liter aardgas per uur<sup>5</sup>. In haar onderzoek laat KIWA Technology experimenteel zien [7] dat een bestaand lek voor aardgas met een debiet van 0,1-10 l/h een ongeveer 60% groter debiet geeft voor waterstof bij drukken van 25-100 mbarg. Dit is in overstemming met de bevindingen van Swain, als de stroming tussen laminair en turbulent in ligt. Naast de drie beschreven stromingssituaties, zijn er overgangsgebieden tussen diffusie en laminair en tussen laminair en turbulent, die minder eenvoudig

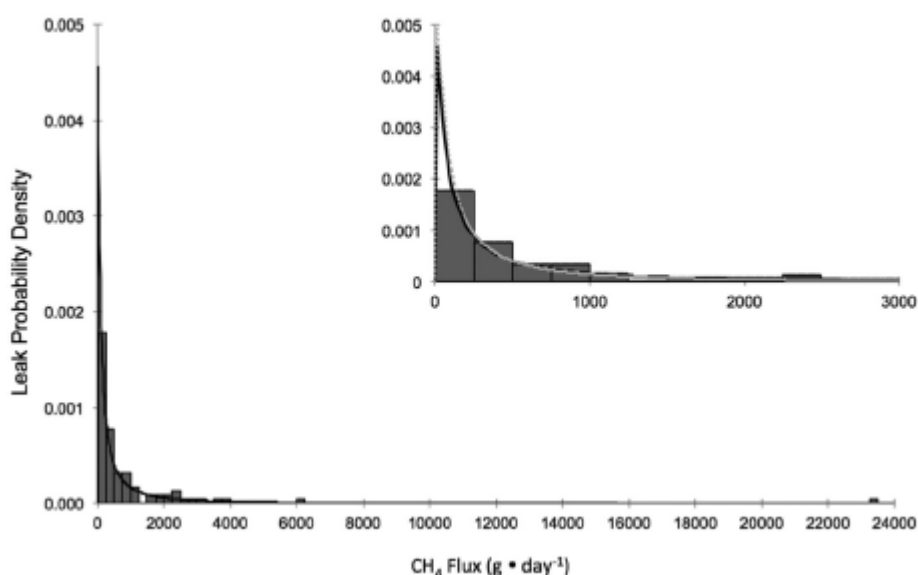
<sup>4</sup> De energiestroom kan zowel groter als kleiner zijn.

<sup>5</sup> Bij nieuwe aanleg (NEN 1078). Dit komt overeen met een rond gat van 0,05 mm doorsnede bij 100 mbar leidingen. Voor bestaande bouw gold nog vaak NEN 8078 (+A1 uit 2018), waarin voor het maximale lekverlies staat vermeld dat 5 liter per uur (0,11 mm) is toegestaan.

wiskundig beschreven kunnen worden. Deze overgangsgebieden worden bepaald door de geometrie zoals de lekgruote, het drukverschil en de lengte van het kanaal. Dit laatste (bijvoorbeeld de wanddikte van de buis) is vaak zo kort dat zich nog geen stabiel stromingsprofiel heeft kunnen vormen. De stroming ligt tussen laminair en turbulent in.

Daarnaast permeëert een volume waterstof een factor 5 sneller door kunststof dan methaan. De totale hoeveelheid die op deze wijze verloren gaat is echter zeer klein ten opzichte van de verliezen door 'gewone' lekkage, maar onder speciale omstandigheden zoals bijvoorbeeld het gebruik van een mantelbuis rond een PE-leiding kan permeatie een risico<sup>6</sup> opleveren. [1]

De lekgruoteverdeling is slechts sporadisch bepaald. In 2016 is een onderzoek uitgevoerd naar de lekgruote voor aardgas voor een populatie van 100 lekken in het gebied van Boston [8]. Het resultaat is weergegeven in Figuur 5. Het blijkt dat 7% van de lekken voor 50% van de emissies van aardgas zorgt.



**Figuur 5. Lekgruoteverdeling voor 100 lekken. (1000 g/dag ≈ 1 l/min)**

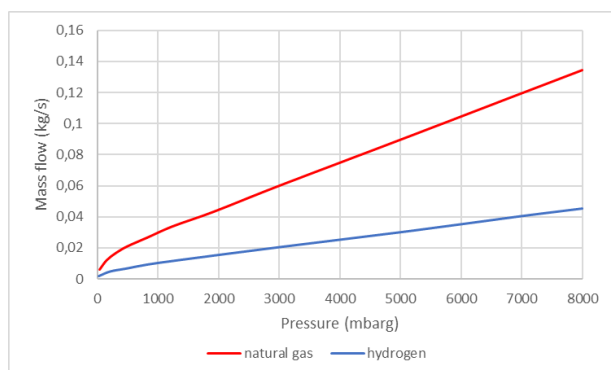
### 2.2.1 Constante uitstroom uit blootgestelde leidingen

Voor risicoanalyses van aardgasdistributie wordt in het VK veel gebruik gemaakt van het CORCE-model, dat gebaseerd is op een rapport van het Design Institute for Emergency Relief Systems (DIERS) [9]. Voor zover bekend wordt er in Nederland geen gebruik gemaakt van een risicomodel voor distributienetten zoals dat in het VK wel het geval is. Het CORCE-model wordt gebruikt om een inschatting te maken voor de uitstroom door gaten in blootgestelde leidingen en andere componenten in de vrije lucht. Het model is oorspronkelijk ontwikkeld voor koolwaterstoffen en daarin voorkomende componenten. Later is waterstof toegevoegd aan het model. Het model is gevalideerd tegen DNV GL's GasVLe model [10] en blijkt een goede overeenkomst op te leveren.

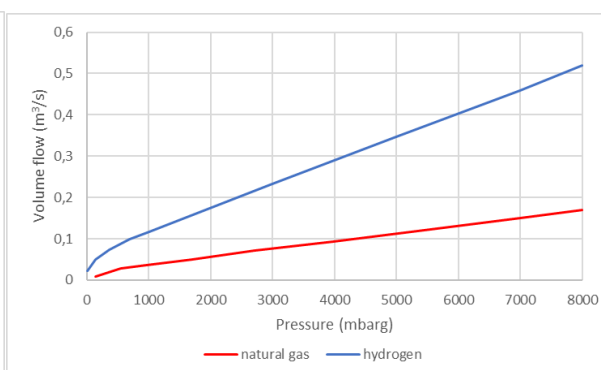
Een voorbeeld van de uitkomst van het model wordt hieronder weergegeven voor een lekkage uit een lek met een diameter van 100 mm bij een temperatuur van 15°C. In het voorbeeld wordt typisch Brits aardgas (met een moleculairgewicht van 18,4 g/mol, vergelijkbaar met H-gas in Nederland) vergeleken

<sup>6</sup> Een 110 mm PE-buis (SDR 11) in een 20% grotere niet-geventileerde mantelbuis geeft bij een druk van 8 bar na 5 dagen een explosief mengsel. Bij aardgas zal dat na 25 dagen zijn.

met 100% waterstof. De figuur aan de linkerkant laat de verwachte stationaire massastroom zien als functie van de druk, de figuur aan de rechterkant geeft de volumestroom weer.



**Figuur 7. Verwachte stationaire massastroom als functie van de druk.**

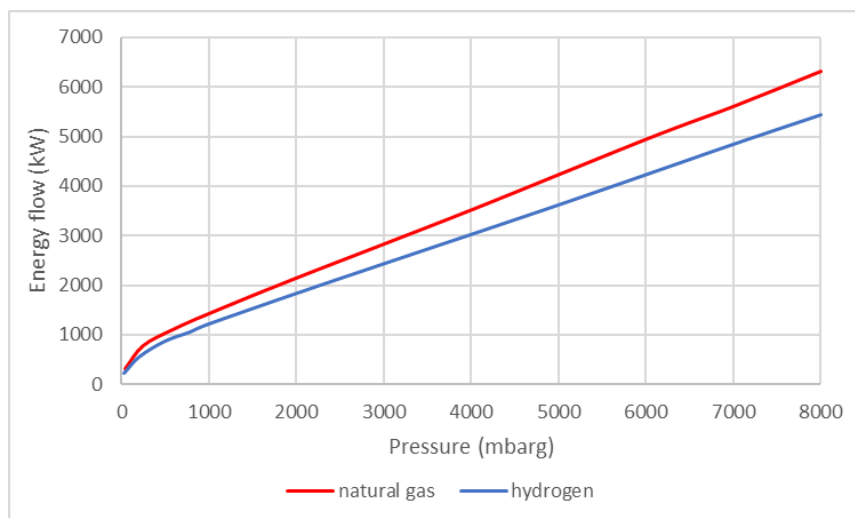


**Figuur 6. Verwachte stationaire volumestroom als functie van de druk.**

Het verschil in dichtheid tussen waterstof en aardgas verklaart het verschil tussen beide grafieken. Om een vergelijking te maken tussen beide moleculen dient de verbrandingswaarde van aardgas en waterstof te worden meegenomen, zoals weergegeven in onderstaande tabel (in MJ/kg of MJ/Nm<sup>3</sup>).

Fluid	Net Calorific Value	
	(MJ/kg)	(MJ/SCM)
Natural Gas	46.9	36.6
Hydrogen	119.9	10.2

Als vervolgens het vermogen van de uitstroom wordt berekend door de massastroom te vermenigvuldigen met de verbrandingswaarde per kg en de volumestroom met de verbrandingswaarde per m<sup>3</sup>, blijkt dat de ratio tussen de energiestroom voor waterstof en aardgas nagenoeg constant is voor de berekende drukrange. De ratio wordt benaderd door  $\sqrt{\frac{MW_{H_2} \cdot cv_{H_2}}{MW_{CH_4} \cdot cv_{CH_4}}} \approx 0,85$  voor lage drukken en iets hoger voor iets hogere drukken. De energiestroom bij een lekkage van waterstof is in dit geval dus 15% lager dan die van aardgas. Dit geldt voor H-gas, waarvoor de Wobbe index =50 MJ/m<sup>3</sup>. Voor G-gas is het effect net andersom: W=44 MJ/m<sup>3</sup> voor G-gas. Voor waterstof is de Wobbe index 48 MJ/m<sup>3</sup>.

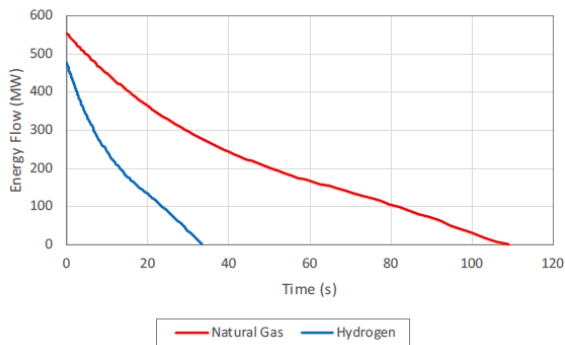


**Figuur 8. Verwachte stationaire energiestroom als functie van de druk.**

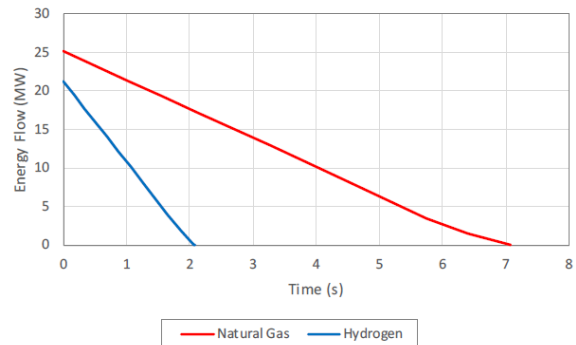


## 2.2.2 Tijdsafhankelijke uitstroom

Voor de tijdsafhankelijke uitstroom zijn berekeningen met het CORCE-model gemaakt. Hierbij wordt uitgegaan van een lek met een diameter van 100mm in een reservoir van 100m<sup>3</sup>. Onderstaand figuur laat vervolgens de uitstroom vertaald naar vermogen, als functie van de tijd zien voor een situatie met een overdruk van 7 bar (links) en 30 mbar (rechts).



**Figuur 9. Verwachte energiestroom als functie van de tijd bij 7 bar overdruk.**

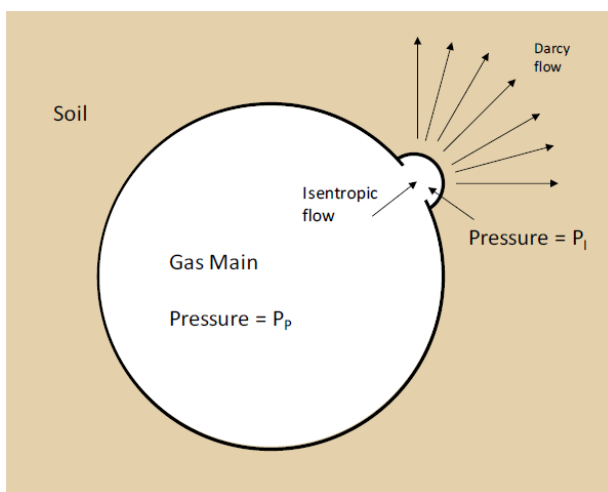


**Figuur 10. Verwachte energiestroom als functie van de tijd bij 30 mbar overdruk.**

Ook in deze situatie geldt dat de massastroom van aardgas een factor drie groter is dan die van waterstof. De uitkomsten laten zien dat de uitstroom van waterstof beduidend korter duurt dan die voor aardgas. Uitgaand van een ideale gas wet geldt dat massa van het aardgas in het reservoir een factor negen groter is. Dit betekent dat de uitstroom van de waterstof ongeveer drie keer zo kort duurt vergeleken met aardgas, hetgeen ook door het model wordt bevestigd. Een afgesloten segment van een leiding zal bij een lekkage van waterstof dus drie keer zo snel leegstromen als bij aardgas. Bij dezelfde druk zal er drie keer minder energie in de -niet stromende-leiding zitten.

## 2.2.3 Uitstroom uit ondergrondse leidingen

Bij een lekkage in een ondergrondse leidingen spelen een aantal mechanismen een rol. Figuur 11 laat deze situatie zien. Afhankelijk van de grootte van het lek ondervindt het uitstromende gas een weerstand van de omliggende grond. Deze weerstand is afhankelijk van de diepte waarop de leiding ligt en de samenstelling van de bodem. Van belang is of er een holte ontstaat waarin de druk zich opbouwt. Uiteindelijk zal het gas willen ontsnappen, dan wel doordat het diffundeert door de bodem, dan wel dat

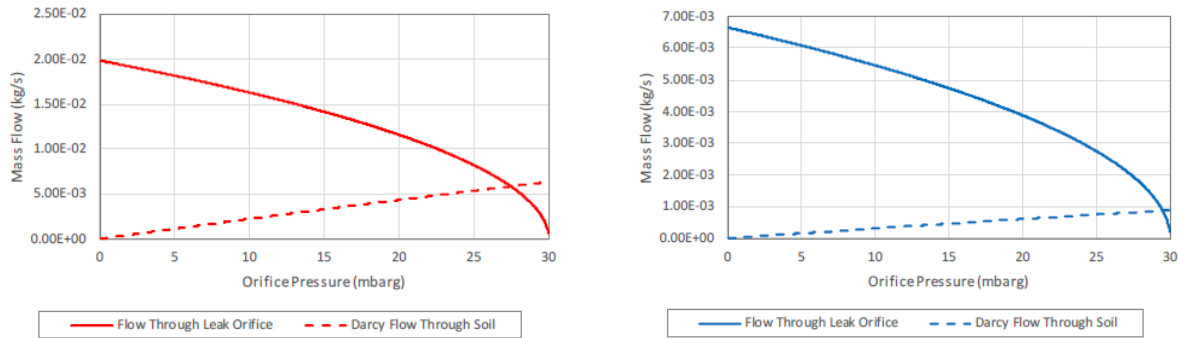


**Figuur 11. Schematische weergave lekkage uit een ondergrondse leiding naar een holte en vervolgens door de ondergrond.**

het de bodem openbreekt in een krater en daardoor in contact komt met de atmosfeer. In het eerste geval wordt de diffusie door de bodem beschreven door zogenaamde Darcy stroming. De uitstroom uit de leiding naar de holte is in principe hetzelfde als in de open lucht, waarbij de omgevingsdruk dan  $P_1$  is in plaats van de atmosferische druk. De stroming door de ondergrond is afhankelijk van de stromingseigenschappen van het gas en de doorlaatbaarheid van de bodem. Deze Darcy flow door de bodem wordt verder behandeld in de volgende sectie.

De uitstroom door het lek neemt evenredig toe met het oppervlak van het lek als deze klein is ten opzichte van de diameter van de leiding. Daarnaast

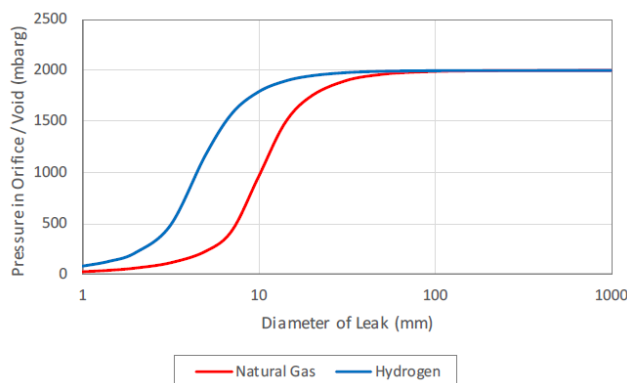
schaalt de stroming door de bodem ongeveer met de *diameter* van het lek. Dit betekent dat als de diameter van het lek kleiner wordt, op een gegeven moment de stroom door het lek kleiner wordt dan de stroom door de bodem, hetgeen uiteraard niet mogelijk zou moeten zijn. Door rekening te houden met een drukverlies door de lek opening zou deze tegenstrijdigheid op gelost moeten worden. Om dit effect verder te onderzoeken, zijn berekeningen gemaakt voor een 50mm gat in een aardgasleiding en waterstofleiding met een druk van 30 mbarg, 1 meter onder de grond en met een typische doorlaatbaarheid van  $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ . De voorspelde stromingen zijn weergegeven in Figuur 12.



**Figuur 12. Variatie massastroom als functie van de grootte van de druk in de opening voor aardgas (links) en waterstof (rechts). 50mm opening in een leiding op 30mbarg 1 meter onder de grond.**

De grafiek laat zien dat de stroming door de bodem toeneemt met een toenemende druk in de opening, terwijl de stroom door de opening afneemt. Beide stromen zijn in evenwicht bij een massastroom van  $5,8 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$  voor aardgas en een druk in de opening van 27,5 mbarg voor aardgas en respectievelijk  $8,8 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$  en 29,5 mbarg voor waterstof. De druk in de holte is bij waterstof dus hoger. In de praktijk betekent dit dat waterstof lekken een grotere kans geven op het openbreken van de grond dan aardgaslekken, bij vergelijkbare lek-grootte en leidingdruk. Eerder experimenteel werk door DNV GL heeft laten zien dat leidingen met drukken tussen 300 mbarg en 2 barg de grond kunnen openbreken. Met een dichtheid van de bodem van  $2000 \text{ kg/m}^3$  en een diepte van 0,75 meter levert ongeveer een tegendruk van 150 mbarg. Een leiding met een druk lager dan 150 mbarg, zoals gebruikt in het lagedruknet in het distributiesysteem, zou daarom hoogstwaarschijnlijk niet de grond kunnen openbreken.

Om het effect van de grootte van het lek op het openbreken van de grond te bestuderen, wordt de druk in de opening ("orifice" of "void") berekend bij een leidingdruk van 2 barg. Het resultaat is hieronder weergegeven voor zowel waterstof en aardgas.



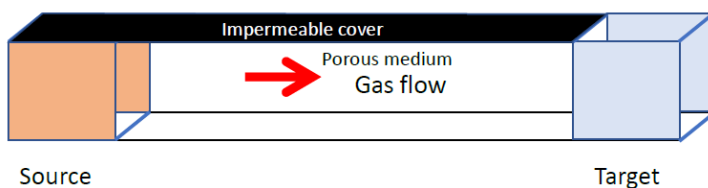
**Figuur 13. Druk in de opening versus de diameter van het gat voor waterstof en aardgas bij een ondergrondse leiding met een druk van 2 barg.**

De druk in de opening is hoger voor waterstof, met name voor groottes tussen de 2 – 30mm. Dit zou betekenen dat de kans voor het openbreken van de grond bij waterstof groter is bij kleine diameters van het gat. Bijvoorbeeld, bij een diameter van 5 mm is de druk voor aardgas in dit voorbeeld 230 mbarg en voor waterstof 1200 mbarg. Als er uiteindelijk een krater ontstaat, is de kans kleiner dat de waterstof door de grond de woningen binnen stroomt met een explosie als gevolg en is de kans op een brand in de open lucht groter. Voor hogere drukken in het gasdistributiesysteem zou kratering dus kunnen optreden. Voor het bepalen van het risico is het dus van belang om het openbreken van de grond als gevoeligheid mee te nemen. Daarnaast wordt dit effect bepaald door de doorlaatbaarheid van de grond, waarbij de waterstof zal diffunderen langs de weg met de minste weerstand. Experimenten zijn noodzakelijk om de parameters die nodig zijn voor de modellen te bepalen. Belangrijke parameters zijn de doorlaatbaarheid van typische bodemsamenstellingen voor waterstof. Naast grondsoorten is ook de invloed van het waterpeil in de grond van invloed. Daarnaast dient gevalideerd te worden of bij lekkage van waterstof eerder kratering optreedt en wat de gevolgen zijn voor het vinden van deze lekken.

## 2.2.4 Experimenteel werk rond uitstroom in ondergrondse leidingen

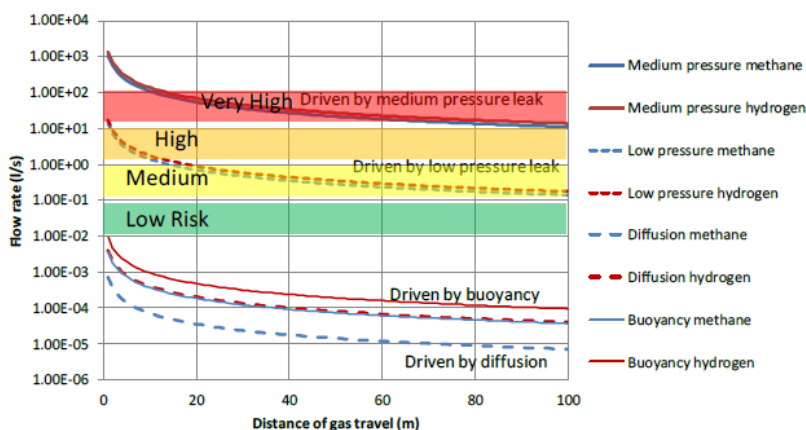
Een aantal referenties rapporteren over experimenten met ondergrondse uitstroom van waterstof uit een distributieleiding.

Atkinson et al [11], beschrijven dat de flow van waterstof van een lek naar een kwetsbaar object, bijvoorbeeld een kelder, benaderd kan worden door onderstaande schema:



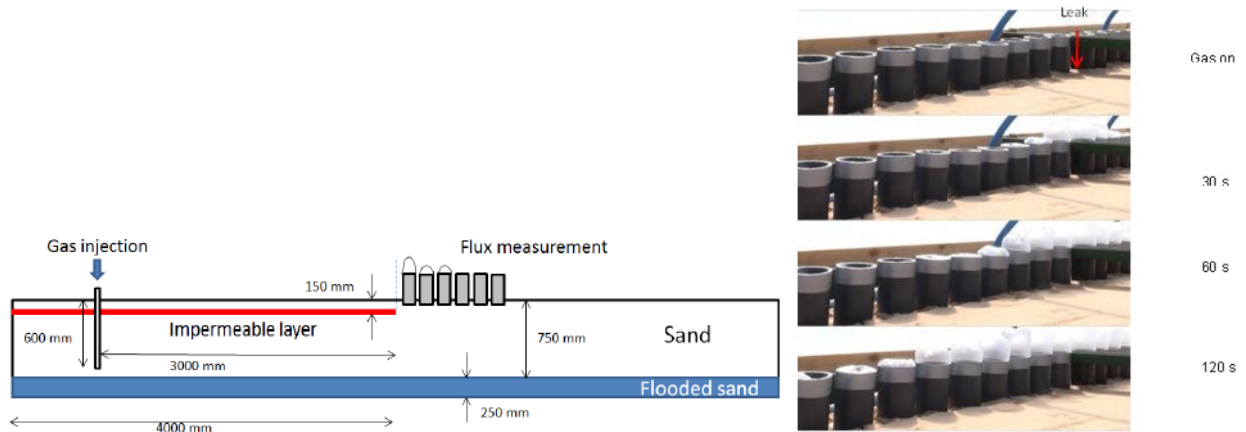
**Figuur 14. Schema stroming waterstof in ondergrond**

Hierbij stroomt het gas door een poreus medium van de bron naar het doel onder een ondoordringbare laag door. De flow wordt bepaald door het drijfvermogen, diffusie en de druk bij het lek. Ondanks dat de diffusie en drijfvermogen (verschil in dichtheid) veel groter zijn bij waterstof, blijkt de flow door het kanaal voor zowel aardgas als waterstof voor beide mechanismen erg klein. De uitkomsten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 15. Als de uitstroom wordt bepaald door de druk bij het lek, ontstaan flows die tot grotere risico's kunnen leiden, al is daarbij het verschil tussen aardgas en waterstof beperkt.



**Figuur 15. Uitstroom als functie van de afgelegde afstand**

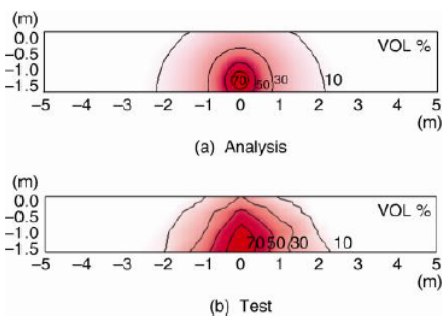
De toename van de afstand waarover waterstof verder verplaatst wordt dan aardgas varieert van enkele meters (bij open grond) tot mogelijk meer dan 100 meter in het geval van een ondoordringbare bovenlaag<sup>7</sup> boven een hoog permeabele sleuf. De berekeningen zijn vervolgens getest in experimenten. Hiervoor is een sleuf van 8x1x1,5 meter gebruikt zoals hieronder schematisch is weergegeven. De waterstof die aan de oppervlakte vrijkomt wordt opgevangen in plastic zakken.



**Figuur 16. Experimentele setup ondergrondse stroming waterstof**

Uit de experimenten blijkt dat de Darcy flow, die ook in de berekeningen gebruikt wordt, goed overeenkomt met de praktijk. De flow schaalt daarmee lineair met de druk en omgekeerd met de viscositeit. Er zijn testen gedaan met aardgas, stikstof en waterstof. Tevens wordt gevarieerd met de hoeveelheid water (regen) in de grond, waarbij een hoger watergehalte resulteert in een lagere flow omdat de grond daarmee minder permeabel wordt. Het water zakt echter naar lagere grondlagen (onder het lek) waarmee de flow weer terugkeert naar de oorspronkelijke waarde.

Okamoto et al [12, 13] beschrijft ook een experiment waarbij een waterstoflekkage onder een laag puin met asfalt wordt bemeaten. In een gebied van 10x10x1,5 meter wordt op een aantal plaatsen ten opzichte van het lek (1000 cc/min met 0,2 kPa) monsters genomen op verschillende diepten waarvan de samenstelling wordt gemeten. Daarnaast is een verplaatsbare detector die tot 0,008 vol% H<sub>2</sub> kan meten gebruikt, zoals deze ook in Japan gebruikt werd voor stadsgas. Ook dit onderzoek vergelijkt de resultaten met berekening van Darcy en Fick stroming en ziet een goede overeenkomst. Uit de resultaten blijkt dat de waterstof relatief eenvoudig door het asfalt ontsnapt. De onderstaande figuur geeft een concentratieverdeling aan na 240 uur.



**Figuur 17. Concentratie opbouw waterstof rond ondergrondse lekkage (model boven, experiment onder)**

<sup>7</sup> De meeste bestratingen, zijn doorlaatbaar. Een bevroren bovenlaag zou wel degelijk ondoorlaatbaar kunnen zijn.

De concentratie gemeten met de gangbare verplaatsbare detector is maximaal 0,2 vol% direct boven het lek. Deze concentratie vervalt tot nagenoeg nul binnen een straal van 2,5m vanaf het lek. Daarmee wordt geconcludeerd dat de huidige lekdetectie methode ook gebruikt kan worden voor waterstof en dat gebruikte modellen gevalideerd worden door de experimenten.


## 2.2.5 Conclusies voor de uitstroom van waterstof

Voor de uitstroom van waterstof in vergelijking met aardgas kan het volgende geconcludeerd worden:

1. Waterstof tast het bestaande aardgasnet niet aan. Er zullen daardoor niet meer lekken ontstaan door waterstof in plaats van aardgas te gebruiken.
2. Het volume aan waterstof dat door een lek uit de leiding stroomt is hoger dan het volume aan aardgas.
  - a. Bij een klein lek (in de orde grootte van een liter per uur of lager) kan de stroming laminair zijn en stroomt er zo'n 30% meer waterstof uit op volumebasis. De energie-uitstroom is 50 tot 60% minder.
  - b. Bij grotere lekken wordt de stroming turbulent en stroomt er 190% meer waterstof uit dan aardgas (op volumebasis). Voor laagcalorisch gas is de energie-uitstroom op bovenwaarde ongeveer gelijk en op basis van onderwaarde iets lager.
  - c. Overige lekkages:
    - i. Als er geen drukverschil bestaat dan kan waterstof door diffusie 210% meer volume verplaatsen
    - ii. Er kan permeatie optreden door de buiswand. Dit gaat 5 keer sneller maar de hoeveelheden zijn gering.
3. Voor ondergrondse uitstroom lijken de experimenten de theorie te ondersteunen. Stroming door de grond, langs de weg van de minste weerstand kan goed beschreven worden met zogenaamde Darcy flow. Bij gelijke drukken lijkt het zo te zijn dat waterstof eerder voor kratervorming kan zorgen dan aardgas. Dit kan vooral optreden bij hogere drukken in het gasdistributiesysteem (>200 mbar) en niet bij lage drukken (<200 mbar). Kratervorming zou gunstig zijn als daarmee de waterstof sneller in de atmosfeer terecht komt en niet ondergronds diffundeert naar gesloten ruimtes. Op basis van het werk van Atkinson kan geconcludeerd worden dat de grootste risico's optreden bij uitstroom bij hogere drukken, tenzij kratervorming optreedt. In deze situatie is de afgelegde weg van het gas onder de grond vergelijkbaar tussen aardgas en waterstof. Het grotere risico voor waterstof wordt dan bepaald door de ophoping van waterstof in gesloten ruimtes, aangezien dat sneller gebeurt en de onderste verbrandingsgrens voor aardgas en waterstof ongeveer gelijk zijn.

Het verdient daarbij de aanbeveling om de volgende punten te overwegen als netbeheerder:

1. Om de verspreiding van waterstof onder de grond beter te kunnen modelleren dient de doorlaatbaarheid van typische grondsamenstellingen rond woningen bekend te zijn. Experimenten voor het bepalen van deze parameters en voor het bepalen van mate van kratervorming zijn hiervoor noodzakelijk.
2. Het verdient de aanbeveling om waterstof niet te transporteren door leidingen met een hoge lekfrequentie (zie Figuur 35). Daar waar toch deze materialen gebruikt worden, zou de frequentie van lekzoeken opgevoerd moeten worden. Aangezien het grootste deel van de huidige lekken geconstateerd worden door een gasluchtmelding, is het van belang dat ook een waterstoflek door een gasluchtmelding geconstateerd kan worden. Odorisatie van waterstof is daarmee van groot belang.

- 
3. Voor lekgrootteverdeling en detectie van waterstof in distributienetten is geen statistiek opgebouwd. De bovengrens van het aantal waterstof lekkages is op dit moment nog niet vast te stellen, als ondergrens kan het aantal lekkages voor aardgas worden aangenomen. Om een goed beeld te krijgen van de verdeling van grootte en frequentie van waterstoflekkages dient een inventarisatie plaats te vinden (bijvoorbeeld door uitnemen van stukken leiding en onderzoek in een meetlaboratorium) en statistiek opgebouwd te worden. De netbeheerder zou de taak naar zich toe kunnen trekken om tijdens pilotprojecten en daarna grootschaligere ombouwtrajecten een database bij te houden van aangetroffen materialen met bijbehorende lekkages. In de eerste periode zou de frequentie van meten hoger moeten zijn om daarmee ook antwoord te kunnen geven op de vraag of lekkages van waterstof bij kleinere lekken ook frequenter optreden. Op basis van deze statistiek kan toekomstig beleid rond onderhoud en toepasbaarheid van materialen verder worden aangescherpt. Een aanzienlijk aantal lekkages (ongeveer 1/6<sup>e</sup>) ontstaat buiten het huidige domein van de netbeheerder in met name de binnenleidingen. Er zal ook hiervoor een protocol moeten worden opgesteld.

## 3 VERSPREIDING EN INSTROOM IN ANDERE RUIMTES

### 3.1 Opbouw van concentraties in open lucht

De uitstroom van een gas neemt toe met het drukverschil. Als echter de verhouding in drukken aan de volgende formule voldoet wordt de uitstroom alleen nog bepaald door de druk in de leiding:

$$\frac{p_{H_2}}{p_{atm}} = \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Waarin  $p_{H_2}$  de druk in de leiding ter hoogte van het lek is,  $p_{atm}$  de buitenluchtdruk en  $\gamma$  de verhouding tussen de warmtecapaciteit voor constante druk ( $C_p$ ) en constant volume  $C_v$  ( $\gamma = C_p/C_v$ ). Voor waterstof is  $\gamma = 1,39$  aardgas is  $\gamma = 1,468$ . Daarmee is de drukverhouding waarbij de uitstroom alleen door de druk in de leiding wordt bepaald 1,89 voor waterstof en voor aardgas 1,93.

Naast de uitstroomhoeveelheid wordt de opbouw van concentraties sterk bepaald door de atmosferische omstandigheden (met name wind, maar ook temperatuur). Het onderste deel van de atmosfeer waarin de releases plaatsvinden, wordt de grenslaag genoemd. De hoogte van de grenslaag (de menghoogte) varieert meestal tussen 200 en 2000 m. De windstroom in deze gemengde laag is bijna altijd turbulent, d.w.z. de beweging van de lucht fluctueert continu in snelheid en richting vanwege de aanwezigheid van wervelingen. Deze turbulente wervelingen zijn zeer effectief in het verspreiden van waterstof in de lucht, een factor van minstens 1000 effectiever dan moleculaire diffusie. Zelfs voor stilstaande lucht, is onder stabiele omstandigheden turbulentie aanwezig als gevolg van temperatuurverschillen in de atmosfeer die luchtbewegingen veroorzaken.

Gassen die met hoge snelheid vrijkomen, zullen jets veroorzaken waardoor het gas zich snel verplaatst in de richting van de uitstroom. Dit soort jets kunnen voorkomen bij lekkages in vrijliggende leidingen in het hogedruk net of bij het afblazen daarvan. Zolang de snelheid in de jet hoog is in vergelijking met snelheden in de omgevingslucht, wordt de mate van mengen in de jet alleen beïnvloed door de eigenschappen van de jet zelf. Het snelheidsverschil tussen de jet en de (relatief rustige) omgevingslucht, genereert turbulentie op kleine schaal waardoor de straal zich zijwaarts verspreidt. De snelheid in de straal vermindert (ongeveer omgekeerd evenredig met de afstand tot het loslaatpunt) en ten slotte zal de snelheid zodanig worden verlaagd dat diffusie het overneemt.

Aardgas of waterstof dat vrijkomt in de atmosfeer zal stijgen omdat;

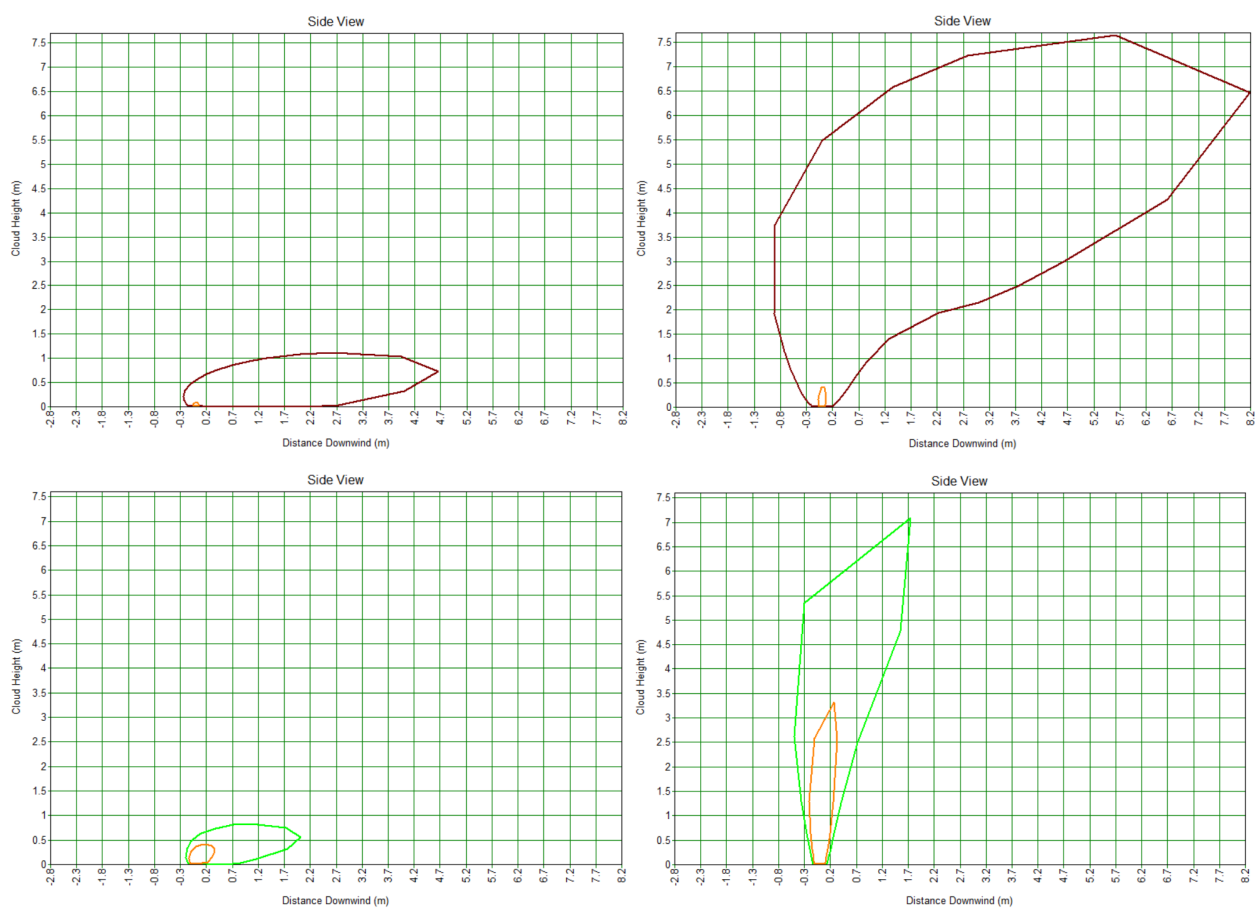
1. het gas lichter is dan lucht en/of
2. het gas een opwaartse impuls bevat.

Theoretisch, in een neutraal of onstabiel gelaagde atmosfeer, zal het materiaal blijven stijgen maar vanwege vermenging zal het volume waarover drijfvermogen en/of momentum wordt verdeeld toenemen en dit zorgt ervoor dat de snelheid van stijgen snel afneemt. Wanneer de verticale beweging van de pluim van dezelfde grootte is als de turbulente beweging zal de pluim zijn uiteindelijke hoogte bereikt hebben.

DNV GL [14] heeft in opdracht van Alliander een risicoanalyse uitgevoerd voor een waterstof distributieleiding in vergelijking met een aardgas distributieleiding. Hierbij is gebruik gemaakt van het door het RIVM voorgeschreven Safeti-NL-model. Dit model is met name bedoeld voor hogedruk leidingen, maar is in de studie gebruikt voor lagedruk distributieleidingen. Naast de voorspelde warmtestraling van een volledige leidingbreuk, die lager ligt dan die van aardgas, wordt ook de uitstroomconcentratie gemodelleerd. Figuur 18 laat de contour voor de onderste en bovenste verbrandingsgrens zien voor waterstof en aardgas bij een lekkage van een leiding met een druk van



100 mbar en 8 bar. Hierbij is een zijwind van 9 m/s aangenomen. Bij deze waarde zal de warmtestraling op afstand maximaal zijn. De wolk voor aardgas en waterstof komen ongeveer even hoog, waarbij de wolk voor waterstof breder is. De hogere UFL heeft voor de grafieken geen invloed. Door de grotere range in de verbrandingsgrens is de contour voor waterstof groter dan voor aardgas. De hoogte van beide uitstromen is vergelijkbaar. In hoofdstuk 5 wordt verder ingegaan op de gevolgen bij de ontsteking van een dergelijke uitstroom.



**Figuur 18. Waterstof (boven) en aardgas (onder) uitstroom wolken, voor 100mbar (links) en 8bar (rechts). De buitenste kring is de onderste verbrandingsgrens, de binnenste is de bovenste verbrandingsgrens.**

Verspreiding over vlak terrein met homogene ruwheid waarvan de individuele ruwheidselementen kleiner zijn dan de hoogte van de wolk, is vrij goed te omschrijven. De stroom en verspreiding rond individuele obstakels of groepen van obstakels zijn veel moeilijker te beschrijven en op een algemene manier te kwantificeren. Obstacleffecten zijn echter belangrijk. Een vuistregel om in te schatten wanneer daar rekening mee gehouden moet worden is dat de kleinste waarde van hoogte of breedte (in zijwindrichting) groter is dan 0,5 tot 1 maal de lokale wolkhoogte.

Achter obstakels ontstaat een zogenaamde recirculatiezone, doordat de wind hier wervels creëert. Deze zone kan zich uitstrekken tot ongeveer 10 keer de obstakelhoogte. Vanwege verhoogde turbulentie achter het obstakel, is de maximale concentratie op grondniveau. Dichter bij obstakels kan echter geen algemene trend worden aangegeven: ook een toename van de concentratie is mogelijk met zelfs een factor 2. Uit bovenstaande simulaties blijkt dat de hoogte van de wolk bij 8 bar, 7,5 meter is. In deze situatie zou een recirculatiezone kunnen ontstaan, voor zowel aardgas als waterstof. Voor lagere druk, bijvoorbeeld 100 mbar in het lagedruk net, lijkt dit minder waarschijnlijk.

## 3.2 Opbouw van concentratie in gesloten ruimtes

In het kader van Hysafe [15] en Hyhouse [16] is door verschillende groepen onderzoek gedaan naar de gevolgen van waterstofuitstroom in gesloten ruimten. Hoewel er natuurlijk verschillen zijn in de configuratie van de afgesloten ruimte en de instroomcondities komt er wel een gelijkkluidend beeld uit de experimenten:

1. Aanvankelijk ontstaan hogere concentraties waterstof boven in de ruimte
2. Door diffusie vermengt deze laag zich met de lucht die er zich onder bevindt en vormt een homogeen mengsel.

Ventilatie door natuurlijke trek of mechanische ventilatie beïnvloedt de opgebouwde waterstofconcentratie. Dit kan door de geometrie zowel hogere als lagere concentraties opleveren.

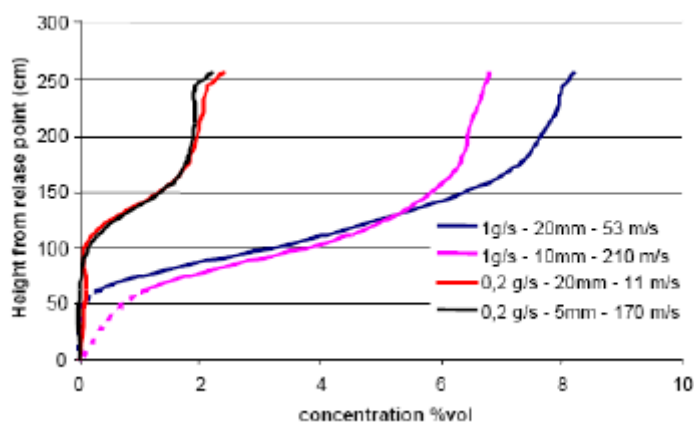
Veel van de experimenten zijn uitgevoerd in samenhang met CFD (Computed Fluid Dynamics) berekeningen. Het blijkt dat, onder de voorwaarde van voldoende nauwkeurigheid in de berekening (discretisatie) en een nauwkeurige vastlegging van het experiment (onder andere lekstromen, randverschijnselen, temperatuurverschillen), de modellen de experimenten goed kunnen beschrijven (afwijkingen van maximaal 2 à 3 % worden daarbij bereikt).

### 3.2.1 Experimenten

Hieronder wordt een aantal karakteristieke experimenten beschreven.

#### Lacome et.al. (2011) [15]

In het kader van Hysafe zijn door Lacome et.al. [15] metingen gedaan aan uitstroom van waterstof en helium in een isotherme, afgesloten (niet geventileerde) ruimte, met constante druk. De experimenten werden uitgevoerd in een garage-achtige situatie met afmetingen 7,2x3,78x2,88 m, met behulp van waterstof en helium voor een massastroom van H<sub>2</sub> variërend van 0,2 g/s tot 1 g/s (volumestroom van 2,3 tot 11,5 l/s) gedurende 240 s releasetijd. De diameter van de opening varieerde van 5 tot 20 mm. De uitstroom was verticaal omhoog vanaf het horizontale midden van de garage, 0,265 m boven de grond. De waterstofconcentratie werd gemeten op 12 posities over een periode van 90 minuten. De experimenten toonden aan dat een (horizontaal bijna homogene) verticale laag waterstof/luchtmengsel zich snel ontwikkelt, dicht bij het plafond. Verticale concentratieprofielen (zie figuur) laten zien dat waterstofconcentraties tamelijk homogeen zijn in de gevormde laag nabij het plafond.



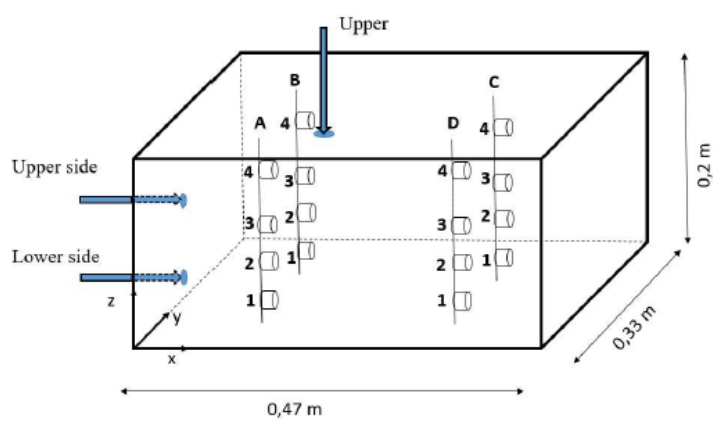
**Figuur 19. Verticaal concentratieprofiel aan het einde van afgifte (na 240 s) voor verschillende afgiftesnelheden, volgens Lacome et al. [15]**

### De Stefano e.a. (2019) [17]

In verband met mogelijke waterstoflekage in werkruimtes in een kerncentrale zijn door De Stefano e.a. experimenten uitgevoerd in een schaal model met waterstof (zie Figuur 20).

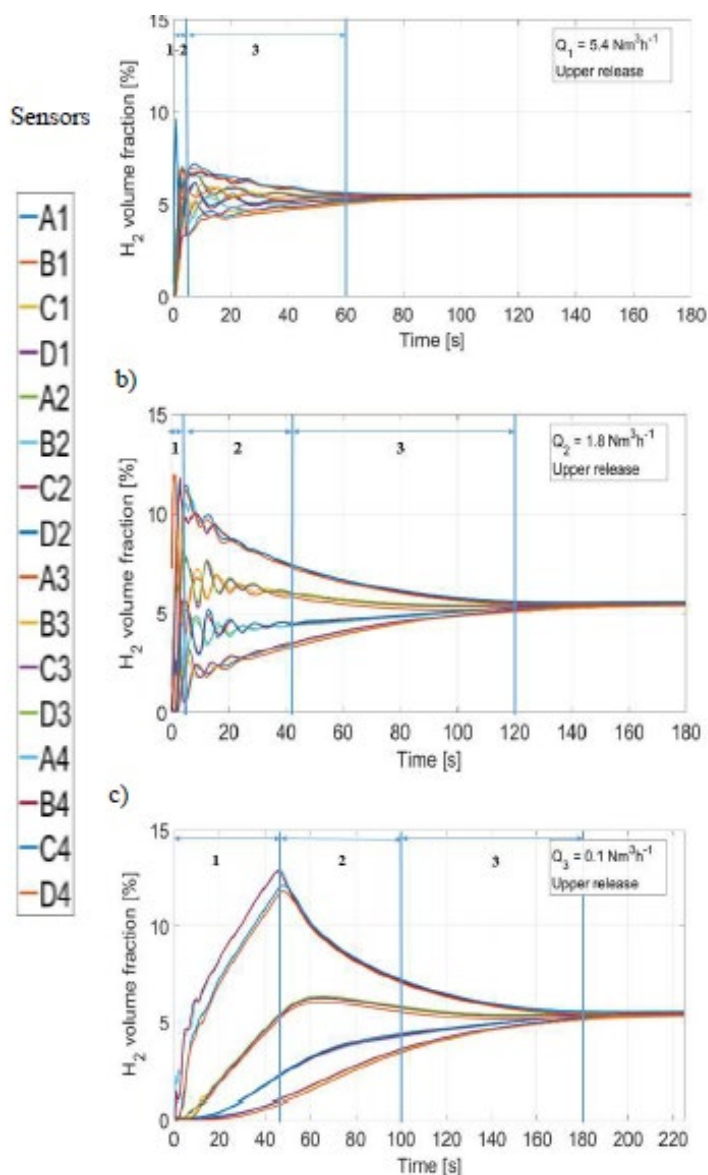
Op drie verschillende locaties zijn met drie verschillende stroomsnelheden (laminair, transitie (tussen laminair en turbulent) en turbulent) experimenten gedaan. Er worden drie perioden onderscheiden:

1. De injectietijd. Deze is zo gekozen dat de eindconcentratie voor alle experimenten (ongeveer) gelijk is.
2. De diffusieperiode waarin waterstof zich met lucht mengt
3. De homogenisatieperiode.



**Figuur 20. Setup experimenten De Stefano et al. [17]**

De gemeten waterstofconcentraties op de verschillende meetpunten uit Figuur 20 worden weergegeven in Figuur 21.



**Figuur 21. Gemeten waterstofconcentratie in experimenten van De Stefano [17]**

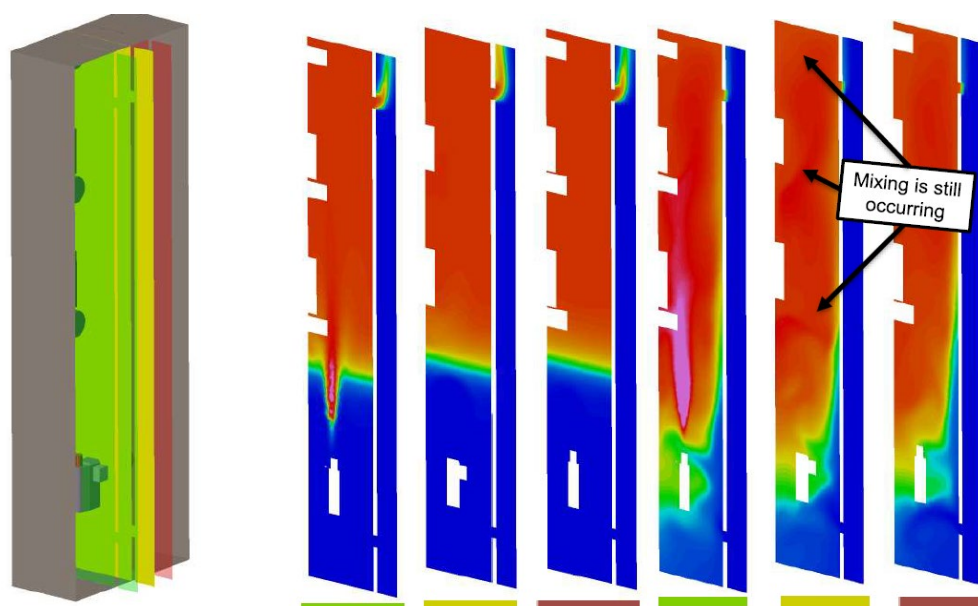
Het onderzoek laat zien dat de concentratie in de (niet geventileerde) ruimte op verschillende meetplekken initieel varieert, maar na verloop van tijd hetzelfde wordt. Met andere woorden, de waterstof zal mengen en zich homogeen over de ruimte verspreiden. Bij lage uitstroomvolumes duurt dit proces het langst.

### **DNV GL (2020)**

DNV GL [18] heeft in opdracht van Alliander verkennende experimenten uitgevoerd naar de verspreiding van waterstof in een meterkast. Hiervoor is een, conform het bouwbesluit, standaard meterkast gebouwd. In de kast is op verschillende hoogten de waterstofconcentratie in de tijd gemeten bij verschillende lekgroottes (van 1 l/h tot 25 l/h). In de deur van de meterkast zijn ventilatieopeningen gemaakt. Zonder ventilatie loopt de concentratie waterstof op tot 4 vol% boven het lek, waarna de test afgebroken wordt. Voor de metingen met ventilatie vakt de concentratie boven in de kast af op 2 vol%. In deze metingen valt ook een golvend patroon van de gasconcentratie halverwege de hoogte van de meterkast op. Dit verschijnsel zou verklaard kunnen worden door een schoorsteeneffect in de kast via de

ventilatieopeningen waarbij de opwaartse stroom kan fluctueren en daarmee de ontstane gas concentratie ook.

De metingen worden ondersteund door CFD-berekening van dezelfde situatie zoals die gemodelleerd zijn door NRG [19]. De modelling bij een constante temperatuur laat zien dat de waterstof (en het aardgas) ophoopt boven in de meterkast. Door het toevoegen van een warmtebron (aan de wand) ontwikkelt zich een stroming in de meterkast die ook de experimenteel gevonden variatie kan verklaren. Uit zowel de eerste verkennende metingen en de simulaties blijkt dat het precies voorspellen van de concentratie opbouw en dynamiek van de opbouw mogelijk is als de randvoorwaarden duidelijk bekend zijn. De aanwezigheid van andere objecten, al dan niet met verschillende temperaturen, kan de stroming van het gas in de meterkast dus sterk verstoren. Te denken valt dan bijvoorbeeld aan computerapparatuur en routers of obstakels zoals planken.



**Figuur 22. CFD-berekeningen voor een lekkage in de meterkast met ventilatie. De drie situaties links laten opbouw van de concentratie zien bij constante temperatuur, aan de rechterkant de situatie met temperatuurverschillen in de meterkast. [19]**

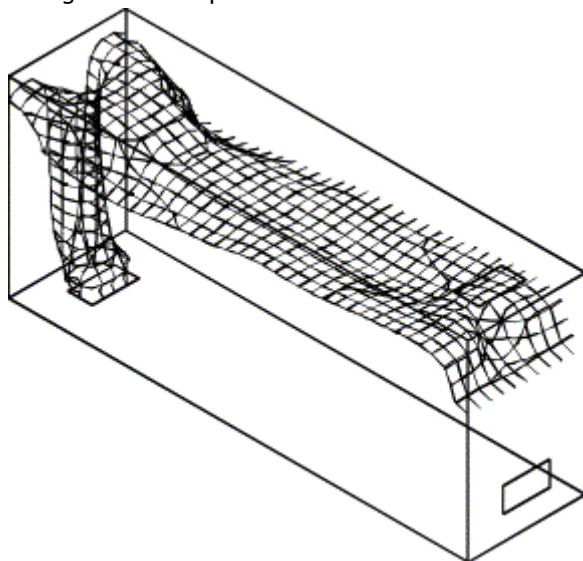
### 3.2.2 Grootte van ruimtes

Er zijn grofweg vier soorten ruimten waarin waterstof kan instromen en zich kan ophopen tot een explosief mengsel. Dit gebeurt op soortgelijke wijze als bij aardgas.

- In de meterkast kan door een lek bij de meter of de appendages een uitstroom ontstaan die zich in de kast verzamelt. Door de lagere dichtheid verzamelt de waterstof zich boven in de ruimte. Door het dichtheidsverschil ontstaat een drukverschil tussen de ventilatieruimte onder en boven in de kast en stroomt de waterstof boven uit de kast. Afhankelijk van de grootte van het lek en de ventilatieopeningen kan er een overschrijding van de onderste explosiegrens voordoen. Omdat aardgas zwaarder is dan waterstof zal dit effect minder groot zijn bij gelijke volumelekkage in de meterkast. Indien echter een even groot lek aanwezig is zal er drie keer zoveel waterstof de kast instromen en wordt dit verschil tenietgedaan. De waterstofconcentratie zal daardoor in de meterkast en daarbuiten hoger zijn dan van aardgas. Dit wordt ook bevestigd in [20]. Overigens zijn er naast de in normalisatie vastgelegde eisen aan een meterkast heel veel andere mogelijkheden waar een gasmeter is opgehangen.
- Er kan zich ook waterstof verzamelen in de kruipruimte van een woning, enerzijds omdat er zich eventueel leidingen in de kruipruimte bevinden en anderzijds via penetratie door de bodem vanuit de distributieleidingen (door dichte bestrating en eventuele vorst). Ook de kruipruimte wordt echter geventileerd zodat de waterstof kan verdwijnen.

Deze ventilatie bevindt zich echter niet geheel bovenin waardoor een schoorsteen effect door het dichtheidsverschil niet kan optreden. Aangezien bij een gelijk lek de uitstroom driemaal zo groot is zal de waterstofconcentratie (veel) hoger zijn vergeleken met aardgas.

- Naast kruipruimtes kan er zich ook waterstof ophopen in kelders<sup>8</sup>. Aangezien deze een groter volume hebben kunnen de gevolgen veel groter zijn.
- Doorstroming naar andere ruimtes, bijvoorbeeld vanuit de meterkast in de hal. Dit is ook onderzocht in CFD-berekeningen [20]. In de figuur hieronder is hiervan een voorbeeld gegeven van een dergelijke berekening. Het toont de effecten van waterstoflekkage van een hal. De waterstof lekt uit de vloer aan het ene uiteinde van de gang, terwijl er twee openingen aan het andere einde van de gang zijn. De ene opening bevindt zich in het plafond en de andere opening bevindt zich onderaan de deur aan het einde van de gang. Er ontstaat na 300 seconden een stabiele situatie. Met het rooster is de 3% grens aangegeven. Ook blijken heliumconcentraties een goede voorspeller van waterstofconcentraties.




**Figuur 23. Voorbeeld van CFD-berekening voor verspreiding van waterstof in een hal [20]**

### 3.3 Conclusies en aanbevelingen verspreiding waterstof

De belangrijkste conclusies voor het verspreiden van waterstof na lekkage en de consequenties voor netbeheerders zijn:

1. Voor de verspreiding van waterstof in de openlucht geldt dat door de lagere dichtheid het gas sneller zal opstijgen. In vergelijking met aardgas zal dit niet tot hogere risico's leiden. Bij gelijke drukken is de energie-uitstroom bij een lekkage in de openlucht nagenoeg gelijk aan die van aardgas. De contour van de gaswolk is vergelijkbaar met die van aardgas (met een iets lagere LEL). Wel dient opgemerkt te worden dat de gebruikte methodiek daarvoor met name voor hogere drukken (transmissie) ontwikkeld is en niet voor de drukken in het distributienet.
2. Uit de gevonden experimenten en CFD-simulaties blijkt dat bij een lekkage waterstof zich in een gesloten ruimte eerst boven in de ruimte ophoopt en vervolgens mengt tot een homogeen mengsel. Daarnaast kan het gas ontsnappen naar naastgelegen ruimtes. Het ontsnappen van het gas naar nabijgelegen ruimtes is in principe gunstig: een lek zal eerder geroken worden en de concentratie in de ruimte waar het gas ontsnapt zal verlagen. Hierbij wordt er wel vanuit gegaan dat het gas geodoriseerd is. Bij gelijke lekgrootte zal aardgas met een kleinere volumestroom de

<sup>8</sup> Door lekkage van een hoofd- of aansluitleiding en migratie door de bodem, of lekkage van een binnenleiding.



gesloten ruimte instromen en daarmee minder hoge concentraties opbouwen. De snellere verspreiding van waterstof kan dit effect niet altijd compenseren.

3. Computersimulaties (CFD) kunnen de verspreiding van het gas in ruimtes goed beschrijven als alle randvoorwaarden bekend zijn: obstakels zoals bijvoorbeeld plankjes in meterkasten, (ventilatieopeningen) en vooral temperatuurverschillen beïnvloeden de stroming van het gas. Voor meterkasten betekent dit bijvoorbeeld dat er, ondanks voorgeschreven standaarden, er in de praktijk veel verschillende situaties kunnen optreden. Apparatuur in meterkasten (modems/routers etc.) produceren warmte die de stroming van het gas sterk beïnvloedt.

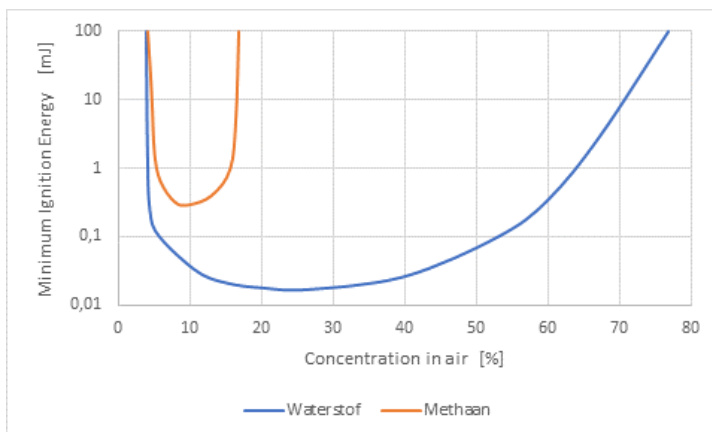
Het verdient daarom de aanbevelingen om:

Bij de ombouw van aardgas naar waterstof, ruimtes in huizen waar waterstof kan ophopen (meterkasten, kelders, kruipruimtes) goed in kaart te brengen. Deze input kan gebruikt worden om verspreidingsmodellen in woning te optimaliseren. Daarnaast zullen deze modellen ook gevalideerd moeten worden. Door middel van ventilatie kan de concentratie weer naar beneden gebracht worden. Vastgesteld moet worden hoe ventilatie het best toegepast kan worden.



## 4 KANS OP ONTSTEKING

Het risico op ontsteking is hoofdzakelijk afhankelijk van twee aspecten, 1) het ontstaan van een brandbaar mengsel van gas en lucht, en 2) de aanwezigheid van een ontstekingsbron met voldoende ontstekingsenergie. Deze twee aspecten hebben een onderlinge afhankelijkheid die in onderstaande figuur is weergegeven. De benodigde ontstekingsenergie voor waterstof is voor vrijwel iedere verhouding met lucht lager dan bij aardgas. Daarnaast zijn de verhoudingen van gas en lucht waarbinnen een brandbaar mengsel mogelijk is veel wijder voor waterstof. Dit zijn de zogenaamde onderste en bovenste brandbaarheidsgrenzen (in het Nederlands de explosiegrenzen: LEL en UEL). In het Engels worden deze aangegeven met de Lower en Upper Flammability Limit (LFL en UFL). Daarnaast wordt voor waterstof soms ook een Detonation Limit gegeven. (18,3 en 59 vol% in lucht voor waterstof). Andere relevante ontstekingseigenschappen van waterstof en methaan zijn weergegeven in Tabel 1. Het ontstaan van een brandbaar mengsel en de aanwezigheid van ontstekingsbronnen wordt hieronder verder behandeld.



**Figuur 24. Minimale ontstekingsenergie van waterstof en methaan bij verschillende concentraties in lucht. Dit geldt voor deflagratie. Voor detonatie liggen de ontstekingsenergieën een factor  $10^8$  hoger.**

**Tabel 1 Ontstekingseigenschappen van waterstof en methaan [21]**

	Waterstof	Methaan
<b>Zelfontbrandingstemperatuur</b>	520 °C	630 °C
<b>Onderste explosiegrens LEL</b>	3,9% volume in lucht	5,3% volume in lucht
<b>Bovenste explosiegrens UEL</b>	75% volume in lucht	17% volume in lucht
<b>Stoichiometrisch mengsel</b>	29,5% volume in lucht	9,5% volume in lucht
<b>Dichtheid in verhouding met lucht (STP)</b>	0,07	0,55
<b>Minimale ontstekingsenergie (bij stoichiometrische mengsel)</b>	0,017 mJ	0,274 mJ

### 4.1.1 Ontstekingsbronnen en ontstekingsenergie

Ontsteking kan ontstaan met de aanwezigheid van een energiebron. Dit kan zijn: hitte, elektrische vonken, een chemische reactie, maar ook compressie. De externe energie zorgt ervoor dat een kettingreactie in gang wordt gezet tussen het gas en de zuurstof welke uiteindelijk het gehele brandbare mengsel doet ontsteken. De minimaal benodigde energie is bekend, maar het blijft lastig in te schatten hoe de reactie zal gaan verlopen onder verschillende omstandigheden. Er zijn daarnaast tal van mogelijkheden en bronnen van ontsteking die hieronder worden toegelicht. Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen ontsteking door zelfontbranding en ontsteking door een externe bron.

## Ontsteking door zelfontbranding

Met zelfontbranding wordt het ontbranden van waterstof bedoeld zonder dat daar externe ontstekingsbronnen bij aanwezig zijn. Dit kan zijn, door ontstekingscondities die zijn ontstaan door de waterstof of het lekken van waterstof zelf. Over het spontaan ontbranden van waterstof bestaan verschillende theorieën. Het Health and Safety Laboratory (HSL) in de VK heeft een aantal onderzoeken gedaan naar het voorkomen van spontane ontbranding van waterstof en de potentiële achterliggende mechanismen hiervoor. In 2005 [22] en 2008 [23] is op basis van literatuur, onderzoek gedaan naar zelfontbranding door:

1. Joule-Thomson expansie;
2. compressie;
3. plotseling decompressie.

De eerste 2 punten blijken op zichzelf onwaarschijnlijk om voor een ontsteking te zorgen bij atmosferische condities.

1. Het Joule-Thomson effect geeft bij een daling van zo'n 500 bar naar atmosferisch en bij 9°C een temperatuurstijging van 9-18 °C, wat nog ver van de zelfontbrandingstemperatuur van 520°C ligt. In het distributienet zal dit effect door de lagere drukken nog minder zijn.
2. Ter benadering wordt in de studies met een ideaal gas gerekend, waarbij een compressiefactor van 80 een temperatuurstijging van 750°C oplevert. Hoewel deze temperatuur hoger is dan de zelfontbrandingstemperatuur van waterstof is de compressiefactor vele malen hoger dan wat in de praktijk wordt toegepast. Daarnaast is er een mengsel van waterstof en lucht nodig om tot gevaarlijke situaties te komen, wat in een waterstofdistributienetwerk niet voor zal komen.

Het laatste punt zou mogelijk wel een potentieel ontstekingsmechanisme kunnen zijn. In 2011 is hierop voortgebouwd door middel van experimenteel onderzoek [24]. Hierin is gekeken of een plotselinge decompressie zorgt voor de ontsteking van waterstof. Er is geconcludeerd dat plotselinge decompressie door, in dit voorbeeld een breeschijf, zelfontbranding tot gevolg kan hebben en dat dit ook sterk afhankelijk is van de druk en de downstream geometrie van de leiding. Dit wordt ook door een aantal andere experimentele onderzoeken onderbouwd [25] [26]. De experimenten zijn uitgevoerd met 85 variaties op druk en downstreamgeometrie, maar de laagste druk waarbij ontsteking plaats vond was 35,5 bar. Hoewel niet uitvoerig experimenteel bewezen lijkt dit daarom niet een direct risico te vormen bij lagere drukken in het gasdistributienet.

## Ontsteking door externe bronnen

Voor bij externe ontstekingsbronnen zijn er ontelbare opties. In theorie zou ieder voorwerp waarbij een vlam of vonk vrijkomt met voldoende energie een ontsteking kunnen veroorzaken. In een proefschrift aan de Loughborough University wordt onderzoek gedaan naar de minimale ontstekingsenergie en kans op ontsteking van methaan, waterstof en mengsels [27]. Hierin worden enkele veel voorkomende ontstekingsbronnen genoemd en hun ontstekingsenergie.

Voor bronnen in de buitenlucht valt er te denken aan voertuigen, graafschade en mechanische vonken, elektrische en elektrostatische bronnen, gereedschap, bliksem, vlammen en hete gassen, vonken door impact (bijvoorbeeld stenen of metaal dat tegen elkaar aan slaat) en andere bronnen als elektromagnetische straling, compressie, katalytische reacties of hete oppervlakken.

In stevige sneeuwstormen zouden ook statische ontladingen kunnen voorkomen, maar bij de hier beschouwde situaties waarbij explosieve mengsel ontstaan (ruimtes binnen) zullen sneeuwvlokken geen ontstekingsbron vormen.

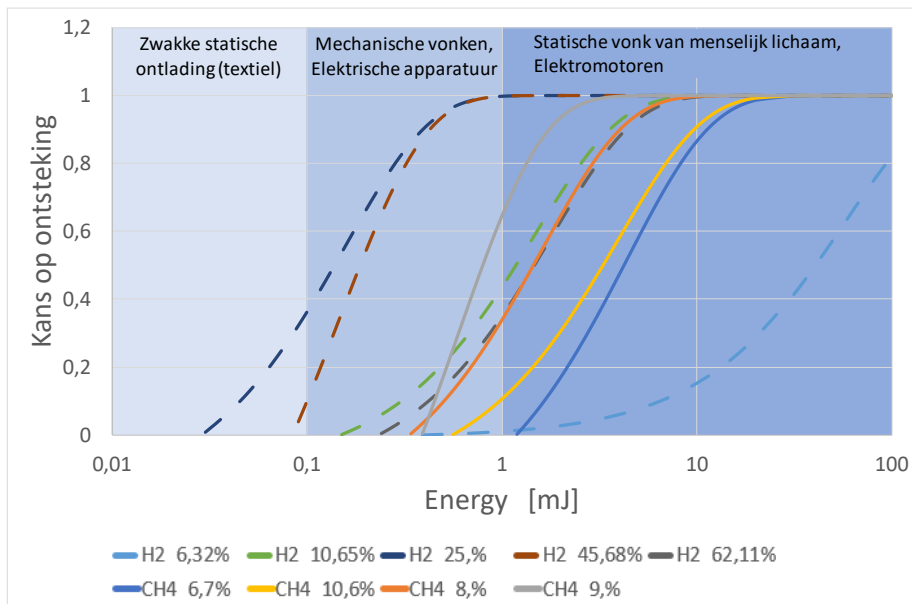
Voor binnen valt er te denken aan (waak)vlammen, lampen, roken, statische elektriciteit, (mobiele) telefoons, beschadigde/ontblote kabels of elektrische apparatuur zoals stofzuigers, koelkasten, televisies, föhns, deurbellen, schakelaars etc.

Het wordt duidelijk hoe omvangrijk de lijst van ontstekingsbronnen kan worden. De tabel hieronder geeft een overzicht van de verschillende mechanismen die te vinden zijn bij bovengenoemde bronnen, en de vrijkomende energie.

Bron	Energie [mJ]	Voorbeeld
<b>Vlammen, chemische bronnen en grote hete oppervlakken</b>	100-1000	Waakvlam, kaars
<b>Statische vonken, ontlading van elektrodes/koolborstels</b>	1-100	Statische vonk van menselijk lichaam, Elektromotoren
<b>Mechanische vonken, zwerfstromen en kleine hete oppervlakken.</b>	0,1-1	Elektrische apparatuur, sigaret
<b>Zwakke statische ontlading</b>	0,01-0,1	Ontlading van textiel

**Tabel 2. Ontstekingsbronnen en voorbeelden. Het verschil in minimale ontstekingsenergie zorgt ervoor dat de laatste categorie (0,01-0,1 mJ) tot ontsteking van waterstof zou leiden maar niet voor aardgas.**

In [27] wordt op basis van een groot aantal experimenten (met een elektrische vonk als ontsteking) de kans op ontsteken van aardgas-waterstofmengsels in lucht bepaald. In Figuur 25 zijn de resultaten hieruit voor 100% waterstof in lucht en 100% methaan in lucht samengebracht. Voor concentraties net boven de onderste verbrandingsgrens (tussen 6% en 7%) is de kans op ontsteken voor aardgas significant hoger. Voor concentraties tussen 10% en 62% ontsteekt waterstof met lagere energieën dan aardgas.




**Figuur 25. Kans op ontsteking voor verschillende concentraties van aardgas (doorgetrokken lijnen) en waterstof (stippellijnen) in lucht als functie van de ontstekingsenergie.**

Toch is er nog veel onzekerheid of dergelijke bronnen daadwerkelijk een gevaar voor ontsteking vormen. Als voorbeeld worden hieronder enkele applicaties verder uitgewerkt.

**Roken-** Een brandende sigaret heeft voldoende energie om een ontsteking te veroorzaken bij zowel aardgas als bij waterstof. Toch blijkt uit testen met aardgas dat enkel het aansteken met een aansteker of lucifers tot ontbranding heeft geleid en dat het smeulende uiteinde van een sigaret in geen gevallen tot ontsteking heeft geleid [27]. Het is onduidelijk of dit bij waterstof ook zo zal zijn.

**Telefoons-** Telefoons worden over de hele wereld beschouwd als potentiële ontstekingsbronnen op locaties waar gassen aanwezig zijn (petrochemische industrie, gastransport/distributie, tankstations). Uit testen is echter gebleken dat ontsteking door telefoons in welke vorm dan ook hoogst onwaarschijnlijk is. Experimenten met mobiele telefoons, in het ergste geval van directe kortsluiting over de batterijpolen heeft nooit tot ontsteking geleid. In 2006 is een studie gedaan naar verschillende mobiele telefoons en hun risico op ontsteking [21]. Hierin worden verschillende manieren onderzocht waarop een telefoon kan dienen als ontstekingsbron, waaronder radiofrequenties. Hoewel niet duidelijk wordt of ontstekingsrisico door een telefoon verwaarloosbaar is, wordt het risico op ontsteking door radiofrequenties als één van de kleinsten geschat. Het laten vallen van de telefoon en de impact met de grond, of het loskoppelen van de batterij wordt veel groter geschat. Daarnaast zou een optredend defect, zoals oververhitting van de batterij (Li-Ion) verreweg de meeste energie genereren, al zou de kans dat dit gelijktijdig gebeurt met een gaslek vrij klein zijn.

**Elektrische apparatuur-** In theorie zijn zelfs batterij gevoede apparaten risicovol voor een ontsteking bij zowel aardgas als waterstof doordat ontkoppeling van de batterij een vonk kan veroorzaken. Enkele huishoudapparaten zijn getest (op hun hoogste spanningsniveau) maar leidden niet tot ontsteking [27]. De theorie hierachter is dat de "vonk producerende" apparatuur is afgeschermd en dat het gas hier niet binnendringt of dat de vlam na binnendringen en ontsteking niet naar buiten kon treden. Hier is echter weer een hoge onzekerheid hoe dit in een situatie met waterstof zou gaan, aangezien waterstof gemakkelijker kan



binnendringen/penetreren. Daarnaast is er nog een hoge onzekerheid dat de apparatuur voldoende is afgeschermd.

In andere studies, zoals een experiment dat in 2004 is uitgevoerd [28], worden proeven uitgevoerd met elektrische apparatuur (lichtschakelaar, stofzuiger, plafond/trekschakelaar en een garagedeuropener). Uit de tests blijkt dat de stofzuiger en plafondschaakelaar tot een ontsteking kunnen leiden. Hierbij zijn echter enkel waterstofmengsels tot 10% in lucht getest (hogere energie nodig bij deze verhoudingen). Uit Figuur 25 blijkt dat voor hogere concentraties (tot 62%) de kans op ontbranding groter is.

Er is nog veel onzekerheid over de mogelijke ontstekingsbronnen en hoe die verschillen in een situatie met waterstof ten opzichte van aardgas. Het is niet duidelijk of een explosief mengsel ook daadwerkelijk zal ontsteken en er is op dit gebied nog weinig statistiek. In veel situaties zullen bronnen aanwezig zijn die zowel een gevaar zijn voor ontsteking van aardgas als voor waterstof. Vonken en andere bronnen met een energie tussen 0,017 mJ en 0,274 mJ vormen voor waterstof in lucht met concentraties boven 10%, een extra categorie van ontstekingsbronnen ten opzichte van aardgas.

## 4.2 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de beschikbare informatie kan geconcludeerd worden dat ten aanzien van de kans op ontsteken:

1. De minimale ontstekingsenergie van waterstof in lucht een factor 16 lager is dan voor aardgas, voor beide gassen bij een stoichiometrisch mengsel. Voor dit mengsel (29% waterstof in lucht,) zijn ontstekingsbronnen met zwakke statische ontlading in principe voldoende om het mengsel te doen ontbranden. Mengsels met lage concentraties, tot ongeveer 8 – 10 %vol hebben een lagere kans op ontsteken dan aardgas. Vonken veroorzaakt door elektrische apparatuur of schakelaars zijn echter voldoende om zowel aardgas als waterstof ook bij deze lage concentraties te doen ontsteken.
2. Er is in de literatuur geen eenduidig beeld over welke bronnen wel of niet tot ontsteking leiden: ook ontstekingsbronnen met (in theorie) voldoende energie blijken niet altijd een brandbaar mengsel te ontsteken.

Dit leidt tot de volgende aanbevelingen.

1. Er dient meer onderzoek gedaan te worden naar de ontstekingsbronnen en de kans op ontsteken voor waterstofmengsel bij verschillende concentraties. Daarbij valt te denken aan brandende sigaretten, vonken van apparatuur (in de meterkast: elektriciteitsmeter, routers en dergelijke), gereedschap (staal op staal, brons op staal en dergelijke)
2. Als brandbare mengsels van hogere percentages ontstaan (>10 vol%) dan kan waterstof ontstoken worden met ontstekingsbronnen die te zwak zijn om aardgas te doen ontsteken. Onderzocht moet worden of het mogelijk is om, indien concentraties boven de 10% gemeten worden, de elektriciteit (vonkvrij) afgesloten kan worden.

## 5 GEVOLGEN ONTBRANDING OF EXPLOSIE

Als een brandbaar mengsel met voldoende energie wordt ontstoken zal het mengsel gaan verbranden. Bij de verbranding komen rookgassen en warmte vrij die in een gesloten ruimte kunnen zorgen voor een druk opbouw. De concentratie van de brandstof bepaalt de mate van drukopbouw in combinatie met de omgeving: als het verbrandingsgas niet weg kan zal de druk opbouwen. Het kan zijn dat de verbranding zo snel is dat een supersonische drukgolf ontstaat die ervoor zorgt dat het mengsel vooraan deze golf spontaan ontbrandt. In dat geval spreken we van een detonatie. Aan de gevolgtant heeft een explosie dus een hogere overdruk die objecten kan beschadigen en is bij een brand de warmtestraling meer van belang. In het kader van deze studie is vooral het effect bij aardgas en waterstof van belang. Bij de ontbranding van beide gassen kunnen detonaties optreden. Het verschil tussen aardgas en waterstof ligt met name in het verschil in verbrandingssnelheid van het gas/lucht mengsel.

### 5.1 Ontbranding

#### 5.1.1 Gebruikte modellen

In het risicomodel, zoals dat in het Verenigd Koninkrijk gebruikt wordt voor gasdistributie worden een aantal modellen gebruikt om de grootte van branden en de bijbehorende warmtestraling te voorspellen. Voor verschillende uitstroombrofielen worden verschillende modellen gebruikt. De verwachting is dat deze modellen deels bruikbaar zijn voor de voorspelling van waterstofbranden, maar validatie van de uitkomsten met experimentele data is nodig.

Voor branden die ontstaan bij de ontsteking van turbulente aardgaslekkages uit leidingen wordt gebruik gemaakt van het THRRAIN-model. Dit model is toepasbaar voor verschillende gassen (aardgas, ethyleen, propaan en butaan) en bij verschillende windomstandigheden. Er wordt daarbij gebruik gemaakt van een bibliotheek met laminaire flamelets om de eigenschappen van de verbranding van het mengsel te bepalen, echter uitsluitend voor de genoemde gassen. Binnen het model wordt een set aan vergelijkingen opgelost voor zowel de samenstelling als de massa- en momentstromen in verschillende richtingen. Een fluxmodel wordt gebruikt om de warmtestraling te bepalen.

Het TRENCH-model wordt gebruikt voor volledige breuken van leidingen in goten ('trench') waarbij de wanden van de goot worden mee gemodelleerd. Afhankelijk van de configuratie van de goot en de windrichting kunnen vlammen door de goot of verticaal erboven optreden. Voor de bepaling van de straling wordt van dezelfde methode gebruik gemaakt als het THRRAIN-model.

Voor branden van vloeistoffen of gassen waarvoor geen flamelet informatie beschikbaar is, kan gebruik gemaakt worden van het JBURN-model. Dit model gaat uit van een vereenvoudigd verbrandingsmodel en voorspelt de straling van jets onder invloed van weersomstandigheden. Het model is gevalideerd met experimenten van horizontale jets voor mengsels van olie, aardgas, propaan en waterstof. In het QRA-model wordt JBURN gebruikt voor releases met uitstroomsnelheden onder de 30 m/s.

Een derde model dat gebruikt wordt voor de modellering van branden is FIRE2. Dit model wordt vooral toegepast als gas door de grond diffundeert over een grotere oppervlakte met lage stroomsnelheden. De snelheid van de gasstroom is over het algemeen veel lager dan de windsnelheid of de uitstroomsnelheid bij jets.

Zoals vermeld, maakt het THRRAIN-model gebruik van Flamelet data, die niet beschikbaar is voor waterstof. Het gebruikte stralingsmodel houdt rekening met de vorming van roet bij de verbranding van koolwaterstoffen. Aangezien dit bij de verbranding van (zuiver) waterstof niet voorkomt, is daarmee het THRRAIN-model niet geschikt voor de modellering van waterstof branden. In het QRA-model voor

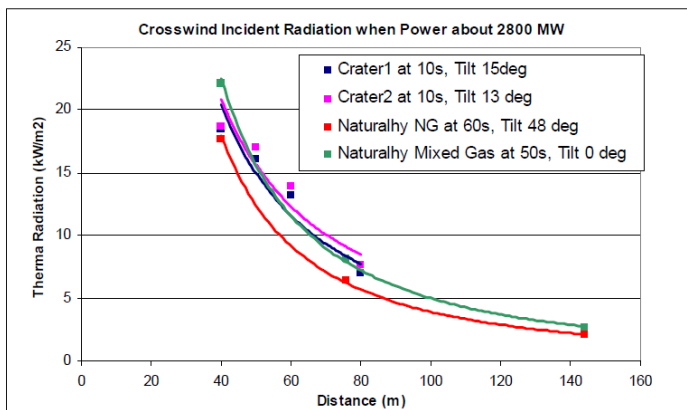


waterstof wordt daarom gebruik gemaakt van het JBURN-model, aangevuld met het TRENCH-model in het geval dat er greppels aanwezig zijn.

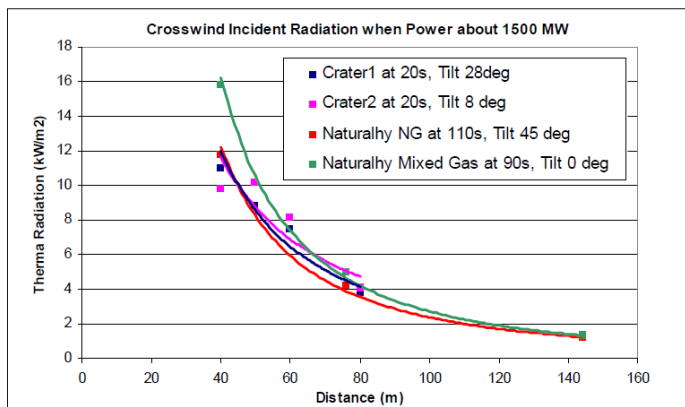
### 5.1.2 Hittestraling

De hittestraling (in kW/m<sup>2</sup>) vanaf een brand is afhankelijk van het vermogen van de brand (Q), de afstand (r) en de fractie van de energie die in de hittestraling gaat zitten (F<sub>r</sub>) volgens  $I = QF_r/4\pi r^2$

Het JBURN-model gebruikt correlaties om de fractie van de hittestraling (F<sub>r</sub>) te voorspellen bij berekende grootte en vorm van de vlam. Deze correlatie is getest voor aardgas en waterstof in experimenten. DNV GL [29] heeft in het kader van het NaturalHy project en aanvullende projecten experimenten uitgevoerd voor mengsels van aardgas en waterstof tot 26% waterstof in NaturalHy en zuiver waterstof in de andere projecten. Bij de zuivere waterstofbranden wordt een ingegraven leiding lek gemaakt, bij de verbranding van het gas komt daarmee aarde/stof mee in de vlam die daardoor een gele kleur krijgt. Deze zelfde kleur wordt ook waargenomen bij de verbranding van waterstof/aardgas mengsels. Een van de conclusies van het project is dat de hittestraling nagenoeg identiek is voor waterstof/aardgas mengsels en zuiver aardgas bij gelijke energie uitstroom. Zoals bij elk experiment vertonen de gemeten waarden enige spreiding. Het maximale verschil tussen de fit over de hoogst gemeten waterstofvlam straling en fit over de laagste gemeten aardgasvlam bedraagt 25%. Deze metingen zijn weergegeven in onderstaande twee grafieken.



**Figuur 26. Vergelijking thermische straling als functie van de afstand voor aardgas (NaturalHy NG), mengsel van 26% (NaturalHy Mixed) en zuiver waterstof ('Crater1' en 'Crater2') bij een uitstroomvermogen van 2800 MW**



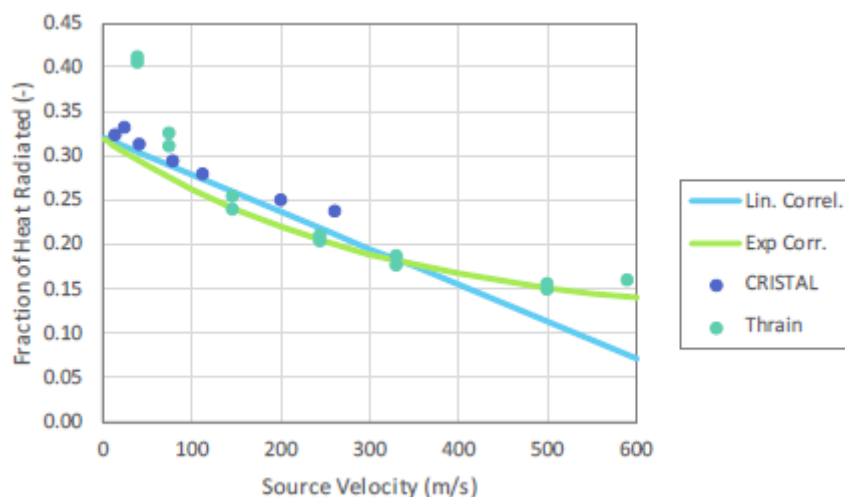
**Figuur 27. Vergelijking thermische straling als functie van de afstand voor aardgas en waterstof bij een uitstroomvermogen van 1500 MW**

In de experimenten komt gas (aardgas, waterstof of het mengsel) vrij uit een leiding met een diameter van 150mm en een gasdruk van 40 barg. De uitstroom is ongeveer schaalbaar met de druk in de leiding en het kwadraat van de diameter ( $PD^2$ ). Voor distributieleidingen treden gelijke volumestromen op bij een druk van 8 barg en een diameter van 335 mm of een diameter van 670 mm bij een druk van 2 barg. Het lijkt waarschijnlijk dat de distributieleidingen met deze drukken vergelijkbare warmtestraling zullen hebben als de getoonde experimentele data. Als kleinere diameters gebruikt worden, zal de uitstroom kleiner zijn en is daarmee de verwachting dat bij ontbranding de warmtestraling minder zal zijn dan voor aardgas. Vanuit de literatuur [30] zijn correlaties bekend voor  $F_r$  voor aardgas jets als functie van de uitstroomsnelheid ( $u$ ):

$$F_r = 0,321 - 0,00418 * u$$

$$F_r = 0,21 \exp(-0,00323 * u) + 0,11$$

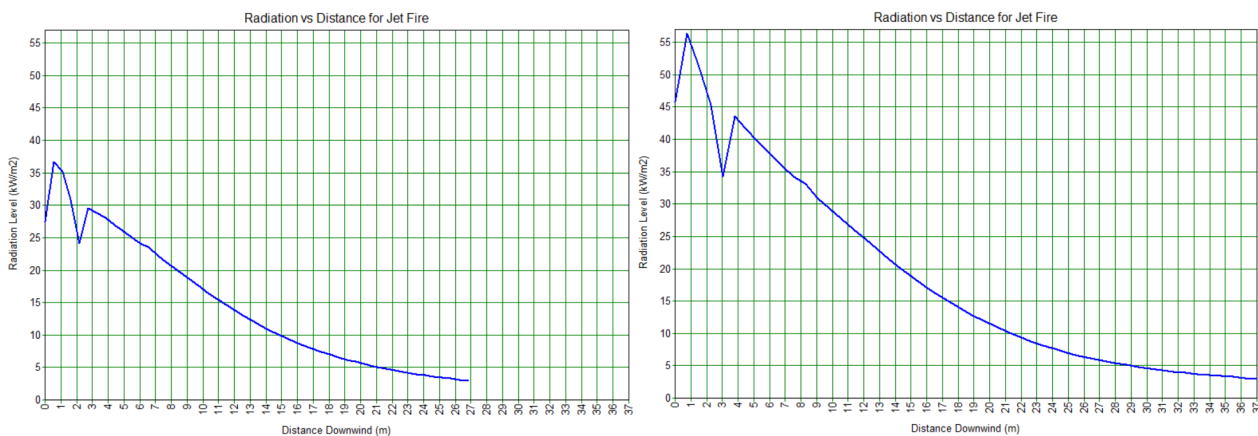
De correlatie wordt weergegeven in Figuur 28, waarbij zowel de lineaire als exponentiele curve gegeven wordt, naast de uitkomsten van het THRAIN-model en het CRISTAL-model (voor aardgas jets uit ondergrondse transmissieleidingen).



**Figuur 28. Verband tussen fractie van hittestraling en de uitstroomsnelheid**

Voor uitstroomsnelheden tussen de 100 m/s en 500 m/s komen alle vier de modellen goed overeen. Het THRAIN-model wijkt af voor lage snelheden. Uitstroomsnelheden rond de 80 m/s worden verwacht bij een lekkage bij 30 mbar, al zou de snelheid lager kunnen zijn door interacties met de bodem of wanden van een greppel. Er is daarmee enige onzekerheid over de fractie van de hittestraling voor lage uitstroomsnelheden voor aardgas en daarmee ook voor waterstof. Deze correlatie zal daarmee experimenteel verder gevalideerd moeten worden.

De eerdergenoemde verkenning van DNV GL in opdracht van Alliander [14] is voor een gasdistributieleiding een risicoanalyse gemaakt. Uit deze analyse blijkt dat de risicocontouren voor waterstofleidingen ten opzichte van aardgas kleiner zijn door een iets kleinere energie-uitstroom en bijbehorende lagere warmtestraling. De warmtestraling is weergegeven in Figuur 29.



**Figuur 29. Warmtestraling als functie van de afstand voor waterstof (links) en aardgas (rechts) voor een 8bar 114mm leiding.**

In het kader van de H21 worden op het moment van schrijven van dit rapport metingen uitgevoerd door DNV GL [3] aan de hittestraling van onbedekte gasleidingen. In de serie foto's in Figuur 30, is de (nauwelijks) zichtbare vlam ten gevolge van een 20mm opening in een 8"leiding weergegeven.



**Figuur 30. Waterstofbranden uit een opening van 20mm in een 8"leiding bij 0,35 bar (links), 2 bar (midden) en 7 bar (rechts) [3]**

Uit bovenstaande onderzoeken volgt dat de risicocontouren voor een waterstofbrand, bij volle breuk van een distributieleiding, kleiner zijn dan voor aardgas.

## 5.2 Explosies

Voor de bepaling van de gevolgen van een explosie van een waterstofmengsel is de overdruk de belangrijkste parameter. In de risicomodellen wordt de gegenereerde overdruk gebruikt als parameter om de fataliteit van de explosie te bepalen. Ondanks dat er wat aanpassingen aan bestaande modellen nodig zijn, is data beschikbaar en zijn de concepten bekend.

Er zijn twee basismechanismen van vlamverspreiding bij explosies: Deflagratie en Detonatie. Bij deflagratie wordt het mechanisme van vlamvoortplanting grotendeels bepaald door warmtegeleiding en moleculaire diffusie van warmte. Bij detonatie wordt het reactiefront gepropageerd door een schokgolf die het onverbrande mengsel comprimeert tot boven de zelfontbrandingstemperatuur. Tegelijkertijd wordt de schokgolf gehandhaafd door de warmte die vrijkomt uit de verbrandingsreactie.

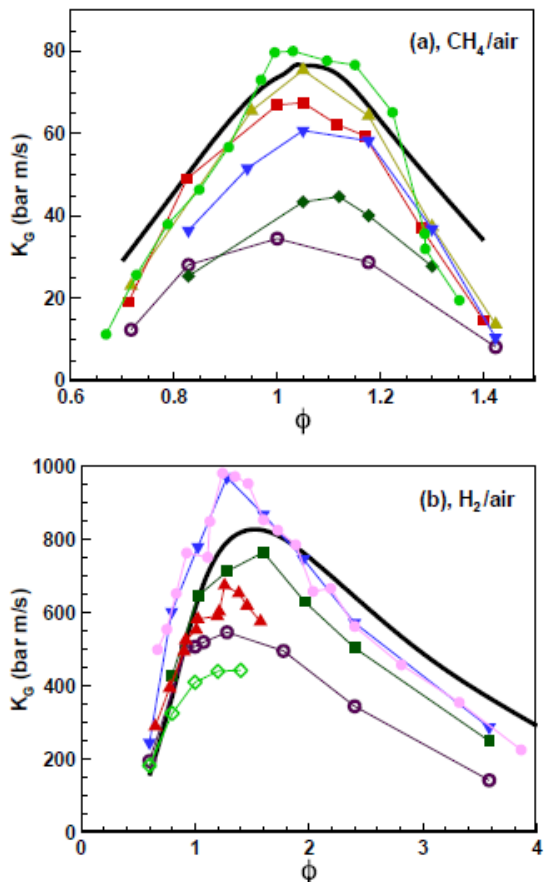
Onderstaande tabel geeft de minimale ontstekingsenergieën voor deflagratie en detonatie voor waterstof en aardgas in lucht. Gezien de hoge energie die nodig is voor detonatie, is een directe initiatie van een

detonatie een zeer onwaarschijnlijke gebeurtenis. De effecten zijn, door de hogere en snellere drukopbouw echter veel heftiger, voor zowel aardgas als waterstof.

Gas	Minimum ontstekingsenergie voor deflagratie [J]	Minimum ontstekingsenergie voor detonatie [J]
Waterstof	$0,17 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^4$
Methaan	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^8$

**Tabel 3 ontstekingsenergie voor detonatie en deflagratie [31]**

Onder bepaalde condities kan het vlamfront van een deflagratie versnellen en een transitie naar een detonatie veroorzaken. Deze versnelling treedt dus op nadat het mengsel ontbrand is en kan worden veroorzaakt door obstakels die zich in het pad van de verbranding bevinden. De transitie van deflagratie naar detonatie (DDT) komt voor bij verschillende brandbare mengsel. De verwachting van onderzoekers [32] is dat door de hogere reactiviteit van waterstof de transitie naar detonatie eerder zal plaatsvinden dan bij aardgas. Nader onderzoek zal moeten plaatsvinden om de effecten hiervan voor de distributienetten verder in te vullen.



**Figuur 31. Vergelijking van de snelheid van drukopbouw tussen aardgas (boven) en waterstof (onder) als functie van de concentratie ten opzichte van de stoichiometrische verhouding. [33]**

De drukopbouw van explosies van methaan en waterstof zijn in een geruim aantal experimenten bepaald. In Figuur 31 [36] zijn een aantal van de uitkomsten van deze studies bijeengebracht. Weergegeven is de snelheid van drukopbouw per meter:

$$K_g = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{max} \sqrt[3]{V}$$

Hierin is:

$K_g$ : de deflagratie index

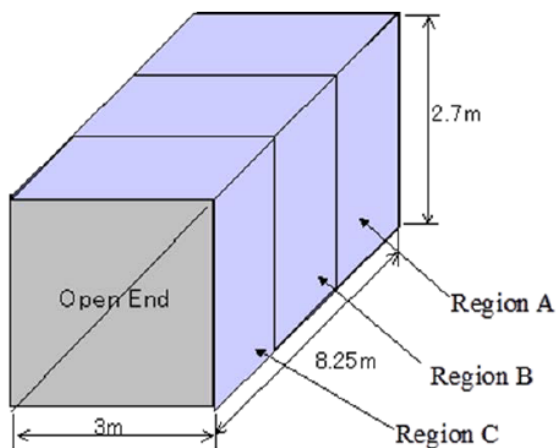
$\left( \frac{dP}{dt} \right)_{max}$ : de maximale snelheid van drukopbouw

$V$ : het volume van het vat waarin het experiment wordt uitgevoerd. Op deze wijze kunnen de verschillende experimenten in verschillende drukvaten met elkaar worden vergeleken.

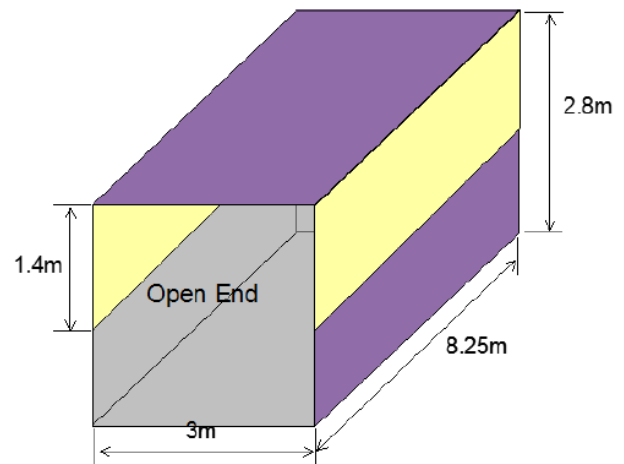
Uit de figuur blijkt dat de drukopbouw bij waterstof een ordegrrootte sneller gaat dan bij aardgas. Dit gebeurt echter bij hogere concentraties: voor waterstof is de ondergrens ongeveer 10% en voor aardgas 6,5%.

De drukopbouw in een woning vindt niet plaats in een afgesloten ruimte. Grote ruiten bezwijken eerder dan de muren van een woning en daardoor kan een drukontlasting plaats vinden. Deze situatie wordt geïllustreerd in een serie van waterstofexplosie testen die in de periode 2003-2004 door DNV GL zijn uitgevoerd in een explosiekamer van 8,25x3x2,8 meter [34]. Figuur 32 geeft een overzicht van de gebruikte setup. In de experimenten is gebruik gemaakt van 2 opstellingen. In de eerste fase van de test was de korte kant van de container open, in de tweede fase zijn ventilatieopeningen gemaakt in beide lange zijdes van de kamer. In de testen werd een derde van de kamer gevuld met waterstof, weergegeven als zone A, B en C in de figuur. De waterstof werd ontstoken in het midden van de zone.

a) First Phase

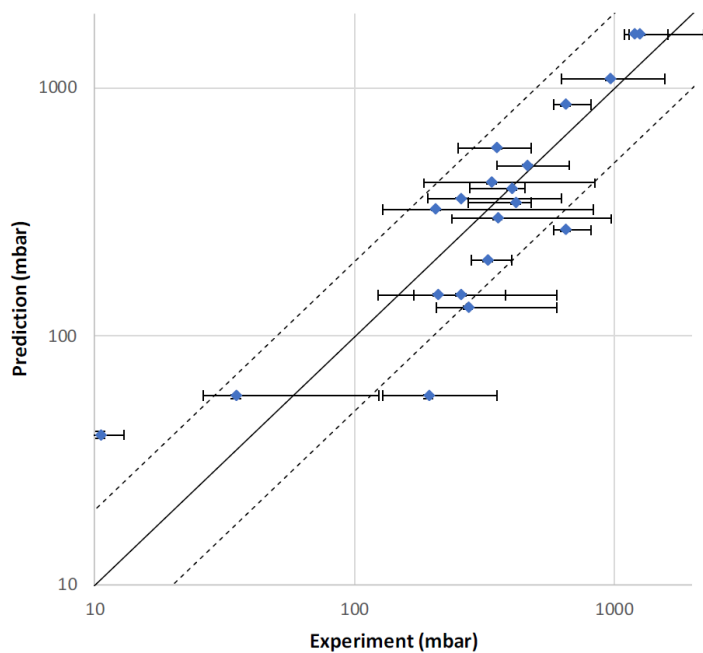


b) Second Phase



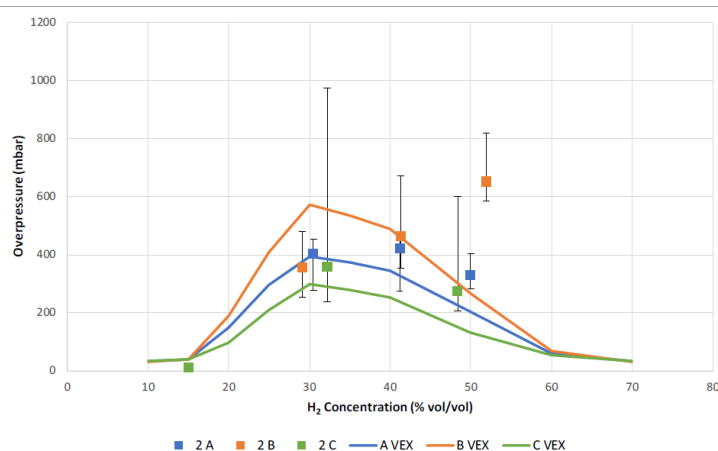
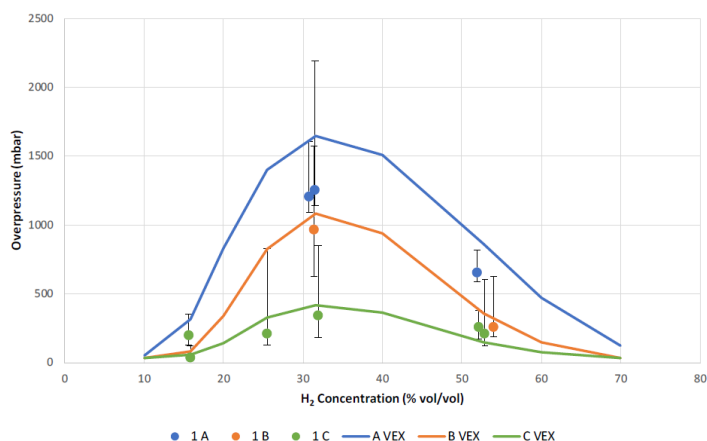
**Figuur 32. Experimentele setup voor explosietesten**

Het explosiemodel van DNV GL is aan de hand van deze experimenten aangepast om ook de overdruk van waterstof te kunnen voorspellen. Figuur 33 laat een vergelijking zien van de voorspelde en gemeten interne overdrukken. Het model komt goed overeen met de experimenten: 80% van de voorspelde overdrukken valt binnen een factor 2 van de experimenten. De gemiddelde ratio tussen de voorspellingen en experimentele data is 1,16, waarmee het model het effect enigszins overschat.



**Figuur 33 Vergelijking model en experimenten voor overdruk van explosies**

De gemeten overdrukken en voorspellingen van het model zijn voor de twee gebruikte configuraties weergegeven in Figuur 34. In de grafiek wordt de overdruk als functie van de waterstofconcentratie gegeven. In de eerste setup, met één open kant aan de explosiekamer, is te zien dat een explosie in zone A het verste van de opening, de grootste overdruk genereert. Ook in dit geval overschat het model de overdruk ten opzichte van de gemeten data. In het geval met een ventilatieopening aan de lange zijde van de kamer, zijn de resultaten minder duidelijk. Overdrukken zijn in dit geval van soortgelijke grootte maar lijken minder afhankelijk van de concentratie. Explosies treden in deze experimenten dus op bij concentratie boven de 10%. Bij lagere concentraties, tussen de 4% en 10%, worden geen overdrukken geconstateerd. Dit is in overeenstemming met de bevindingen in het HyHouse rapport, waarin gesteld wordt dat een wolk van waterstof in een woning met een concentratie tussen de 4 en 9 procent zal resulteren in een vlam met erg lage overdruk. Deze vlam zal uitdoven zodra de concentratie van het brandbare mengsel onder de 4% daalt. [16]



**Figuur 34. Vergelijking model (lijn) en experiment voor overdruk van explosies. Boven situatie met opening aan korte kant van de container, onder situatie met ventilatiesleuven in lange zijde van de container**

Ook in deze experimenten worden overdrukken tot boven de 1 bar gemeten, bij concentraties tussen de 30% en 40%. Ondanks dat de effecten van explosies in deze studie niet verder beschouwd worden, wordt Tabel 4 toch, ter informatie, de gevolgen van een dergelijke drukken beschreven. Overdrukken van 700 mbar zijn voldoende om gebouwen volledig te verwoesten.

**Tabel 4. Effect overdruk op gebouwen**

Overdruk (bar)	Effect
<b>0,002</b>	Breken van grote ruiten
<b>0,07</b>	Huizen zwaar beschadigd
<b>0,42</b>	Huizen bijna totaal vernietigd
<b>0,7</b>	Alle gebouwen totaal vernietigd

Het uiteindelijke effect van een explosie is daarnaast afhankelijk van de hoeveelheid brandbaar mengsel dat zich heeft kunnen ophopen in de ruimte. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat vergelijkbare en grotere overdrukken kunnen optreden bij explosies van aardgas. Bij aardgas is de stoichiometrische verhouding daarnaast veel lager dan voor waterstof: De grootste overdrukken bij aardgasexplosies treden op bij aardgasconcentraties rond de 9,5%. De HyHouse-studie [16] verwijst hierbij naar werk van Zhang et.al., waarin explosie-experimenten zijn uitgevoerd voor aardgas in een gesloten 10m<sup>3</sup> ruimte. Er worden op korte afstand van de explosiebron overdrukken tot maximaal 6 bar gemeten. Deze overdrukken zijn groter doordat, in tegenstelling tot de beschreven experimenten van DNV GL, gebruik wordt gemaakt van een gesloten ruimte.

Het is de verwachting van DNV GL-explosie-experts dat door de veel hogere vlamsnelheid van waterstof vergeleken met aardgas, een stoichiometrisch mengsel van waterstof kan resulteren in een detonatie. In een woning zou daarbij de druk opbouw veel sneller zijn, waardoor vergeleken met een stoichiometrische aardgasexplosie in dezelfde woning de overdruk bij waterstof veel hoger wordt. In beide gevallen zal de woning volledig verwoest worden, bij waterstof zal het puin waarschijnlijk verder verspreid worden. Nader onderzoek zal deze verwachting verder moeten onderbouwen.

### 5.3 Conclusies en aanbevelingen


De gevolgen van ontbranding van waterstof zijn als volgt samen te vatten:

1. Er is onderscheid te maken tussen het verbranden van waterstof middels een vlam of middels een explosie. In de open ruimte en bij lage concentraties (<10vol% waterstof in lucht) zal een brand optreden. In experimenten worden geen overdrukken geconstateerd bij concentraties onder de 10 vol% waterstof. Bij gesloten ruimtes of bij hogere concentraties kunnen explosies optreden. Voor de gevolgen van een brand wordt gekeken naar de hittestraling, voor explosies zijn de overdrukken de bepalende factor.
2. Branden van waterstof hebben bij een gelijk vermogen een gelijke of lagere hittestraling als van aardgas. Gelijke hittestraling treedt op bij branden waarbij ook stof/aarde mee verbrand wordt. Voor vrije vlammen van waterstof, die tevens minder zichtbaar zijn, zal de hittestraling lager zijn dan voor aardgas. Bij gelijke drukken zal bij een lagere energie-uitstroom het effect van de vlam kleiner zijn dan van aardgas. Dit wordt bevestigd door metingen.
3. Experimenten laten zien dat bij waterstof de overdruk toeneemt vanaf concentraties > 10 vol%. Bij een stoichiometrisch mengsel (rond de 30 vol%) kunnen overdrukken ontstaan die snel boven de 100 mbar uitkomen. Voor aardgas is het stoichiometrische mengsel 9,5 vol%. Bij metingen bij aardgasexplosies zijn overdrukken tot 6 bar gemeten. Bij overdrukken van 140mbar storten muren in en bij 420 mbar worden huizen grotendeels verwoest. Door de hogere reactiviteit van waterstof, wordt verwacht dat een stoichiometrisch mengsel van waterstof eerder een detonatie kan veroorzaken. Nader onderzoek is nodig om dit te bevestigen en de gevolgen in vergelijking met aardgas verder vast te stellen.

Hieruit zijn een aantal aanbevelingen te maken:

1. In oude huizen zijn de ramen de zwakste schakel, echter in beter geïsoleerde huizen zijn de ramen veelal steviger (dubbel glas). De drukopbouw zou hierdoor groter kunnen worden in een woning waarmee het gevolg van een explosie toeneemt. Dit effect, dat zowel voor aardgas als voor waterstof geldt, zou verder onderzocht moeten worden.
2. Explosies (deflagratie) van waterstof treden op bij concentraties groter dan 10vol%. De meeste maatregelen zouden ervoor moeten zorgen dat deze concentraties niet op kunnen treden. Te





denken valt aan 'aardlek-achtige' schakelaars voor het gasnet (gasstopper, al dan niet gekoppeld aan een LEL-sensor) of sterkere ventilatie van de ruimtes. Een andere manier zou zijn om de waterstof te laten ontbranden, ver voordat het explosieve mengsels kan vormen, bijvoorbeeld met een waakvlam of katalytisch.

3. In deze studie wordt ervan uitgegaan dat de waterstof in de woningen uitsluitend voor ruimteverwarming wordt toegepast en niet voor koken of sierhaarden. Mocht koken op waterstof een toekomstige optie zijn, dan moet ook nagedacht worden over de extra binnenleidingen met meer kans op lekkages, vlamkleur en beveiliging van kooktoestellen.

## 6 RISICOVERGELIJKING

### 6.1 Bepaling risico

Om een inschatting te kunnen maken voor de risico's bij het gebruik van waterstof in het distributienet in vergelijking met het gebruik van aardgas, is het van belang de verschillen in kans en gevolg te weten. De kans heeft met name betrekking op de mogelijkheid dat een gevaarlijke situatie zich voordoet, de gevolgen kunnen worden uitgedrukt in schade die ontstaat bij een brand of explosie. Het gebruikte risicomodel probeert deze kansen en gevolgen kwantitatief in te schatten voor zowel aardgas als waterstof. Echter voor waterstof is het model nog niet ver genoeg ontwikkeld om de kwantitatieve inschatting te maken. Op basis van de in de voorgaande hoofdstukken beschreven verschillen tussen waterstof en aardgas maken we een kwalitatieve inschatting van de verschillen in risico. Daarbij geldt dat de kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie kan worden verkleind door mitigerende maatregelen. Op deze manier kan het uiteindelijke risico, dat bestaat uit het product van de kans maal de gevolgen, voor het gebruik van waterstof via het distributienet op een acceptabel niveau<sup>9</sup> gebracht worden. Voor een aantal veel voorkomende situaties worden mogelijke mitigerende maatregelen voorgesteld.

#### 6.1.1 Kans

De kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie wordt bepaald door een drietal factoren:

- Vrije uitstroom door lekkages of tijdens werkzaamheden aan het netwerk.
- Verspreiding en ophoping van waterstof en aardgas.
- Ontsteking.

Gevaarlijke situaties kunnen optreden bij zowel aardgas- als waterstof distributie. In onderstaande tabel wordt daarom een samenvattende inschatting gemaakt op basis van DNV GL-expertise en inzichten voor de verschillen in kansen tussen beide gassen en onder welke voorwaarden de kansen gelden.

	Kans in vergelijk met aardgas	Uitleg	Voorwaarde
<b>Aard lekkage</b>			
Lekkages (vrije uitstroom uit distributiesysteem)	Vergelijkbaar	Zelfde materialen, Waterstof beïnvloedt deze niet	Ongewijzigd beleid in aanleg en onderhoud. Detectie door lekzoeken en odorisatie voor gasluchtmeldingen ook voor waterstof.
Overig vrijkomen	Verwaarloosbaar verschil	Diffusie en permeatie zijn groter voor H <sub>2</sub> maar de volumes zijn zeer gering	N.V.T.
<b>Omvang</b>			
Lekkage bij niet afgesloten segment	Groter	+/- 3-maal grotere volumestroom	Gelijkblijvend drukregime,

<sup>9</sup> "Acceptabel" wordt geïnterpreteerd als lager of gelijk aan het risico dat samenhangt met het gebruik van aardgas.

Lekkage bij afgesloten segment	Minder	Gelijk uitstromend volume, minder energie-uitstroom	Gelijkblijvend drukregime en beleid werkzaamheden (bij afblazen bijv.)
<b>Verspreiding</b>			
Openlucht	Vergelijkbaar	Grotere uitstroom wordt gecompenseerd door snellere opstijging en hogere diffusie <sup>10</sup>	
Ondergronds	Afhankelijk van de situatie	Mogelijk eerder kratervorming (bij hogedruk) maar bij ondoordringbare bovenlaag (vorst) grotere verspreiding	
Binnenshuis	Groter	Door verschil in dichtheid snellere verspreiding via ventilatie	Geen wijzigingen in ventilatie
<b>Ontsteking</b>			
Concentraties $\leq 10\%$	Kleiner	Ontstekingsbronnen zijn ongeveer dezelfde Kans op ontsteking is kleiner	
Concentraties in de gesloten ruimte $> 10\%$	Groter	Meer ontstekingsbronnen van toepassing Grotere kans op ontsteking	

## 6.1.2 Gevolg

Analoog aan de analyse voor de kansen worden in onderstaande tabel de verschillen tussen waterstof en aardgas weergegeven met betrekking tot de gevolgen van ontbranding van een brandbaar mengsel. Hierbij maken we onderscheid tussen de gevolgen van branden en van explosies.

	<b>Gevolg in vergelijking met aardgas</b>	<b>Uitleg</b>	<b>Voorwaarde</b>
<b>Brand</b>			
Hittestraling	Minder, of vergelijkbaar	Minder energie en geen koolstofatomen waardoor minder straling optreedt	Vrije uitstroom zodat geen stof mee verbrand wordt. In dat geval is het effect vergelijkbaar.

<sup>10</sup> Vergelijkbare gasconcentraties in de wolk, zie bijvoorbeeld Figuur 18

Zichtbaarheid	Hoger	Kan over het hoofd gezien worden bij een stabiele vlam	Vrije uitstroom.
<b>Explosie</b>			
Deflagratie Conc. ≤ 10%	Minder	Onder de 10% verbrandt waterstof en is de kans op ontsteking klein	
Deflagratie Conc. > 10%	Hoger	De drukopbouw is 2 tot 3 maal zo sterk als de maximale drukopbouw bij aardgas.	
Detonatie	Veel hoger	Veel grotere drukopbouw. Detonaties komen bij aardgas (eigenlijk) niet voor	

### 6.1.3 Risico's

Door het samenbrengen van de bovenstaande kansen en gevolgen kan de vergelijking tussen de risico's van aardgas en waterstof als volgt worden samengevat:

1. Als een gaswolk wordt gevormd bij vrije uitstroming in de buitenlucht zijn de risico's van aardgas en waterstof vergelijkbaar.
2. Als een ondergronds lek ontstaat dan is het risico afhankelijk van de omstandigheden:
  - a. Indien er een doorlaatbare bovenlaag aanwezig is dan zal de waterstof sneller weg diffunderen (bij lage drukleidingen) of als er kratervorming optreedt (bij hogere drukken) kan het snel wegstromen. Het risico (migratie naar gebouwen) zal dus (iets) lager zijn dan bij aardgas.
  - b. Indien er een ondoorlaatbare bovenlaag is dan migreert waterstof over grotere afstanden en is het risico op brand of explosie groter door migratie en toenemende kans op opbouw van gevaarlijke concentraties in gebouwen.
3. Indien er een lek in een woning (of via migratie door de bodem in de woning komt) is dan kan het risico worden onderverdeeld in:
  - a. Opbouw van waterstof- (of aardgas) concentraties tot 10%. In dit gebied geeft waterstof een lagere risico op schade omdat:
    - i. Er geen deflagratie plaats zal vinden, en
    - ii. de kans op ontsteking lager is dan bij aardgas.
  - b. Opbouw van waterstofconcentraties boven 10%. In dit gebied geeft waterstof een hoger risico op schade omdat:
    - i. De kans op een deflagratie hoger is dan bij aardgas en
    - ii. de drukopbouw veel sneller verloopt dan bij aardgas.

Bij grotere lekken van 100 tot 300 l/min (6-18 m<sup>3</sup>/h) waterstof kunnen concentraties boven de 10% verwacht worden met name indien het lek in een beperkte ruimte (meterkast, kruipruimte, en dergelijke) ontstaat.

## 6.1.4 Mitigerende maatregelen

Voor een aantal veel voorkomende situaties kunnen een aantal mitigerende maatregelen worden voorgesteld die de kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie verkleinen. De genoemde mitigerende maatregelen verkleinen de kans op een explosie in een gesloten ruimte:

- Zorg voor odorisatie van waterstof zodat gasluchtmeldingen ook voor waterstof mogelijk zijn en daarmee lekken eerder gedetecteerd kunnen worden.
- Onderzoek de mogelijkheid om een automatische klep (gasstopper) te plaatsen waarmee de gastoevoer gestopt wordt bij wegvallen van de druk en eventueel meting van gevaarlijke waterstofconcentraties (gekoppeld aan sensoren). Hiermee kan de concentratie opbouw in gesloten ruimtes beperkt worden.
- Onderzoek de toepassing van en eisen aan waterstof LEL-sensoren/alarmen voor (onder andere) meterkasten. Hang deze boven in de meterkast want daar bouwt de concentratie het eerst op. Eerdere detectie van een lek kan de concentratieopbouw in gesloten ruimtes beperken.
- Bij constatering van hoge concentraties (>4%) zou de elektriciteit van de woning uitgeschakeld kunnen worden om ontsteking door vonken te voorkomen. Er moet wel zeker gesteld worden dat bij uitschakelen geen ontsteking ontstaat.
- Zorg voor maatregelen waarmee de concentratie zo snel mogelijk omlaag gebracht kan worden. Dit kan door de bovengenoemde maatregelen of door extra ventilatie (eventueel geforceerd) van de ruimtes. Dit kan worden ingebracht in een aanpassing van het Bouwbesluit.

## 6.2 Aanbevelingen

Om uiteindelijk te komen tot een acceptabel risico voor het gebruik van waterstof in distributienetten zal overeenstemming moeten worden gevonden over te nemen maatregelen. Het is daarbij van belang dat de onzekerheid in de kansen en gevolgen voor de verschillende aspecten zoveel mogelijk verkleind worden. In de voorgaande hoofdstukken is voor de verschillende deelaspecten een stand van zaken van de kennis in de literatuur gegeven. Er is daarbij op verschillende onderdelen aangegeven dat aanvullend onderzoek noodzakelijk is.

Voor toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving betekent dat dat er statistiek en praktijkervaring opgebouwd dient te worden en het verdient aanbeveling om in de beginfase (tijdens pilots) de hierboven genoemde mitigerende maatregelen te evalueren. Binnen het H21 project worden momenteel diverse experimenten uitgevoerd die verdere inzichten zullen opleveren. Het verdient de aanbeveling om de uitkomsten van deze experimenten te vertalen naar de Nederlandse situatie, en daar waar nodig aan te vullen met noodzakelijke experimenten.


Daarnaast worden de volgende specifieke aanbevelingen gedaan:

1. Bouw inzicht en statistiek op voor **aard en omvang** van waterstoflekkages, door dit in inventarisaties (uitnemen en testen met aardgas en waterstof van leidingstukken etc.), pilots, demonstraties en ombouw projecten structureel te monitoren. Tevens zouden aangetroffen materialen en lekkende onderdelen gelogd moeten worden. Bepaal daarbij een maximaal toegestane uitstroom en leg deze vast in betreffende regelgeving.
2. Ontwikkel ervaring voor de **verspreiding** van waterstof rond aansluitleidingen in typische Nederlandse situaties. Denk daarbij aan grondsoorten, weerseffecten (regen, vorst) en detectiemethoden anders dan gasluchtdetectie. Onderzoek of kratervorming in de praktijk inderdaad eerder optreedt.

- 
3. Onderzoek **ontstekingsbronnen** die wel voor waterstof gelden en niet of minder voor aardgas en bouw hiervoor experimentele kennis op door explosie-onderzoek. Daarbij valt te denken aan brandende sigaretten, vonken van apparatuur (in de meterkast: elektriciteitsmeter, routers en dergelijke), gereedschap (staal op staal, brons op staal en dergelijke)
  4. Zorg voor een gedegen (internationale) kennisopbouw van de praktijk van waterstof in de gebouwde omgeving door in de pilots voldoende sensoren te gebruiken en de metingen te monitoren en te delen met experts, netwerkbedrijven, leveranciers, gebruikers en veiligheidsinstanties en ontwikkel trainingen om deze kennis op adequate wijze uit te dragen.
  5. Zorg voor voorlichting en protocollen voor bewoners, netbeheerders en hulpdiensten in de situatie van verhoogde concentraties. Deze moeten nader uitgewerkt worden, maar in ieder geval moeten het afsluiten van de gastoevoer, het wegnemen van ontstekingsbronnen, ventileren van de woning en ontruimen van de omgeving voor waterstof geëvalueerd en eventueel aangepast worden. De introductie van waterstof kan gebruikt worden om dit nogmaals onder de aandacht te brengen.

## 7 LITERATUURLIJST

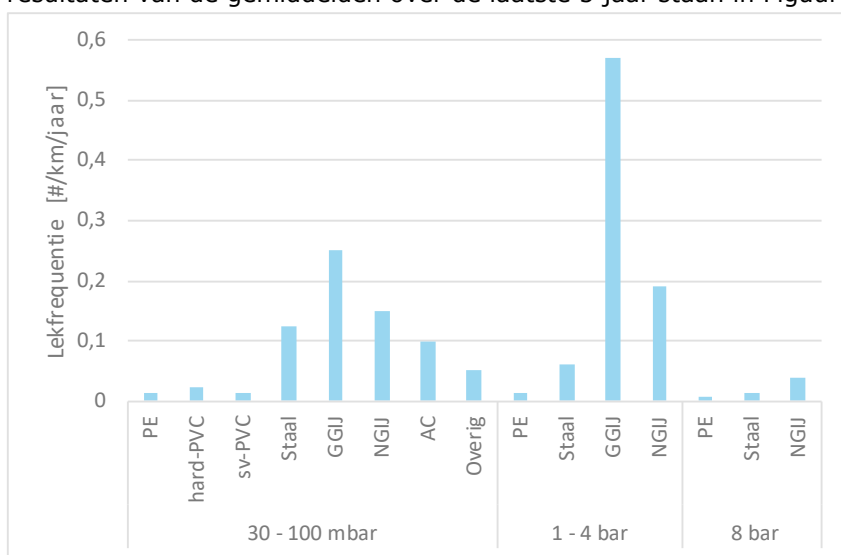
- [1] KIWA Technology, "Toekomstbestendige gasdistributienetten," Apeldoorn, 2018.
- [2] M. Acton and B. Smith, "The Development and Application of Risk Assessment Techniques for Gas Distribution Pipelines", in *Rio Oil & Gas Conference, IBP24000*, 2000.
- [3] DNV GL, "Thermal radiation properties of large hydrogen leaks from gas distribution networks," in *ICHS*, Adelaide, 2019.
- [4] M. Acton, A. Halford and A. Phillips, "Quantification of the Risks Associated with a Hydrogen Gas Distribution Network," in *Hazards 30 (paper accepted)*, Manchester, 2020.
- [5] M. Swain and M. Swain, "A comparison of H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> fuel leakage in residential settings," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 17, no. 10, pp. 807-815, 1992.
- [6] Federal Emergency Management Agency, U.S. Dept. of Transportation, and U.S. Environmental Protection Agency, *Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures*, Appendix B, 1989.
- [7] KIWA Technology, "Eerste inventarisatie naar waterstofuitstromen bij kleine toelaatbare aardgaslekken," Apeldoorn, 2019.
- [8] Margaret F. Hendrick, Robert Ackley, Bahare Sanaie-Movahed, Xiaojing Tang, Nathan G. Phillips, "Fugitive methane emissions from leak-prone natural gas distribution infrastructure in urban environments," *Environmental Pollution*, vol. 213, pp. 710-716, 2016.
- [9] DIERS Technology Report, "Relief system for Runaway Chemical Reactions and Storage Vessels: A Summary of Multi-Phase Flow Models," 1983.
- [10] DNV GL, "DNV GL's thermodynamic property calculator," [Online]. Available: [www.dnvgl.com/gasvle](http://www.dnvgl.com/gasvle).
- [11] G. Atkinson, P. Hooker, J. Hall and S. Hawsworth, "Flow of hydrogen from buried leaks," in *ISFEH*, 2019.
- [12] H. Okamoto, Y. Gomi and H. Akagi, "Movement Characteristics of Hydrogen Gas Within the Ground and Its Detection at Ground Surface," *Journal of Civil Engineering and Science*, vol. 3, no. 1, pp. 49-66, 3 2014.
- [13] H. Okamoto and Y. Gomi, "Empirical research on diffusion behavior of leaked gas in the ground," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, pp. 531-540, 2011.
- [14] R. Coster, "Risicoanalyse waterstof distributie," 2018.
- [15] J. Lacome, D. Jamois and C. Proust, "Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 2302-2312, 2011.
- [16] KIWA Gastec, "HyHouse: Safety Issues Surrounding Hydrogen as an Energy Vector," 2015.
- [17] M. DeStefano, X. Rocourt, I. Sochet and N. Daudey, "Hydrogen dispersion in a closed environment," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 17, pp. 9031-9040, 2019.
- [18] DNV GL, "Rapport proefopstelling verspreiding waterstof in de meterkast," 2020.
- [19] S. Guagnano and N. Siccama, "CFD simulation of gaseous distribution in a metering cabinet," 24574/20.166417 RI/SG/Ir, 2020.
- [20] M. Swain, P. Filoso, E. Grilliot and M. Swain, "Hydrogen leakage into simple geometric enclosures," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, pp. 229-248, 2003.
- [21] A. Bozek, K. Martin and M. Cole, "Cellular Phones in Class I, Division 2/Zone 2 Hazardous Locations," 2006.
- [22] G. Astbury and S. Hawsworth, "Spontaneous Ignition of Hydrogen Leaks: a Review of Postulated Mechanisms," Health and Safety Laboratory, UK, 2005.
- [23] J. Gummer and S. Hawsworth, "Spontaneous Ignition of Hydrogen - Literature Review," Health and Safety Laboratory, UK, 2008.
- [24] P. Hooker, M. Royle, J. Gummer, D. Willoughby and J. Udensi, "SELF IGNITION OF HYDROGEN BY VARIOUS MECHANISMS," Health and Safety Laboratory, UK, 2011.
- [25] F. Dryer, M. Chaos, Z. Zhao, J. Stein, J. Alpert and C. Homer, "Spontaneous Ignition of Pressurized Releases of Hydrogen and Natural Gas into Air," 2007.
- [26] A. Ruggles and I. Ekoto, "IGNITABILITY AND MIXING OF UNDEREXPANDED HYDROGEN JETS," 2012.

- 
- [27] H. Mathurkar, "Minimum ignition energy and ignition probability for Methane, Hydrogen and their mixtures," 2009.
- [28] M. Swain, P. Filoso and M. Swain, "Ignition of lean hydrogen-air mixtures," 2004.
- [29] M. Acton, D. Allaso, C. L and L. B, "Large scale experiments to study hydrogen pipeline fires," in *8th International pipeline conference*, 2010.
- [30] Steel construction institute for health and safety executive, "Oil and gas fires: characteristics and impact, OTI 92596," 1992.
- [31] "Chapter DM. Hydrogen deflagrations and detonations," [Online]. Available: [h2euro.org/hyfacts/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/8-Chapter-DM-hydrogen-deflagration-and-detonation-final-1.pdf](https://h2euro.org/hyfacts/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/8-Chapter-DM-hydrogen-deflagration-and-detonation-final-1.pdf). [Accessed 01 07 2020].
- [32] P. Middha, S. Howell and S. Feven, "New paradigms in hydrogen explosion modelling using an industrial CFD code," in *ICHS, Adelaide*, 2019.
- [33] M. Faghih, X. Gou and Z. Chen, "The explosion characteristics of methane, hydrogen and their mixtures: a computational study," *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*, vol. 40, pp. 131-138, 2016.
- [34] T. Tanaka, T. Azuma, J. Evans, P. Cronin, J. D.M. and C. R.P., "Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling," *Int. Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 2162-2170, 2007.
- [35] KIWA Technology, "Methaanemissie voor gasdistributie 2018," Apeldoorn, 2019.
- [36] KIWA Technology, "Betrouwbaarheid van gasdistributienetten in Nederland," Netbeheer NL, 2018.
- [37] Liander, "Kwaliteits- en capaciteitsdocument gas," 2017.



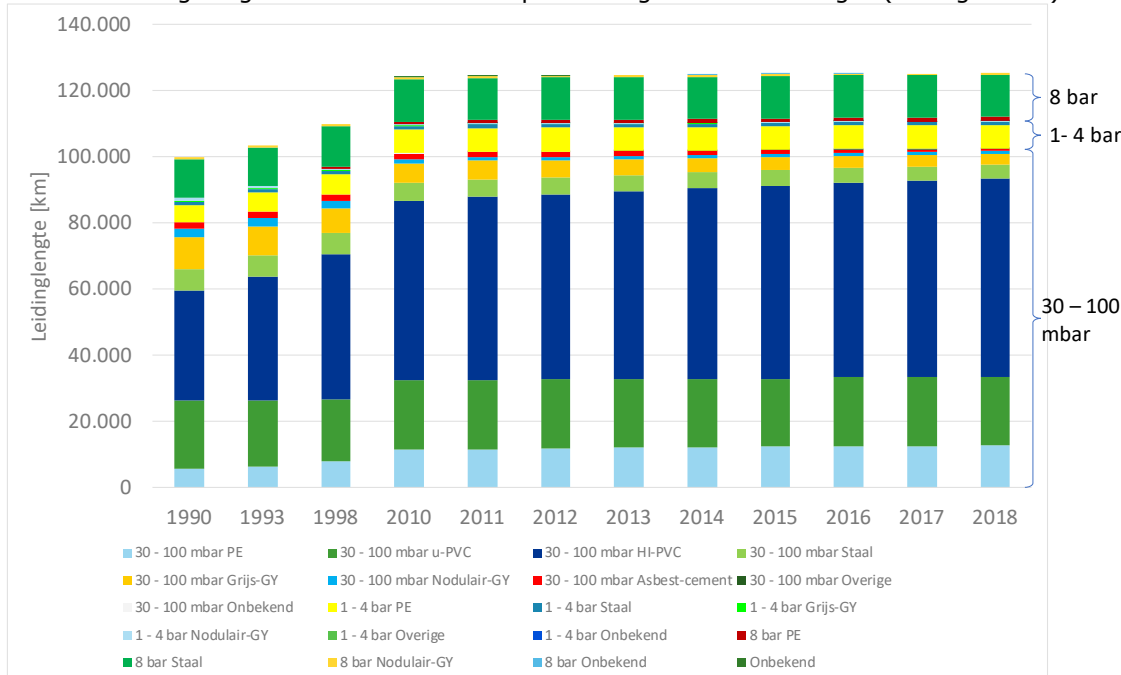
## BIJLAGE A: LEKFREQUENTIE EN OMVANG VOOR AARDGASDISTRIBUTIE

Lekzoeken van de hoofdleidingen en aansluitleidingen gebeurt als regel éénmaal per vijf jaar<sup>11</sup>. Gedurende die periode kan worden verondersteld dat het aantal lekken proportioneel met het verstrijken van de tijd toeneemt. De lekfrequentie, gedefinieerd als het aantal lekken per km dat per jaar ontstaat, varieert over de verschillende drukregimes en over de verschillende toegepaste materialen. De resultaten van de gemiddelden over de laatste 5 jaar staan in Figuur 35.



**Figuur 35. Lekfrequenties hoofdleidingen in het gasdistributiesysteem, gemiddelden over 2014 t/m 2018 [35]**

Hoewel bijvoorbeeld grijs gietijzer (GGIJ) een hoge frequentie heeft, is het daaraan gerelateerde totaal aantal lekken gering in verband met de beperkte nog resterende lengte (zie Figuur 36).

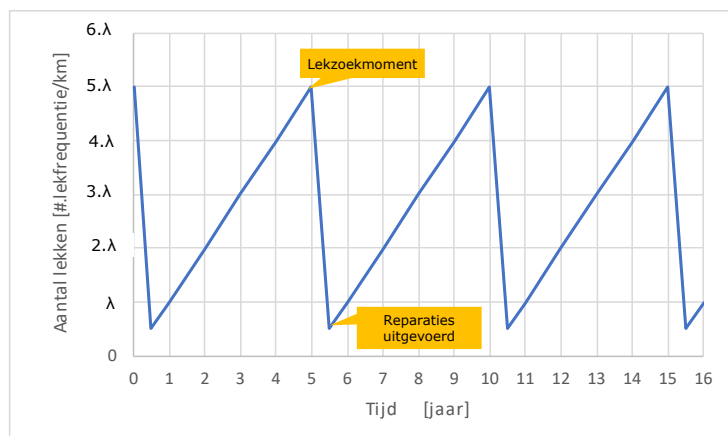


**Figuur 36. Leidinglengten van de verschillende materialen en druktrappen [35]**

<sup>11</sup> Dit kan ook vaker plaatsvinden. Bij sommige netwerkbedrijven wordt toestandsafhankelijk lekzoeken toegepast, en is de frequentie hoger.

Het beleid van de gasdistributiebedrijven is erop gericht om de brosse materialen (grijsgietijzer, en Asbest Cement) uit het net te verwijderen. In Figuur 38 is het effect daarvan weergegeven.

De lekfrequentie wordt berekend op basis van de lekzoekgegevens. Er wordt daarbij vanuit gegaan dat de lekken evenredig in de tijd ontstaan en binnen een half jaar worden gerepareerd<sup>12</sup>. In Figuur 37 is het verloop van het aantal lekken in de tijd weergegeven. Het gemiddeld aantal lekken is dus 2,75  $\lambda$ /km.



**Figuur 37. Verloop van het aantal lekken in de tijd voor leidingen met lekfrequentie  $\lambda$ <sup>13</sup>.**

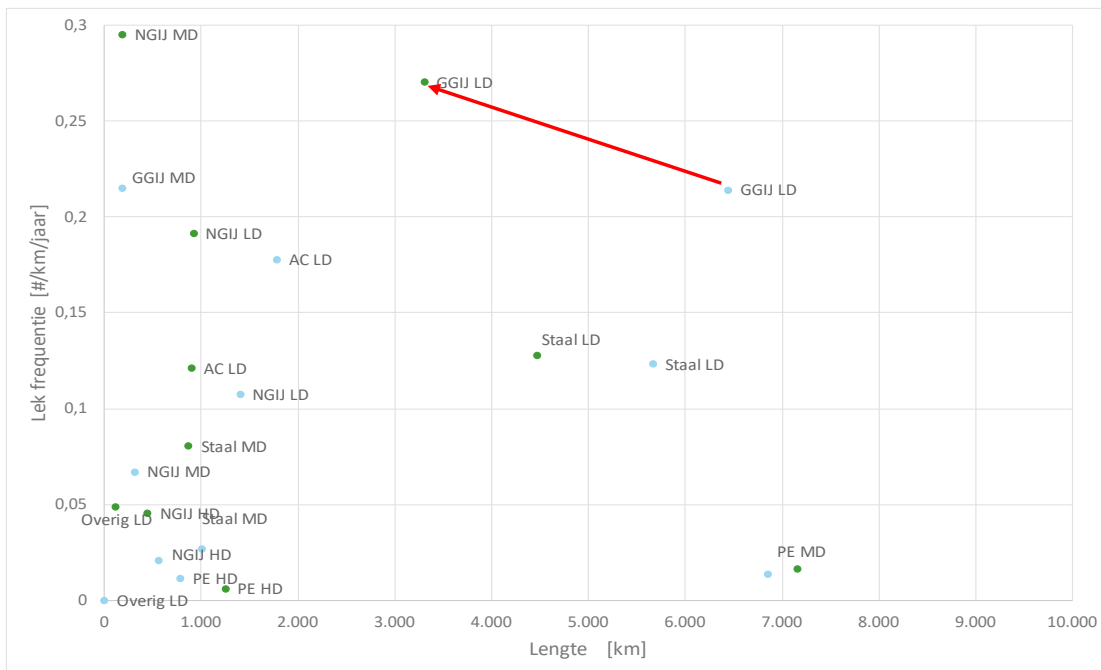
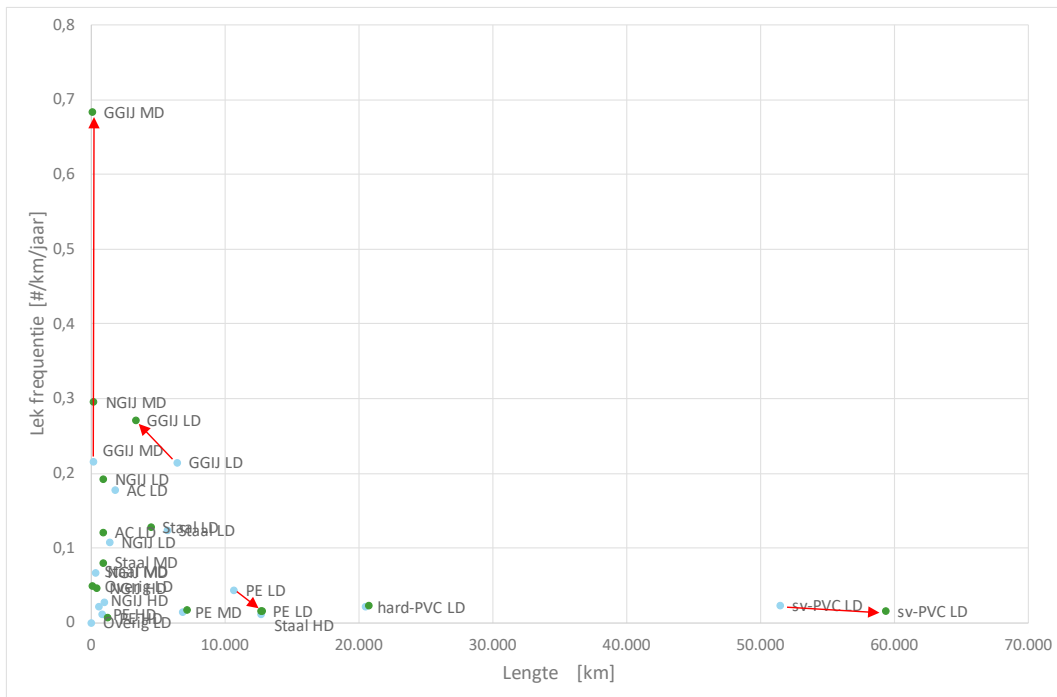
Ook de stations en aansluitleidingen worden op lekken gecontroleerd. Daarnaast worden er gasluchtmeldingen gedaan door klanten en derden. Voor de aansluitleidingen (sommige van lekzoeken en meldingen) en de gasstations staan de lekfrequenties in Figuur 39. De aantallen staan in Tabel .

Netonderdeel	Aantal
Aansluitleidingen	6.200.000
Meteropstelling	7.100.000
Binnenleiding	7.000.000
Districtstations	10.755
Afleverstations	10.433
Overslagstations	643
Hogedrukaansluitingen	34.943

**Tabel 5. Aantallen componenten in 2018 (m.u.v. hoofdleidingen) [36]**

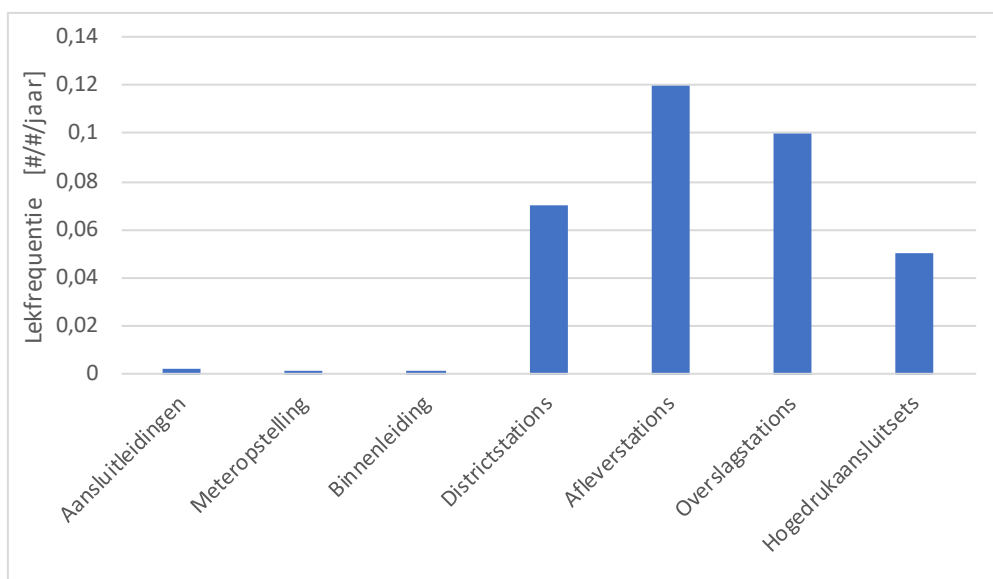
<sup>12</sup> Sommige lekken (Klasse 1 lekken) moeten binnen 24 uur worden gerepareerd. De overige lekken binnen 6 maanden.

<sup>13</sup> Het gemiddelde aantal lekken gaat niet naar 0 omdat er in het half jaar dat er lekken worden gerepareerd weer nieuwe lekken kunnen ontstaan.



**Figuur 38. De lekfrequentie van de verschillende materialen<sup>14</sup> en de lengtes ervan (boven volledig, linkeronderhoek uitvergroet). Met blauw is de gemiddelde situatie voor 2006 t/m 2008, in groen voor 2016 t/m 2018. De rode pijlen geven voor een aantal gevallen de verschuivingen in 10 jaar: PE en sv-PVC nemen toe in lengte en dalen in frequentie; grijs gietijzer neemt af in lengte maar stijgt in aantal lekken.**

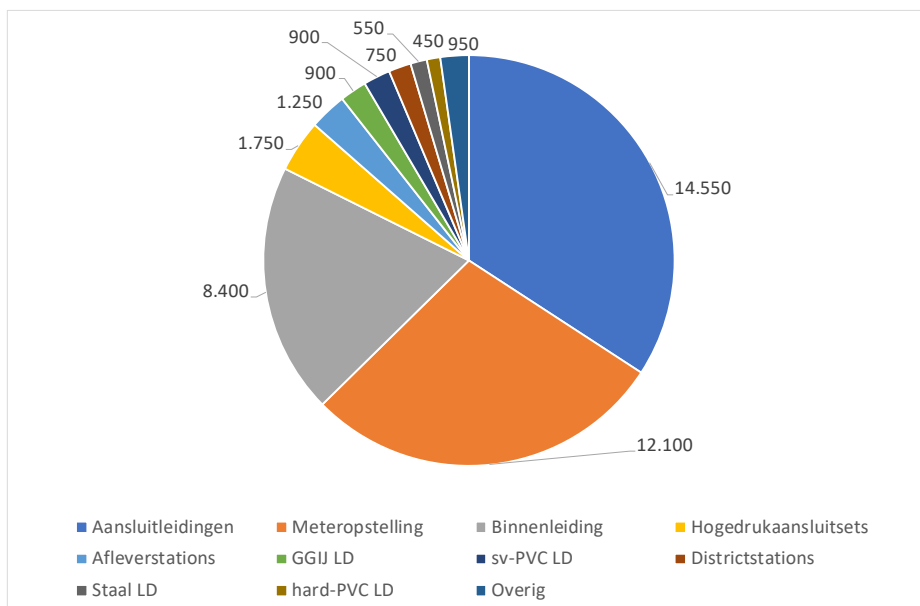
<sup>14</sup> De data is afkomstig uit [35]. Daar worden de netwerken verdeeld in druk naar LD, MD en HD. Nu wordt alleen nog onderscheid gemaakt van LD (t/m 200 mbar) en HD (boven 200 mbar).



**Figuur 39. Lekfrequenties van overige netdelen: aansluitleidingen, meters, binnenleidingen en stations.**

Op basis van bovenstaande gegevens kan het totaal aantal lekken dat per jaar ontstaat voor de verschillende componenten worden berekend. Het resultaat staat in onderstaande figuur. Ongeveer 80% van de aansluitleidingen betreft gasluchtmeldingen. Voor de meteropstelling en de binnenleiding is dat 100%.

Rond 40% van de gasluchtmeldingen wordt gekenmerkt als "veiligheid in het geding". Ook 40% van de gevonden lekken bij lekzoeken [37] wordt in gaslekindicatie klasse I<sup>15</sup> gecategoriseerd.



**Figuur 40. Bijdrage aan aantal lekken in de Nederlandse aardgasvoorziening.**

Uit het register "Meldingen gasongevallen en ernstige incidenten" blijkt dat over de periode 2009 t/m 2012 totaal 1174 incidenten zijn gemeld<sup>16</sup> met vrije gasuitstroom (Zie Tabel ).

<sup>15</sup> D.w.z. het gevonden lek geeft een concentratie van hoger dan 10.000 ppm, of indien binnen 2 m van de gevel, boven 100 ppm, of indien binnen 0,5 m van de gevel boven 10ppm.

<sup>16</sup> Dit overlapt gedeeltelijk met de gasluchtmeldingen.

Categorie	Beschrijving	Frequentie (#/jaar)
Catastrofaal	Meerdere doden	0
Ernstig	1 dode	0
Behoorlijk	Ernstig letsel	0,5
Matig	Letsel met verzuim	3,25
Klein	Bijna ongeval, geen tot licht letsel	8,00
Verwaarloosbaar	Gevaarlijke situatie	281,75

**Tabel 6. Aantal gasongevallen en ernstige incidenten verdeeld over de verschillende categorieën.**

De belangrijkste conclusies rond de aard en de omvang van lekkages voor aardgas kunnen als volgt worden samengevat:

1. De hoogste frequentie lekken in het aardgasdistributiesysteem treedt op bij distributiematerialen zoals grijs en nodulair gietijzer, asbest cement en staal. Met uitzondering van staal worden deze materialen al geruime tijd niet meer aangelegd en worden structureel gesaneerd uit het gasdistributienet.
2. De meeste gaslekken ontstaan in de aansluitleiding, gevolgd door de meteraansluiting en binnenleiding, dus in en dichtbij de woning. Verreweg het grootste deel van deze lekken wordt geconstateerd door gasluchtmeldingen omdat derden het geodoriseerde gas ruiken en herkennen. Ongeveer 1/6<sup>e</sup> van de lekkages ontstaat buiten het huidige domein van de netbeheerder in met name de binnenleidingen.



## **About DNV GL**

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