

Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte



Instituut Fysieke Veiligheid
Kennisonwikkeling en onderwijs
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Instituut Fysieke Veiligheid (2020). *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*. Arnhem: IFV.

Titel: Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte
Datum: 14 oktober 2020
Status: Definitief
Versie: 1.0
Auteurs: dr. M.B. Spoelstra
Met dank aan: Ir. N. W. van den Berg en E.S Korbee Msc (Rijkswaterstaat WVL),
ing. J. van der Graaf en ir. I. Trijssenaar (IFV), Ir. P. te Morsche
(Alliander), ing. F.H.M. van Alphen (Stedin), ing. R. van Hooijdonk
(Enexis), ing. M. van den Berg en ing. M. Meijer (VRR)
Review: dr.ir. N. Rosmuller
Eindverantwoordelijk: dr.ir. N. Rosmuller

Voorwoord

“Gaaf het waterstof worden? Of toch elektrisch?” Een veel gehoorde vraag, zowel in relatie tot mobiliteit als in relatie tot de energievoorziening van huishoudens en de industrie. Het antwoord hierop weet niemand met zekerheid en is in het kader van het voorliggend rapport ook minder relevant. Wat het ook gaat worden (misschien wel een mix van deze twee opties of van meer), je zult de veiligheidsrisico's moeten doorgronden om tot een verantwoorde ontwikkeling en implementatie te komen. Die ontwikkeling is grotendeels de verantwoordelijkheid van marktpartijen, waarbij overheden de kaders (moeten gaan) stellen. Een onderdeel van die kaders zal ook uit de hoek van de veiligheidsregio's kunnen, misschien wel moeten, komen. Veiligheidsregio's zijn namelijk de veiligheidsadviseur van het bevoegd gezag met kennis op het gebied van gebouw- en omgevingsveiligheid, incidentontwikkeling en incidentbestrijding. Dit geldt zeker ook voor waterstofveiligheid in een besloten ruimte. Dat zijn ruimtes die voor een aanzienlijk deel afgeschermd zijn van de omgeving, met als gevolg dat er (a-)typische verspreidingspatronen kunnen plaatsvinden en sprake kan zijn van een ophoping van vrijkomende hoeveelheden waterstof.

Deze studie brengt de specifieke veiligheidsaspecten in kaart die gepaard gaan met het vrijkomen van waterstof in een besloten ruimte. Zij biedt de adviseurs van de veiligheidsregio inzichten die zij kunnen gebruiken bij hun advisering omtrent de projecten en ontwikkelingen van waterstoftoepassingen in een besloten ruimte. We hebben voor de omschrijving van die inzichten de logische volgordelijkheid (chronologie) van een waterstofincidentscenario als structurerend mechanisme genomen: het vrijkomen van waterstof, de verspreiding ervan en de mogelijke gevaren die daarbij horen. Voor elk van die 'fases' in de ontwikkeling van het incidentscenario worden maatregelen genoemd, maatregelen die veiligheidsregio's in hun advisering kunnen betrekken.

Waterstofveiligheidskennis is bij tal van organisaties in delen aanwezig en het mooie van dit document is dat we die verschillende kenniscomponenten bijeen hebben weten te brengen en een plek hebben kunnen geven in dit rapport. Ik ben de deskundigen van de netbeheerders en veiligheidsregio's die hebben meegewerkt aan dit document dan ook zeer dankbaar voor hun bijdrage.

Kennis van de veiligheidsaspecten van waterstof is niet statisch, en zal zich verder blijven ontwikkelen, enerzijds door nieuwe studies en anderzijds door ervaringen in de praktijk en het evalueren daarvan. Op deze wijze sluiten we de kenniscirkel. 'Het rond maken van de kenniscirkel' is voor het IFV als kennis- en opleidingsinstituut de manier om invulling te geven aan onze ambitie en rol, te weten de ondersteuning van met name de veiligheidsregio's. Ik wil dan ook eenieder oproepen om additionele kennis van en ervaringen met waterstofveiligheid in besloten ruimtes met ons te delen. Want met die informatie kunnen wij onze ambitie en rol waarmaken in dit zich in rap tempo ontwikkelende onderdeel van de gehele energietransitie.

Nils Rosmuller
Lector Energie en transportveiligheid

Inhoud

	Samenvatting	6
	Inleiding	9
1	Eigenschappen van waterstof	12
1.1	Inleiding	12
1.2	Fysische eigenschappen	12
2	Op welke manieren kan waterstof vrijkomen in een besloten ruimte?	15
2.1	Inleiding	15
2.2	Waterstoflekken	16
3	Hoe verspreidt waterstof zich in een besloten ruimte?	20
3.1	Inleiding	20
3.2	Verspreiding	20
4	Hoe werkt de verspreiding van waterstof door op de waterstofconcentraties?	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Effect van totale hoeveelheid uitgestroomde waterstof	25
4.3	De invloed van het uitstroomdebiet	25
4.4	De invloed van turbulentie	26
5	Wat zijn in een besloten ruimte gevaarlijke waterstofconcentraties?	29
5.1	Inleiding	29
5.2	Gebeurtenissenboom	29
5.3	Brand	30
5.4	Explosie	31
5.5	Overdruk	32
5.6	Zuurstofverdringing	34
6	Wat zijn de ontstekingskansen bij de gevaarlijke waterstofconcentraties?	35
6.1	Inleiding	35
6.2	Minimum ontstekingsenergie	35
6.3	Ontsteking	36
6.4	Ontstekingskans	38
6.5	Ontstekingskansen bij grote incidenten	39
7	Welke maatregelen kunnen worden getroffen?	41
7.1	Inleiding	41
7.2	Procesbeheersing	42
7.3	Herstel van afwijkingen	43
7.4	Noodbescherming	43
7.5	Beperking van uitstroming	43
7.6	Voorkomen van escalatie	43
7.7	Persoonlijke bescherming en hulpverlening	47

Literatuur	49
Bijlage 1	54
Bijlage 2	56

Samenvatting

Het (deels) vervangen van aardgas door waterstof is één van de manieren om Nederland van voldoende energie te kunnen voorzien wanneer het gebruik van aardgas wordt teruggedrongen. De aanwezigheid en het gebruik van waterstof in een besloten ruimte zoals een woning, roepen vragen op over de veiligheid daarvan. Vanuit het lectoraat Energie- en Transportveiligheid van het IFV is het initiatief gekomen om een literatuuronderzoek uit te voeren naar de veiligheidsaspecten van het gebruik van waterstof in een besloten ruimte. Deze studie is relevant voor het beoordelen van veiligheidsrisico's door adviseurs van veiligheidsregio's. De onderzoeksvragen, die zijn opgesteld in samenspraak met deelnemers van de Community of practice Waterstof, luiden als volgt:

1. Op welke manieren kan waterstof vrijkomen in een besloten ruimte?
2. Hoe verspreidt waterstof zich in een besloten ruimte?
3. Hoe werkt deze verspreiding door op de waterstofconcentraties?
4. Wat zijn in een besloten ruimte gevaarlijke waterstofconcentraties?
5. Wat zijn de ontstekingskansen bij deze concentraties?
6. Wat zijn de effecten wanneer waterstof bij diverse concentraties ontsteekt?
7. Welke maatregelen kunnen getroffen worden om gevaarlijke concentraties in een besloten ruimte te voorkomen?

Tijdens het schrijven van dit rapport bleek dat onderzoeksvragen 4 en 6 veel overlap kenden. Daarom zijn ze samengevoegd. Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, is kennis nodig van de fysische eigenschappen van waterstof, die in het eerste hoofdstuk worden besproken. De manier waarop waterstof zich in een bepaalde situatie zal gedragen, blijkt niet altijd direct af te leiden uit zijn fysische eigenschappen. De omstandigheden ter plaatse zijn medebepalend voor het gedrag en de verspreiding van waterstof.

Zuiver waterstof dat in een woning wordt gebruikt, wordt via een leidingsysteem van de meterkast naar de cv-ketel geleid. Op diverse plekken in de woning kan waterstof vrijkomen door een lek in de leidingen of door defecte installaties. De hoeveelheid waterstof die door diffusie door een leidingwand gaat, is verwaarloosbaar klein. De manier waarop waterstof vrij kan komen, verschilt niet wezenlijk van die waarop aardgas vrijkomt, behalve dat waterstof verbrossing als extra faalmechanisme kent. Bij de lage drukken en temperatuur van waterstofleidingen in woningen (en in de toevoerleidingen naar de woningen), is echter geen waterstofverbrossing te verwachten.

De verspreiding van waterstof in een besloten ruimte is in te delen in een uitstroombfase (waarin de waterstofconcentratie toeneemt), een verspreidingsfase (waarin het waterstof zich verspreidt door diffusie) en een stationaire eindfase (waarin de waterstofconcentratie uniform verdeeld is niet meer verandert). In een besloten ruimte zal waterstof zich ophopen onder plafonds en daken en daar – afhankelijk van de omstandigheden – gevaarlijke concentraties bereiken. Dergelijke waterstoflagen kennen qua structuur twee uitersten: een uniform verdeelde waterstoflaag waar de waterstofconcentratie overal even groot is, en een wa-

terstoflaag die uit meerdere lagen van verschillende concentratie bestaat. Kleine waterstoflekkages geven laminaire stromingen met weinig turbulentie, waardoor een gelaagde waterstoflaag ontstaat. Grote waterstoflekkages geven turbulente stromingen, waardoor een uniform verdeelde waterstoflaag ontstaat. Obstakels en ventilatie zorgen voor een verandering van het verspreidingsmechanisme en daarmee voor een betere opmenging van waterstof.

De totale hoeveelheid waterstof die vrijkomt, is bepalend voor de uiteindelijke waterstofconcentratie in een ruimte. Hoe hoger deze hoeveelheid, hoe groter de waterstofconcentratie in de ruimte en hoe langer het duurt voordat de concentratie onder de LFL komen. Lage uitstroomdebieten zorgen voor gelaagdheid en de waterstofconcentratie in de hoogst gelegen lagen is gedurende de uitstroomfase en verspreidingsfase hoger dan in de eindfase. Bij lage uitstroomdebieten houden de hoge waterstofconcentraties bovendien langer aan dan bij hoge uitstroomdebieten, die zorgen voor een uniforme waterstofverdeling. Opmenging van een waterstof-luchtmengsel zorgt voor een verdeling van het mengsel en daarmee voor een verlaging van de waterstofconcentraties.

Als waterstof vrijkomt en de waterstofwolk een ontstekingsbron tegenkomt, kunnen risicovolle situaties optreden door een fakkelbrand of een explosie. De waterstofconcentratie bepaalt de richting en daarmee de verspreiding van waterstofvlammen: deze vlammen gaan omhoog bij 4-6 vol.%, omhoog en zijwaarts bij 6-9 vol.% en alle richtingen op vanaf 9 vol.%. De ruimte die het vlamfront heeft om zich te ontwikkelen, wordt bepaald door de waterstofconcentratie en door de locatie van de ontstekingsbron. Hoe meer ruimte het vlamfront heeft, hoe hoger de overdruk kan worden wanneer het waterstof-luchtmengsel ontsteekt. De hoogte van de overdruk in een ruimte door een explosie van waterstof, is afhankelijk van de waterstofconcentratie, de grootte en geometrie van de ruimte, de aanwezigheid en grootte van openingen en de aanwezigheid van obstakels. Waterstofconcentraties tot 10 vol.% geven nauwelijks overdruk, tenzij de aanwezige openingen te klein zijn om drukontlasting te geven. Obstakels zorgen voor meer turbulentie en een betere verbranding van waterstof, waardoor de overdruk hoger wordt. Een uniforme waterstoflaag geeft lagere overdrukken dan meerdere waterstoflagen van hogere concentratie.

Om risico's van waterstofbevattende systemen te kunnen berekenen, moet de kans op ontsteking bekend zijn. Dit is de som van de kans op directe ontsteking en de kans op vertraagde ontsteking. De ontstekingskans van waterstof is onbekend, maar gezien de lage ontstekingsenergie van waterstof is de ontstekingskans voor waterstof hoger dan voor andere ontvlambare gassen. Veel hangt af van de omstandigheden ter plaatse. Hoe lager de ontstekingsenergie, hoe groter de kans op ontsteking. De ontstekingsenergie van waterstof is het laagst bij 30 vol.% en het hoogst bij de LFL en de UFL. Bij lage concentraties is de ontstekingsenergie van waterstof vergelijkbaar met die van methaan. Als waterstof in een woning ontsteekt, zal dat eerder komen door een vertraagde ontsteking dan door een directe ontsteking. Waterstofmengsels met concentraties tussen 4-10 vol.% worden niet altijd ontstoken door een lichtschakelaar. Vonkontladingen zijn de belangrijkste ontstekingsbron.

Aan de hand van het vlinderdasmodel zijn maatregelen om de risico's van het vrijkomen van waterstof in besloten ruimtes te voorkomen of te beperken, in kaart gebracht. Preventieve maatregelen hebben betrekking op het beheersen van processen, het ingrijpen bij constatering van afwijkingen en op noodbescherming. Repressieve maatregelen hebben betrekking op het beperken van de uitstroming van waterstof, het voorkomen van het escaleren van een lekkage en persoonlijke bescherming en hulpverlening. De belangrijkste maatregelen voor

het voorkomen van een uitstroming van waterstof binnenshuis zijn normen met betrekking tot installatie, beheer en onderhoud van de waterstofbevattende systemen. De belangrijkste maatregelen voor het beheersen van een uitstroming zijn overdrukbeveiligingen en doorstroombegrenzers. De aanwezigheid van afsluiters kan een uitstroming te beperken, terwijl detectie, ventilatie, het vermijden of beheersen van ontstekingsbronnen en afstand houden de belangrijkste maatregelen zijn om escalatie van een uitstroming te voorkomen. De belangrijkste maatregelen voor hulpverleners die waterstofbranden bestrijden, zijn het stoppen van de toevoer en het niet blussen van waterstofbranden.

Inleiding

Achtergrond

Het gebruik van aardgas in Nederland moet verminderen, enerzijds om de uitstoot van CO₂ te beperken en anderzijds vanuit veiligheidsoverwegingen (aardbevingen in provincie Groningen). Het geheel of gedeeltelijk vervangen van aardgas door waterstof is één van de manieren om Nederland toch van voldoende energie te kunnen voorzien. Waterstof is ten opzichte van elektriciteit een geschikter medium om grote hoeveelheden energie te transporteren en op te slaan (Topsector Energie, 2020a), en omdat Nederland een wijdvertakt gasnet heeft, is vervanging van aardgas door waterstof een interessante optie. Het Klimaatakkoord onderkent dat en geeft aan dat “waterstof op de middellange (2030) en lange termijn (2050) een aantal cruciale functies in het energie- en grondstoffsysteem moet vervullen, onder andere in de gebouwde omgeving” (EZK, 2019).

Bijna alle huishoudens in Nederland zijn voorzien van een aardgasaansluiting. Voor de levering en het gebruik daarvan zijn regels opgesteld die variëren van werkinstructies tot wet- en regelgeving. Met waterstof staat Nederland aan het begin van dat proces: er is nog weinig ervaring opgedaan met het transporteren van waterstof door aardgasleidingen en hetzelfde geldt voor het gebruik van waterstof in cv-ketels in woningen. Er worden daarom praktijkproeven in woningen gedaan om de mogelijkheden van waterstof te testen en te demonstreren. Momenteel vinden er pilots plaats in Hoogeveen, Rozenburg, Lochem en in Stad aan 't Haringvliet (Topsector Energie, 2020b).

De aanwezigheid en het gebruik van zuiver waterstof in een besloten ruimte zoals een woning, roepen veel vragen op over het veilig gebruiken van waterstof. Waterstof is immers – net als aardgas – een gevaarlijke stof die met de nodige aandacht moet worden behandeld. Vanuit het lectoraat Energie- en Transportveiligheid van het IFV is het initiatief gekomen om een literatuuronderzoek uit te voeren naar de veiligheidsaspecten van het gebruik van waterstof in een besloten ruimte. Dit rapport beschrijft de resultaten van dat onderzoek.

Doel en doelgroep

Het doel van dit onderzoek is het ontsluiten van de beschikbare kennis over de veiligheidsaspecten van het gebruik van zuiver waterstof in een besloten ruimte aan de hand van een aantal onderzoeksvragen (zie daarvoor de volgende bladzijde).

De kennis die door dit onderzoek wordt opgedaan, is relevant voor het beoordelen van veiligheidsrisico's door adviseurs van veiligheidsregio's. Zij zijn de primaire doelgroep van dit document, omdat zij bevoegd gezagen adviseren over het borgen en bevorderen van de fysieke veiligheid en gezondheid in de fysieke omgeving. Dit kan zowel op provinciaal niveau (omgevingsvisie en -verordening) plaatsvinden, als op gemeentelijk niveau (omgevingsvisie en -plan en advies over externe veiligheidsaspecten bij de vergunningverlening). Dat neemt

uiteraard niet weg dat het iedereen vrij staat gebruik te maken van de in dit rapport beschikbaar gemaakte kennis.

Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen zijn opgesteld in samenspraak met deelnemers van de Community of practice Waterstof (CoP)¹ en volgen als het ware het tijdspad van het vrijkomen van waterstof in een besloten ruimte, waardoor er een bepaalde chronologie in de vragen zit. De onderzoeksvragen zijn:

8. Op welke manieren kan waterstof vrijkomen in een besloten ruimte?
9. Hoe verspreidt waterstof zich in een besloten ruimte?
10. Hoe werkt deze verspreiding door op de waterstofconcentraties?
11. Wat zijn in een besloten ruimte gevaarlijke waterstofconcentraties?
12. Wat zijn de ontstekingskansen bij deze concentraties?
13. Wat zijn de effecten wanneer waterstof ontsteekt bij diverse concentraties?
14. Welke maatregelen kunnen getroffen worden om gevaarlijke concentraties in een besloten ruimte te voorkomen?

Tijdens het schrijven van het rapport bleek dat de uitwerkingen van onderzoeksvragen 4 en 6 veel overlap kenden. Daarom is onderzoeksvraag 6 samengevoegd met onderzoeksvraag 4 en niet meer als afzonderlijke onderzoeksvraag terug te zien in de inhoudsopgave van dit rapport.

Afbakening

Met een besloten ruimte wordt in dit rapport een ruimte bedoeld die gelegen is in een woning en omsloten wordt door muren, een vloer en een plafond of dak. De ruimte kan ook een garage zijn, mits daar geen waterstofauto staat.

Het onderwerp van dit onderzoek is 'veiligheid van waterstof in een besloten ruimte'; dit onderwerp is onder te verdelen in vier categorieën die alle betrekking hebben op de toepassing van waterstof:

1. Algemene aspecten van waterstof in een besloten ruimte
2. Waterstof voor gebouwverwarming
3. Waterstofvoertuigen in tunnels
4. Stalling van waterstofvoertuigen.

De focus van dit onderzoek ligt op de algemene aspecten van het gebruik van waterstof in een besloten ruimte (categorie 1) en op het gebruik van waterstof in woningen ten behoeve van verwarming (categorie 2) en niet voor koken. Categorieën 3 en 4 hebben betrekking op mobiliteit en vallen daarmee onder het Waterstof Veiligheid en Innovatie Platform (WVIP) (H2Platform, 2020).

¹ De CoP Waterstof is een initiatief van het IFV en heeft als doel kennis en ervaringen op het gebied van waterstof op te halen en te delen. Brandweerspecialisten, de lectoren Transportveiligheid en Brandweerkunde van het IFV, specialisten uit het bedrijfsleven en overheden vormen samen de CoP Waterstof.

Onderzoeksmethode

Om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden en de antwoorden te kunnen onderbouwen, is een literatuurstudie uitgevoerd waarbij met diverse zoektermen gericht is gezocht in de kennisdatabank van ScienceDirect. De zoektermen verschilden per hoofdstuk en bestonden uit combinaties van twee of meer woorden die in de titel of in de abstract van een publicatie voor moesten komen. Voorbeelden van gebruikte zoektermen zijn HYDROGEN, SAFETY, CONFINED, HOUSE, DOMESTIC, CONCENTRATION, BOILER, HEATING en variaties op deze woorden. Na het bestuderen van de titel en/of de abstracts van de publicaties, zijn daarvan per onderwerp één of meerdere gekozen om nader bestudeerd te worden. Het betreffen veelal publicaties uit peer reviewed tijdschriften, waarvan de *International Journal of Hydrogen Energy* de belangrijkste is.

De relevantie van veel publicaties die op deze manier werden gevonden, was vaak beperkt. Daarom is ook met behulp van de 'sneeuwbalmethode' naar publicaties en documenten gezocht. Ten slotte zijn publicaties, artikelen en documenten verkregen via contacten en via zoeken op internet met Google Search.

Toepassing van literatuurstudie

De kennis die opgedaan is door het beantwoorden van de onderzoeksvragen, zal worden gebruikt en om lesmateriaal voor brandweerpersoneel te ontwikkelen en te actualiseren. De resultaten van de literatuurstudie worden daarnaast ook gebruikt om (aanvullende) kennisdocumenten voor veiligheidsregio's op te stellen, bijvoorbeeld een overzicht van bouwkundige, installatietechnische en organisatorische maatregelen die specifiek van toepassing is op het gebruik van waterstof voor verwarmingsdoeleinden in woningen.

Leeswijzer

Omdat waterstof de hoofdrol speelt in dit onderzoek, wordt in hoofdstuk 1 tekst en uitleg gegeven over een aantal (fysische) eigenschappen van waterstof. In de daaropvolgende hoofdstukken wordt steeds één van de zes onderzoeksvragen uitgewerkt op basis van literatuuronderzoek. Ieder hoofdstuk eindigt met een samenvatting van de belangrijkste aspecten van dat hoofdstuk.

1 Eigenschappen van waterstof

1.1 Inleiding

Dit rapport laat zich niet uit over de publieke perceptie van waterstof, maar probeert aan de hand van literatuurgegevens de veiligheidsaspecten te beschrijven die bij het gebruik van waterstof komen kijken. Hiervoor is kennis nodig van de fysische eigenschappen van waterstof, die in dit hoofdstuk zullen worden besproken.

1.2 Fysische eigenschappen

Over de eigenschappen van waterstof is veel geschreven zoals bijvoorbeeld voor Engelse en Europese projecten als HySafe, HyIndoor, HyResponse en Hy4Heat. De belangrijkste fysische eigenschappen van waterstof staan hieronder weergegeven. Elders in dit rapport wordt op sommige eigenschappen nog dieper ingegaan.

- > Bij een standaard temperatuur en druk (20 °C en 1 atm.) is waterstof gasvormig en heeft het geen kleur², geen geur, geen smaak en is het niet giftig. Dit betekent dat waterstof niet wordt waargenomen als het onverhoopt vrijkomt, tenzij maatregelen worden getroffen. Te denken valt aan het toevoegen van een geurmiddel zoals dat ook bij aardgas gebeurt en aan detectie van waterstof.
- > Waterstof heeft van alle gassen de laagste dichtheid ten opzichte van lucht: 0,083 kg/m³ tegenover 1,205 kg/m³. Waterstof is daarmee veertien keer lichter dan lucht en dit veroorzaakt het grote stijgend vermogen van waterstof. Dit zorgt enerzijds snel voor verdunning, maar kan anderzijds ook voor gevaarlijke situaties zorgen. Wanneer waterstof vrijkomt in een besloten ruimte, kan het zich verzamelen onder een dak en daar hoge concentraties bereiken.
- > Diffusie draagt ten opzichte van de stijgsnelheid in mindere mate bij aan de verspreiding van waterstof in lucht, ook al is de diffusiecoëfficiënt van waterstof groter dan bijvoorbeeld die van methaan, het hoofdbestanddeel van aardgas.
- > Waterstof kent een breed ontvlambaarheidsgebied. De LFL ('lower flammability limit') ligt bij 4 vol.% en de UFL ('upper flammability limit') bij 75 vol.%.³ De LFL is van deze twee grenswaarden de belangrijkste, omdat deze waarde als eerste wordt bereikt bij het vrijkomen van waterstof. Zie verder ook paragraaf 5.3.1.
- > De minimale ontstekingsenergie van waterstof is 0,019 mJ en geldt voor een waterstofconcentratie van ongeveer 30 vol.%. Bij de LFL en de UFL is de ontstekingsenergie hoger. Zie verder paragraaf 6.2.

² Wanneer bij verbranding deeltjes mee worden gesleurd, bijvoorbeeld door luchtinmenging, verbranden deze deeltjes ook en zijn waterstofvlammen zichtbaar.

³ LFL en UFL zijn respectievelijk de laagste en de hoogste concentratie waarbij een ontvlambaar gas ontsteekt en waarbij de vlam die ontstaat zichzelf in stand houdt.

- > De warmtestraling die een waterstofvlam uitstraalt, is laag door de afwezigheid van koolstof (dat voor hittestralende roetdeeltjes kan zorgen) en door de aanwezigheid van warmte-absorberende waterdamp in de vlam (HySafe, 2009). Waterstofvlammen houden hun warmte dus binnen en zijn in vergelijking met vlammen van koolwaterstoffen erg heet.
- > De snelheid waarmee een waterstofvlam brandt, is hoger dan die van koolwaterstofvlammen: zo'n 3 m/s voor waterstof tegen 0,4 m/s voor methaan. Hoe hoger de waterstofconcentratie, hoe hoger de brandsnelheid en hoe groter de kans op een overgang van deflagratie naar detonatie (zie paragraaf 5.4).
- > Waterstof heeft een lage viscositeit. De viscositeit zegt iets over de 'stropigerigheid' van een gas of een vloeistof. Hoe lager de viscositeit, hoe makkelijker moleculen langs elkaar heen schuiven. Tezamen met de grootte en diffusiemogelijkheden van waterstof zal dit naar verwachting relatief snel voor lekkages bij afdichtingen zorgen.

De fysische eigenschappen bepalen deels de manier waarop waterstof zich in een situatie zal gedragen. Ook de manier waarop waterstof vrijkomt en de omstandigheden ter plaatse beïnvloeden het gedrag van waterstof wanneer het onverhoopt vrijkomt.

Voor veel toepassingen zal in de toekomst mogelijk aardgas worden vervangen door waterstof. Om die reden worden de fysische eigenschappen van waterstof hieronder vergeleken met die van methaan, het hoofdbestanddeel van aardgas.

Tabel 1.1 Fysische eigenschappen van waterstof en methaan (Bronnen: Molkov (2012), HyResponse (2016) en (HySafe, 2019))

Eigenschap	Waterstof	Methaan
Molecuulgewicht (g/mol)	2,01	16,04
Dichtheid (kg/m ³)	0,08345	0,66
Stoichiometrische concentratie (vol.%)	29,6	9,5
Diffusiecoëfficiënt in lucht (m ² /s)	0,61 × 10 ⁻⁴	0,21 × 10 ⁻⁴
LFL voor opwaartse vlam (vol.%)	4,0	5,3
UFL voor opwaartse vlam (vol.%)	75,0	15
Detonatiegrenzen (vol.%)	11 – 70 (HySafe) 11 – 59 (HyResponse)	5,7 - 14
Minimum ontstekingsenergie (mJ)	0,019	0,28
Zelfontstekingstemperatuur (°C)	560 - 585	537
Vlamtemperatuur (°C)	2045	1960
Brandsnelheid (m/s)	2,6 – 3,2	0,4

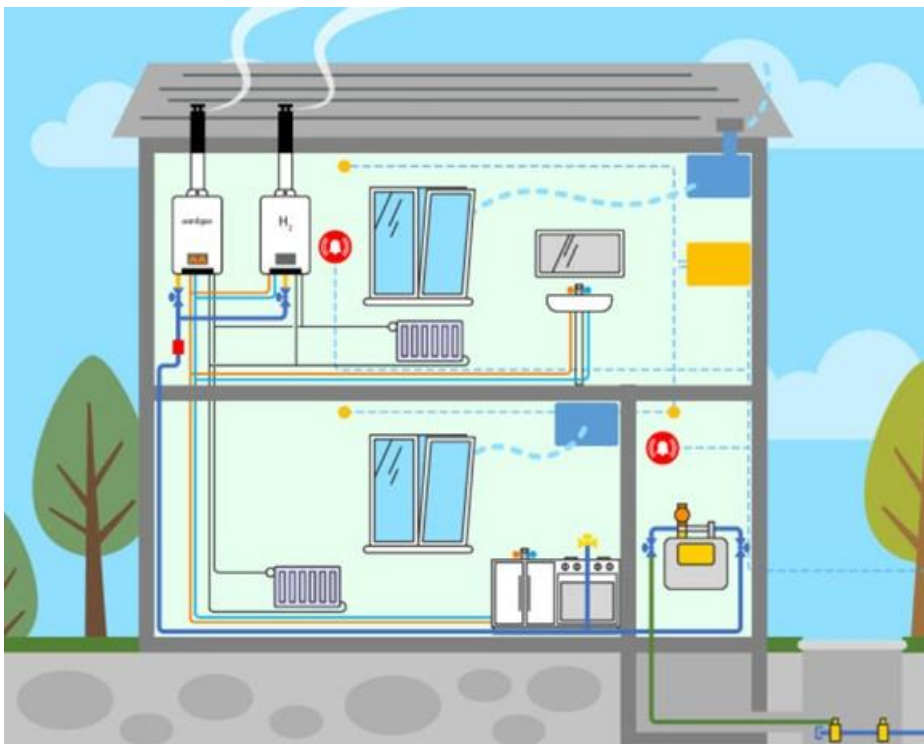
Samenvattend

- > De fysische eigenschappen van waterstof worden gegeven en vergeleken met methaan, het hoofdbestanddeel van aardgas.
- > De manier waarop waterstof zich in een situatie zal gedragen, is niet altijd direct af te leiden uit de fysische eigenschappen van waterstof. De omstandigheden ter plaatse zijn medebepalend voor het gedrag en de verspreiding van waterstof.

2 Op welke manieren kan waterstof vrijkomen in een besloten ruimte?

2.1 Inleiding

Zuiver waterstof dat in een woning gebruikt wordt voor stoken en koken, heeft bij aankomst in de woning een druk van maximaal 100 mbar die vlak voor de meter verlaagd wordt naar 30 mbar. Via een leidingsysteem wordt het waterstof naar de cv-ketel geleid. Op diverse plekken in de woning kan waterstof vrijkomen ten gevolge van een lek in de leidingen of van defecte apparatuur.



Figuur 2.1 Schematische weergave van gasaansluitingen (Bron: Liander)

Bij het falen van systemen wordt vaak onderscheid gemaakt tussen grote en kleine lekken. Bij een groot lek komt de inhoud van het systeem in zeer korte tijd vrij, terwijl bij een klein lek waterstof gedurende langere tijd uitstroomt. De duur kan hierbij variëren van enkele seconden tot uren of zelfs dagen. De kans op een groot lek is beduidend kleiner dan de kans op een klein lek. In dit rapport wordt met de term 'lek' daarom vooral het scenario van een klein lek bedoeld.

2.2 Waterstoflekken

2.2.1 Waterstof versus aardgas

De calorische waarde van waterstof is lager dan voor aardgas: 10,8 MJ/m³ vs. 36,4 MJ/m³. Dit betekent dat bij verbranding van waterstof minder warmte vrijkomt dan bij de verbranding van aardgas. Voor het verwarmen van een huis zijn daarom ongeveer drie keer meer kubieke meters waterstof nodig dan voor aardgas. Qua volume zal bij een gaslek tot drie keer meer waterstof vrijkomen dan bij aardgas (bij gelijke druk). Dit varieert van een factor 1,6 bij kleine lekken (van een 100 mbar-leiding) tot een factor 3 bij grote lekken (KIWA, 2019).

2.2.2 Convectie, permeatie

Natuurkundig gezien zijn convectie en permeatie de belangrijkste manieren waarop waterstof vrij kan komen (Schefer et al., 2006). Convectie houdt in dat waterstofmoleculen in het waterstofbevattende systeem⁴ een drukverschil met buiten ervaren door de aanwezigheid van openingen (gaten, breuken of defecten) in de wanden van het systeem. Waterstofmoleculen verlaten het systeem door deze openingen die een diameter hebben die vele malen groter is dan de diameter van een waterstofmolecuul.

Permeatie houdt in dat moleculen een concentratieverschil ervaren en ten gevolge daarvan door de wanden van het waterstofbevattende systeem heen gaan.⁵ De mate van permeatie van waterstof is afhankelijk van het materiaal waarvan de wand is gemaakt, de waterstofconcentratie in het systeem en de temperatuur. Bij permeatie is geen sprake van lokale uitstroming, maar vindt 'uitstroming' continu en verspreid plaats over het gehele oppervlak van het waterstofbevattende systeem. Uit de verzamelde voorbeelden van Tabel 2.1 is te zien dat de hoeveelheid vrijkomende waterstof bij kamertemperatuur verwaarloosbaar is ten opzichte van de uitstroming van waterstof door een opening (Mejia, 2020).

Tabel 2.1 Voorbeelden van uitstroomdebieten van waterstof door de leidingwand heen (permeatie) en door een opening (convectie)

Voorbeeld	Druk (bar)	Type uitstroom	Uitstroom	Bron
Aardgastransportleiding	80	Permeatie	1,7 m ³ /(km-jaar) ≡ 0,06 ml/(km-s)	(Krom, 2020)
Polymere distributieleiding aardgas	0,1	Permeatie	51 m ³ /(km-jaar) ≡ 1,6 ml/(km-s)	(KIWA, 2018)
Polymere distributieleiding waterstof	0,1	Permeatie	< 6 m ³ /(km-jaar) ≡ < 0,2 ml/(km-s)	(KIWA, 2018)
Toegestaan lekdebiet aardgas	0,1	Convectie	1,4 ml/s	(NEN, 2018)
Guillotinebreuk waterstofleiding	0,1	Convectie	170 ml/s	(Kiwa Gastec, 2015)

⁴ De waterstofbevattende systemen in woningen zijn leidingen. In ketels, kooktoestellen en brandstofcellen wordt waterstof omgezet; deze apparaten slaan dus geen waterstof op.

⁵ Deze verplaatsing wordt ook wel diffusie genoemd en beide termen worden vaak door elkaar gebruikt.

Waar bij een polymere leiding met een waterstofdruk van 100 mbar verspreid over een lengte van 1 kilometer slechts 1,6 milliliter waterstof per seconde vrijkomt, komt een dergelijke hoeveelheid of meer op één plek vrij in geval van een lek.

Permeatie vormt wel een risico wanneer een kunststof gasleiding zich in een mantelbuis bevindt. In de ruimte tussen beide omhulsels kan zich bij afwezigheid van ventilatie namelijk waterstof ophopen (KIWA, 2018).

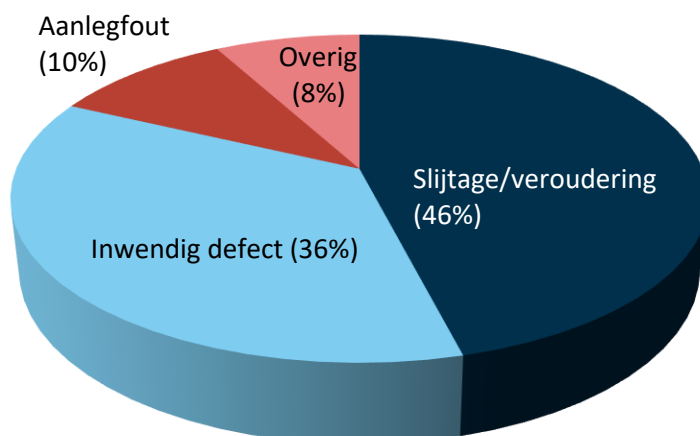
2.2.3 Faaloorzaken

Uitstroming van waterstof vindt plaats doordat er in de wand van het waterstofbevattende systeem een opening zit. De grootte van de opening ligt in de orde van tienden van millimeters tot millimeters of meer. De uitstroming kan zich voordoen tijdens aanleg, gebruik en onderhoud van waterstofbevattende systemen.

In de literatuur worden voor leidingen de volgende faaloorzaken genoemd, ongeacht de stof die vervoerd wordt (Mejia et al, 2020):

- > verbindingen sluiten niet op elkaar aan door verkeerd materiaalgebruik
- > verbindingen sluiten niet goed op elkaar aan door onjuiste montage
- > verbindingen sluiten niet goed op elkaar aan door slecht onderhoud
- > leidingen falen door externe impact van menselijk handelen
- > leidingen falen door externe impact vanwege vallen, aardbevingen of andere oorzaken van overmacht.

Gegevens van Netbeheer Nederland over aardgasleidingen en -aansluitingen laten zien dat storingen vooral veroorzaakt worden door slijtage c.q. veroudering en door inwendige defecten. Voor het leidingwerk buitenshuis geldt graafschade als belangrijke faaloorzaak (Netbeheer Nederland, 2019). Ter illustratie laat Figuur 2.2 de storingen zien in de gasmeteropstellingen.



Figuur 2.2 Storingsverdeling (N = 33.456) voor gasmeteropstellingen (Bron: Netbeheer Nederland)

Voor waterstof zal de storingsverdeling naar verwachting niet veel anders zijn. Wanneer waterstof in dezelfde mate als aardgas gebruikt zal worden, zal het aantal storingen niet groter zijn, omdat de grootte van waterstof- en methaanmoleculen minstens een factor 1000 kleiner

is dan de grootte van een opening.⁶ Wel zal er ten opzichte van aardgas meer waterstof vrijkomen gezien de vluchtigheid van waterstof.

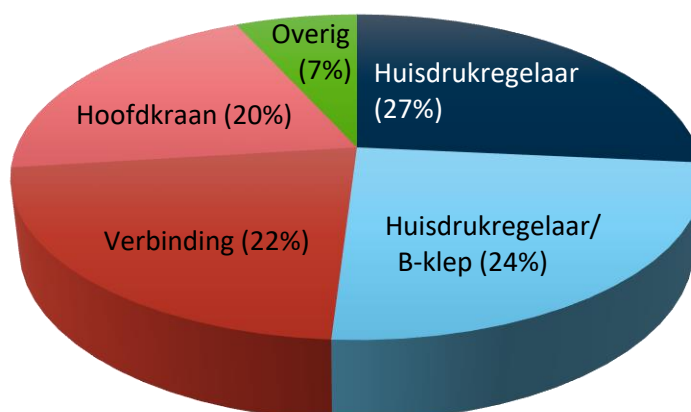
2.2.4 Materiaalaantasting

Door verbranding van ontvlambare gassen zoals aardgas en waterstof kunnen materialen in een brander aangetast worden, bijvoorbeeld door blaarvorming, het ontstaan van scheurtjes en smelten. In woningen bevinden branders zich in cv-ketels (KIWA, 2016).⁷ Voor waterstof zijn daarnaast nog twee andere degradatiemechanismen mogelijk, namelijk waterstofverbrossing door vermoeiingsbelasting en door statische belasting. De mate van verbrossing hangt onder meer af van de wijze van drukbelasten van het staal, de temperatuur en de aanwezigheid van defecten.

De grootte van het drukverschil en het aantal keer dat de druk in de leiding varieert hebben invloed op het vermoeiingsgedrag van staal en kunnen leiden tot waterstofverbrossing. Gezien de lage druk waarbij waterstof gebruikt wordt in woningen (< 100 mbar) is waterstofverbrossing door vermoeiingsbelasting in deze leidingen geen issue (Frazer-Nash, 2018). Bij waterstofverbrossing kan als gevolg van statische druk diffusie van waterstofatomen in staal leiden tot het broser worden van het staal. De gebruikscondities van waterstofleidingen in woningen is dusdanig (lage druk en temperatuur) dat dit type verbrossing niet mogelijk is, maar het speelt wel een rol in branders omdat de materialen daar direct in contact komen met de hete waterstofvlam (Frazer-Nash, 2018). Voor het verbranden van waterstof worden daarom ook nieuwe branders ontwikkeld.

2.2.5 Leklocaties

Omdat waterstof in Nederland nog niet wordt gebruikt in woningen, zijn er geen gegevens voorhanden over de leklocaties van waterstof. Voor aardgas zijn die gegevens er wel: regionale netbeheerders registreren waar storingen⁸ zich voordoen in het leidingsysteem naar en in woningen (Netbeheer Nederland, 2019). De meeste storingen komen voor in de gasmetersystemen (61%) en dan vooral bij verbindingen, regelaars, kleppen en kranen.



Figuur 2.3 Storingsverdeling (N = 33.456) per component voor gasmeteropstelling (Bron: Netbeheer Nederland)

⁶ De grootte van methaan- en waterstofmoleculen ligt in de orde van 10^{-11} m.

⁷ Een brander kan ook aanwezig zijn in een kooktoestel, maar daar wordt in dit rapport niet van uitgegaan.

⁸ Een storing houdt niet per definitie een gaslekkage in. Veel storingen zijn overigens te relateren aan de uitrol van slimme meters.

Samenvattend

- > Gaslekkages ontstaan hoofdzakelijk bij verbindingen, regelaars, kranen en kleppen.
- > Gaslekkages zijn meestal het gevolg van veroudering of van interne defecten.
- > De hoeveelheid waterstof die door diffusie door een leidingwand gaat, is verwaarloosbaar ten opzichte van de hoeveelheid waterstof die vrijkomt bij een leidinglek.
- > De manier waarop waterstof vrij kan komen, verschilt niet wezenlijk van die waarop aardgas vrijkomt, behalve dat waterstof verbrossing als extra faalmechanisme kent. Bij de lage drukken en temperatuur van waterstofleidingen in woningen (en in de toevoerleidingen naar de woningen), is echter geen waterstofverbrossing te verwachten.

3 Hoe verspreidt waterstof zich in een besloten ruimte?

3.1 Inleiding

Wanneer waterstof vrijkomt in de open lucht, zal het snel stijgen en zich verdunnen. Qua veiligheid is de open lucht een gunstiger locatie dan een gebouw of anderszins besloten ruimte. Waterstof zal zich dan namelijk ophopen onder plafonds en daken en daar – afhankelijk van de omstandigheden – gevaarlijke concentraties kunnen bereiken.

De verspreiding van waterstof in een besloten ruimte is in te delen in een uitstroombfase, een verspreidingsfase en een stationaire eindfase. In de uitstroombfase komt waterstof vrij en neemt de waterstofconcentratie toe, zo lang als waterstof wordt toegevoerd uit de opening. Nadat de uitstroom geëindigd is, verspreidt het waterstof-luchtmengsel zich langzaam naar beneden ten gevolge van diffusie. Dit is de verspreidingsfase. Na een lange tijd (een tijd die althans veel langer is dan de uitstromingsduur) is waterstof homogeen gemengd met de lucht in de besloten ruimte. De waterstofconcentratie verandert niet meer en een evenwichtssituatie is bereikt. Dit is de stationaire eindfase (De Stefano et al, 2019).

Dit hoofdstuk beschrijft de manier waarop waterstof vrijkomt en zich verspreidt en welke factoren daarbij in elke fase een rol spelen.

3.2 Verspreiding

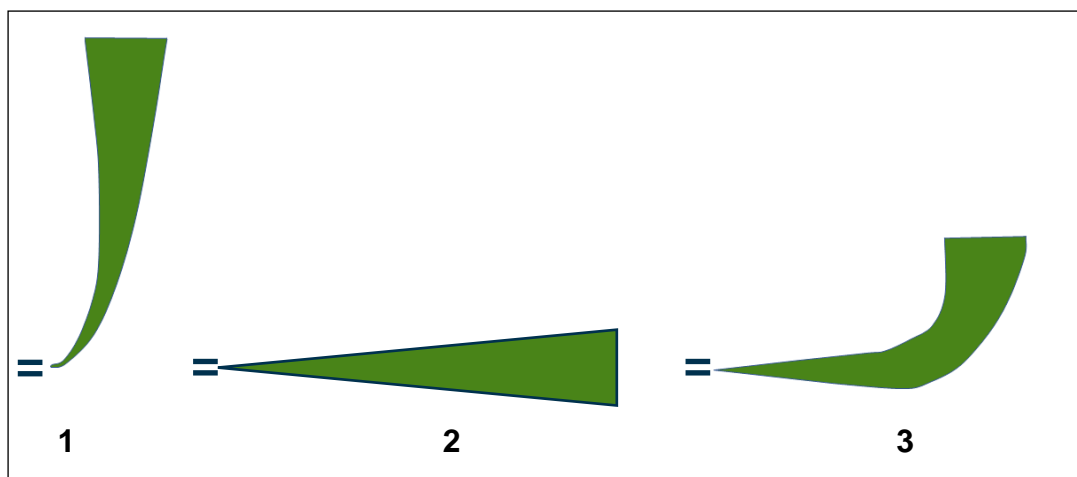
3.2.1 Algemeen

De waterstofmoleculen gaan bij uitstroming van een situatie van hoge druk naar een situatie van lage druk (omgevingsdruk). Door deze drukval verspreiden de moleculen zich; de jet zet uit en de waterstofmoleculen verliezen hun snelheid. Daarnaast is aan de randen van de jet sprake van wervelingen en wordt lucht aangezogen waardoor opmenging plaatsvindt.

De richting van een jet kan bepaald worden door het drijvend vermogen van waterstof (1), door de impuls waarmee waterstof vrijkomt (2) of door beide (3). In Figuur 3.1 wordt dit uitgebeeld voor een horizontale uitstroming (Molkov, 2012).

De jet gaat uiteindelijk over in een pluim. Wanneer de uitstroom buitenshuis plaatsvindt, verspreidt de pluim zich ten gevolge van de wind en ten gevolge van het stijgend vermogen van waterstof. Wanneer er sprake is van uitstroom in een besloten ruimte binnenshuis, is er geen

wind aanwezig en vormt zich een waterstofrijke laag onder het plafond van de ruimte. Er ontstaat daardoor een waterstofrijke laag met een bepaalde omvang en dikte die in de tijd kan veranderen. Een dergelijke laag kan ook elders in het gebouw voorkomen, bijvoorbeeld onder een dak.



Figuur 3.1 De drie typen jets (naar Molkov (2012))

Qua opbouw van de laag bestaan er twee uitersten (HySafe, 2009). Het ene uiterste is dat er meerdere waterstofrijke lagen zijn die in concentratie van elkaar verschillen en waarvan de waterstofconcentraties behoorlijk hoog kunnen worden (> 10 vol.%). Deze gelaagdheid, ook wel stratificatie genoemd, ontstaat wanneer het stijgend vermogen dominant is en er te weinig energie is om waterstof te laten mengen met lucht. Het andere uiterste is een goed gemengde waterstoflaag met een waterstofconcentratie die overal in de laag hetzelfde is. In dat geval is het stijgend vermogen niet dominant en is er genoeg energie in de vorm van turbulentie om opmenging te krijgen (Cariteau et al., 2012).

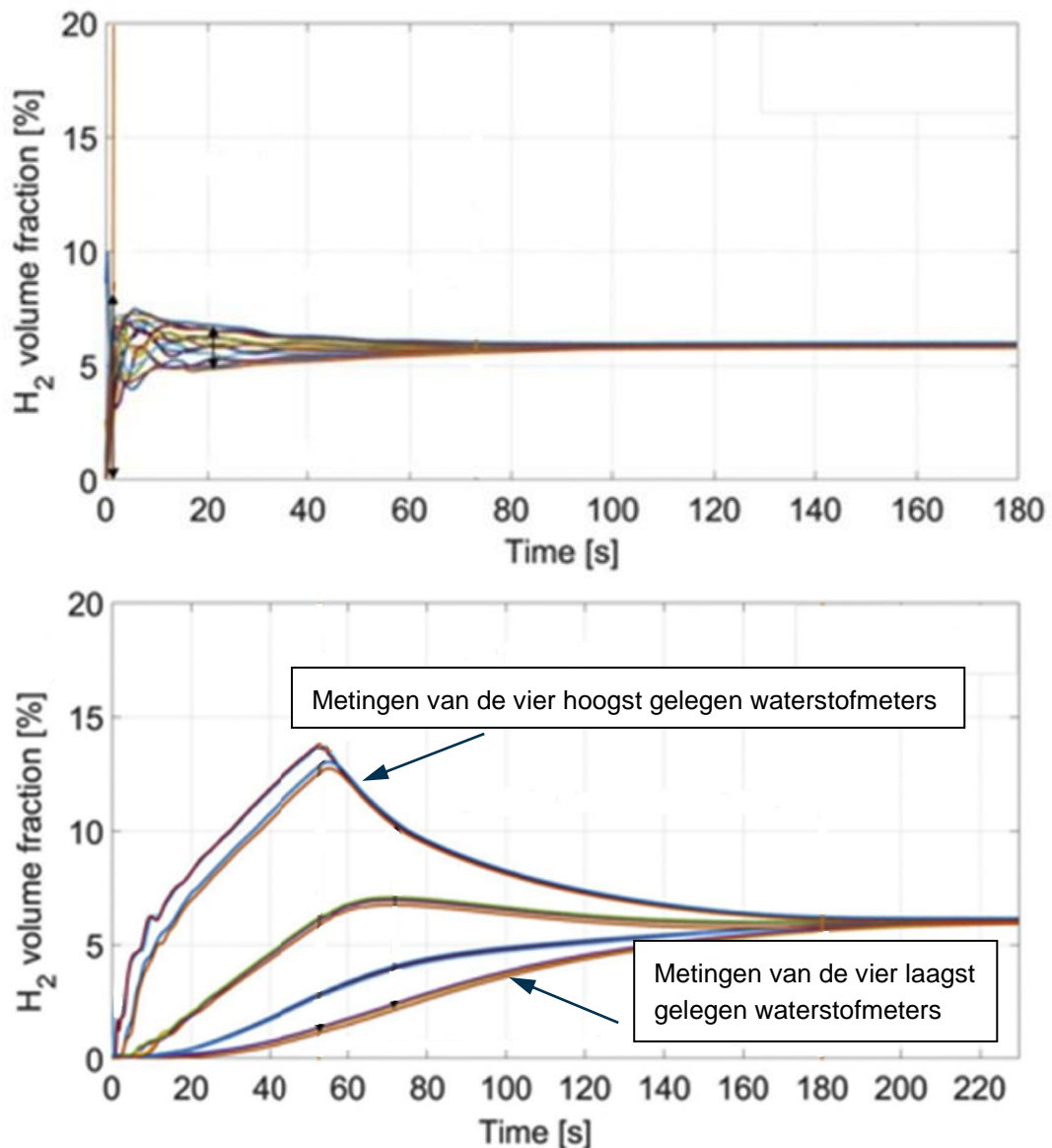
3.2.2 De invloed van het uitstroomdebiet

Het uitstroomdebiet – uitgedrukt in g/s of kg/s – is bepalend voor de manier waarop waterstofrijke lagen zich in de uitstroomfase ontwikkelen onder het plafond of dak van een ruimte. Bij hoge uitstroomdebieten is vaak sprake van veel turbulentie: waterstof verspreidt zich dan langs het plafond en de wanden van de ruimte en zakt naar beneden totdat de ruimte homogeen gevuld is. Bij lage uitstroomdebieten speelt turbulentie een veel geringere rol; waterstof stijgt naar het plafond en vormt daar lagen van verschillende concentraties (stratificatie). De hoogste waterstofconcentratie zijn te vinden in de lagen vlak onder het plafond (Lacome, 2011) (De Stefano et al, 2019).

Dit gedrag is goed te zien in experimenten waarbij men in een kleine besloten ruimte gelijke hoeveelheden waterstof geïnjecteerd heeft met twee verschillende uitstroomdebieten, zie Figuur 3.2 (De Stefano et al, 2019). De ruimte was voorzien van 16 waterstofmeters (op vier hoogtes op vier locaties) die de waterstofconcentraties maten. In de curves van Figuur 3.2 heeft iedere waterstofmeter een eigen kleur.

Bij het experiment waarbij de ruimte gevuld werd met het hoge debiet (6 m³ per uur), duurde de uitstroom 1 seconde. In het begin werden nog enige concentratieverschillen gemeten, maar al snel werd een homogene verdeling bereikt en waren de waterstofconcentraties overal gelijk (Figuur 3.2 boven).

Bij het experiment waarbij de ruimte gevuld werd met het lage debiet ($0,1 \text{ m}^3$ per uur), duurde de uitstroom 53 seconden en werden op de vier meethoogtes vier verschillende waterstofconcentraties gemeten. Er bleek sprake te zijn van gelaagdheid en hoe hoger de laag in de ruimte, hoe hoger de waterstofconcentratie in die laag. Nadat de uitstroom beëindigd was, werd de waterstofconcentratie in de besloten ruimte door diffusie steeds meer uniform verdeeld, totdat uiteindelijk dezelfde eindconcentratie werd bereikt als bij de uitstroming met het hoge debiet (Figuur 3.2 onder).



Figuur 3.2 Boven: uniforme verdeling bij $Q = 6 \text{ m}^3/\text{uur}$. Onder: gelaagdheid bij $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{uur}$. De 16 waterstofmeters hebben ieder een eigen kleur en zijn verdeeld over vier verschillende hoogtes (Bron: De Stefano, 2019, ter wille van de leesbaarheid zijn bij-schriften in de figuren weggehaald)

3.2.3 De invloed van turbulentie

De uitstroming van waterstof is turbulent of laminair van karakter. Laminaire stroming is een rustige stroming die één kant op gaat, terwijl turbulente stroming veel wilder is en meerdere

kanten op kan gaan. Hoe hoger de druk van het uitstromende gas, hoe turbulenter de uitstroom zal zijn (Schefer et al, 2006). Bij kleine spleetvormige lekken en met een uitstroming van orde grootte 1 liter per uur, is de uitstroming laminair van karakter. Bij grotere lekken wordt de uitstroming turbulent (KIWA, 2018) (DNVGL, 2020a). Obstakels en ventilatie beïnvloeden het stromingsgedrag van waterstof.

Obstakels

Obstakels beïnvloeden het verspreidingsgedrag van waterstof, maar de invloed is in vergelijking met het uitstroomdebiet minder groot. Het effect van obstakels verschilt voor laminaire en turbulente stroming. Bij laminaire stroming zorgen obstakels voor meer turbulentie waardoor waterstof beter gemengd wordt en de waterstoflaag qua concentratie meer uniform verdeeld is (Prasad et al, 2010). Bij turbulente stroming zorgen obstakels juist voor het verstoringen van de wervelingen, waardoor de waterstofjet energie verliest en wordt afgeremd. Hierdoor kan waterstof zich minder goed mengen met de lucht in de ruimte en wordt daardoor minder uniform verdeeld (De Stefano, 2019).

Ventilatie

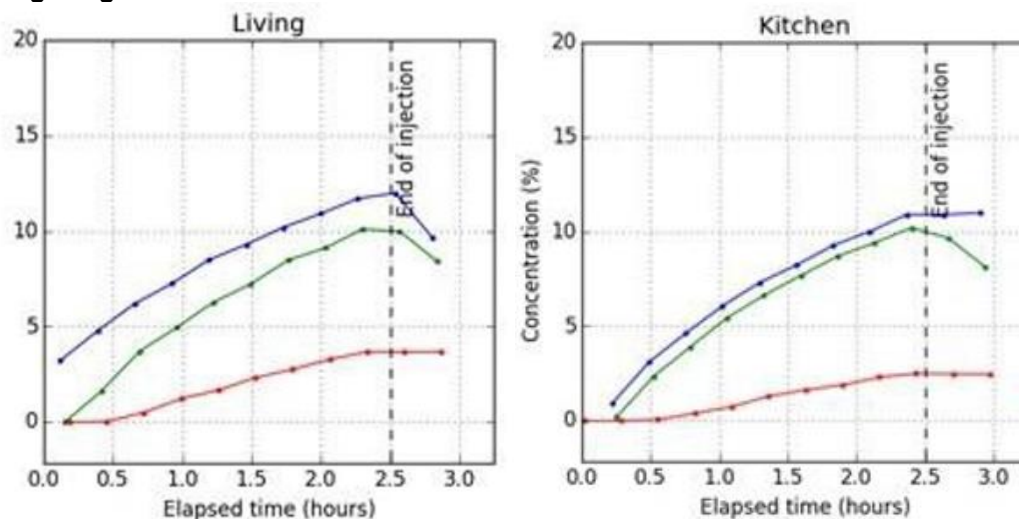
Ventilatie in een gebouw kan natuurlijk of mechanisch zijn. Natuurlijke ventilatie is een passieve vorm van ventileren waarbij luchtstromingen in een ruimte ontstaan door het open staan van deuren en/of ramen. Mechanische ventilatie is een actieve vorm van ventileren waarbij apparatuur wordt gebruikt om luchtstromingen in een ruimte te creëren. Door ventilatie ontstaan luchtstromingen, zeker als de ventilatieopeningen tegenover elkaar staan. Deze stromingen zorgen voor wervelingen en voor een betere opmenging van het waterstof-luchtmengsel (HySafe, 2009). In paragraaf 7.6.2 wordt ingegaan op ventilatie.

3.2.4 Praktijktesten in het Verenigd Koninkrijk

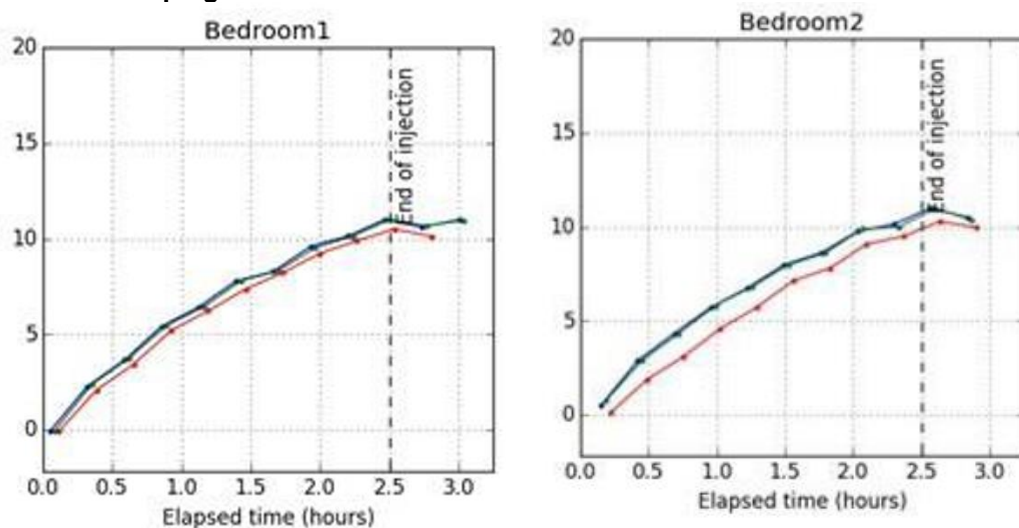
In het HyHouse-project zijn experimenten uitgevoerd in een oud huis in Schotland waarbij in enkele ruimtes op de begane grond waterstoflekkages werden gesimuleerd (KIWA Gastec, 2015). Op drie niveaus in kamers op de begane grond en op de eerste verdieping werd de waterstofconcentratie gevolgd. Alle deuren tussen de kamers stonden hierbij open. Steeds werden dezelfde patronen gezien, ongeacht de plaats van uitstroming en de luchtdichtheid van het huis. Op de begane grond werd overal een gelaagdheid van waterstof gemeten, maar op de eerste verdieping daarentegen werd overal een uniforme verdeling gezien, waarbij de drie meetpunten min of meer dezelfde waterstofconcentraties aangaven. Zie Figuur 3.3.

De verklaring die hiervoor gegeven wordt, is dat er sprake is van een schoorsteeneffect, waardoor een natuurlijke luchtbeweging ontstaat in het huis. Dit effect is op de begane grond duidelijker dan op de eerste verdieping. Volgens de auteur van dit rapport zou een betere verklaring zijn dat het debiet en de snelheid van het uitstromende waterstof op de begane grond dusdanig zijn, dat het stijgend vermogen van waterstof steeds dominant is en op de begane grond leidt tot een laminaire stroming en daarmee tot gelaagdheid. Het verdwijnen van de gelaagdheid op de eerste verdieping zou verklaard kunnen worden doordat waterstof gelijkmatig vrijkomt door de vrij regelmatig verspreide kieren en gaten van de houten vloer.

Begane grond:



Eerste verdieping:



Figuur 3.3 De waterstofconcentratie als functie van de tijd in vier verschillende kamers van het huis. Gedurende 2,5 uur werd in de woonkamer op de begane grond ('Living') waterstof geïnjecteerd met een debiet van 5,3 liter/s. De meetlocaties in de kamers zijn hoog (blauw), midden (groen) en laag (rood) (Bron: KIWA Gastec, 2015)

Samenvattend

- > De waterstoflaag die onder een plafond 'vast' komt te zitten, kent qua structuur twee uitersten: een uniform verdeelde waterstoflaag waar de waterstofconcentratie overal even groot is, en een waterstoflaag die uit meerdere lagen van verschillende concentratie bestaat.
- > Kleine waterstoflekkages geven laminaire stromingen met weinig turbulentie, waardoor onder het plafond een gelaagde waterstoflaag ontstaat.
- > Grote waterstoflekkages geven turbulente stromingen waardoor onder het plafond een uniform verdeelde waterstoflaag ontstaat.
- > Obstakels zorgen voor een verandering van het verspreidingsmechanisme.
- > Ventilatie zorgt voor turbulentie en daarmee voor betere opmenging van waterstof in een ruimte.

4 Hoe werkt de verspreiding van waterstof door op de waterstofconcentraties?

4.1 Inleiding

In Hoofdstuk 2 is aangegeven dat bij een waterstoflekkage in een woning tot drie keer meer kubieke meters waterstof vrijkomen dan bij een aardgaslekkage bij dezelfde druk en diameter van de leiding. Theoretisch gezien zou de waterstofconcentratie in de ruimte dan ook maximaal een factor 3 groter zijn, maar dat wordt in experimenten niet waargenomen. Daar wordt een factor 1,5 - 1,6 gevonden (Mejia, 2020; KIWA Gastec, 2015; KIWA, 2019a). Als reden wordt de lage dichtheid en daarmee het grote stijgend vermogen van waterstof genoemd, waardoor verspreiding van waterstof door openingen naar buiten sneller verloopt. Waar hoofdstuk 3 in ging op de manier waarop waterstof zich verspreidt in een ruimte, beschrijft dit hoofdstuk de doorwerking van (lokale) omstandigheden op de waterstofconcentratie in een besloten ruimte.

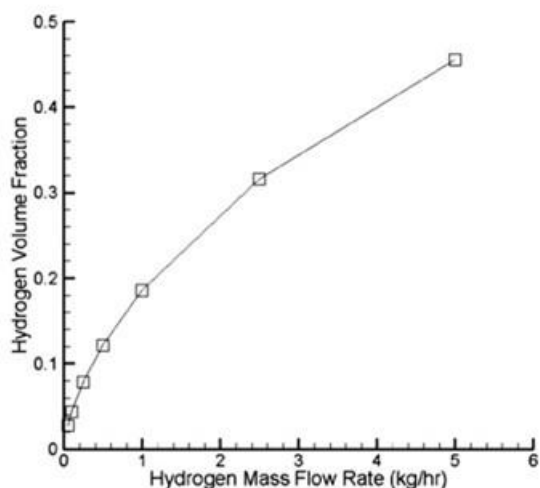
4.2 Effect van totale hoeveelheid uitgestroomde waterstof

Bij het vrijkomen van waterstof in een besloten ruimte is sprake van een uitstroombfase, een verspreidingsfase en een stationaire eindfase. In de uitstroombfase en verspreidingsfase kunnen waterstofconcentraties lokaal veel hoger zijn dan in de eindfase. In de eindfase is een evenwicht ingetreden en is de waterstofconcentratie door het diffusieproces overal in de ruimte even groot. De totale hoeveelheid uitgestroomde waterstof bepaalt de eindconcentratie van waterstof in de ruimte (Gupta et al, 2009; De Stefano, 2019). Hoe hoger de hoeveelheid waterstof die vrijkomt, hoe risicovoller de situatie is, omdat het veel langer duurt voordat de concentraties onder de LFL komen.

4.3 De invloed van het uitstroombdebiet

Het waterstofdebiet – de hoeveelheid waterstof die per seconde uitstroomt uit een opening – beïnvloedt op verschillende manieren de waterstofconcentratie. Aan de hand van twee voorbeelden wordt dit duidelijk gemaakt.

Het eerste voorbeeld betreft modelberekeningen waarbij de waterstofconcentratie in de eindfase is bepaald als functie van het uitstroombdebiet (Prasad et al, 2010). Met andere woorden: hoe groter het debiet, hoe meer waterstof in een ruimte wordt gebracht. Dat hierdoor de waterstofconcentratie in de eindfase toeneemt, is te zien in Figuur 4.1.



Figuur 4.1 De invloed van het uitstroomdebiet op de waterstofconcentratie in de stationaire fase (Bron: Prasad et al, 2010)

Het tweede voorbeeld betreft het experiment waarvan de resultaten ook al in hoofdstuk 3 beschreven staan (Figuur 3.2). In dat experiment is de totaal ingebrachte hoeveelheid waterstof constant gehouden en heeft men twee verschillende debieten gebruikt (De Stefano, 2019). De waterstofconcentratie in de eindfase is bij beide experimenten gelijk, namelijk 5,5 vol.%. Belangrijker is echter dat bij lage uitstroomdebieten gelaagdheid optreedt en dat de waterstofconcentratie in de hoogst gelegen laag hoger is dan de waterstofconcentraties in de uniform verdeeld waterstoflaag bij grote uitstroomdebieten. Het laagste debiet geeft dus de hoogste piekconcentraties. Bij lage uitstroomdebieten duurt het ook langer voordat de piekconcentraties verdwijnen en de eindfase bereikt wordt. Gevaarlijk hoge concentraties houden daardoor langer aan.

4.4 De invloed van turbulentie

Obstakels en ventilatie beïnvloeden het stromingsgedrag van waterstof (zie paragraaf 3.2.3), en werken door in de waterstofconcentraties op de manier die hieronder beschreven staat.

Obstakels

Bij turbulente stroming zorgen obstakels voor het verstoren van de wervelingen waardoor waterstof energie verliest, wordt afgeremd en zich minder goed mengt met de lucht in de ruimte. Waterstof verspreidt zich daardoor minder uniform onder het plafond; er is meer sprake van laagvorming en dat gaat gepaard met hogere waterstofconcentraties. Ook duurt het langer totdat al het waterstof homogeen verdeeld is (De Stefano, 2019).

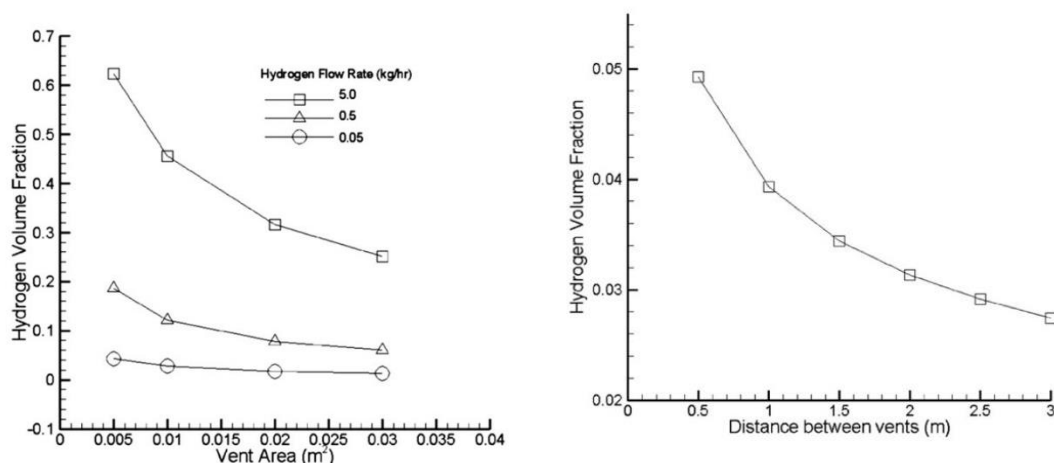
Bij laminaire uitstroming is het effect van obstakels anders. Waar eerst geen sprake was van kleine wervelingen, ontstaan die door obstakels nu wel. Dit bevordert de opmenging van waterstof dat zich daardoor meer uniform verspreidt, waardoor de concentraties onder het plafond lager worden.

Ventilatie

Ventilatie zorgt voor meer turbulentie en daarmee voor een betere menging en verspreiding van waterstof: wanneer in de uitstroomfase meerdere waterstoflagen aanwezig zijn die verschillen in concentratie, zorgt ventilatie voor het opmengen van die lagen tot één homogene

laag (Hajji et al, 2014). In de verspreidingsfase zorgt ventilatie voor het versnellen van de verspreiding en voor lagere waterstofconcentraties in de stationaire eindfase.

Voor natuurlijke ventilatie geldt dat deze het meest effectief is wanneer de ventilatieopeningen zich tegenover elkaar bevinden en groot zijn: hoe groter het oppervlak van de ventilatieopeningen, hoe lager de waterstofconcentratie. Meerdere kleine openingen geven daarbij een betere opmenging dan één opening (Matsuura, 2009). Ook geldt, dat hoe groter het hoogteverschil is tussen de ventilatieopeningen in een ruimte, hoe lager de waterstofconcentraties (Prasad et al, 2010). Dit laatste effect is in absolute zin echter minder groot dan het effect van het oppervlak van de ventilatieopeningen.



Figuur 4.2 Links: Effect op de waterstofconcentratie van de grootte van de ventilatieopeningen. Rechts: Effect op de waterstofconcentratie van het hoogteverschil tussen twee ventilatieopeningen (Bron: Prasad et al, 2010)

In het HyHouse-project heeft men waterstof laten vrijkomen in een woning en tijdens de uitstroombfase de waterstofconcentraties gemeten op verschillende locaties in de woning (Kiwa Gastec, 2015). De debieten varieerden van 0,16 liter/s tot 5,26 liter/s (2 tot 64 kW).⁹ De experimenten werden bij drie verschillende luchtdoorlatendheden uitgevoerd door natuurlijke ventilatie in fasen te minimaliseren. De maximaal gemeten waterstofconcentraties staan weergegeven in Tabel 4.1 en zijn steeds gemeten in de ruimte waar ook de uitstroming plaats vond, waaronder de meterkast.

De belangrijke resultaten van dit onderzoek staan hieronder puntsgewijs weergegeven.

- > Bij debieten kleiner dan 0,33 liter/s (4 kW) werd geen waterstof gemeten in de woning.
- > Bij debieten tussen 0,33 liter/s en 0,66 liter/s (8 kW) werd wel waterstof gemeten, maar werd de LFL niet bereikt. Dergelijke debieten zijn kenmerkend voor kleine lekken bij een aansluiting in een leiding.
- > Bij een debiet van 1,32 liter/s (16 kW) werd de LFL bereikt aan het einde van de uitstroombduur (2,5 uur) en alleen in de ruimte waar het lek zich bevond. Dit doet vermoeden dat als een waterstofuitstroom niet al te lang duurt, de LFL niet wordt bereikt.
- > De hoogste maximale concentraties werden gemeten in de meterkast en waren een direct gevolg van de beperkte inhoud van die meterkast.

⁹ Volgens NEN 8078+A1:2018 nl (Voorziening voor gas met een werkdruk tot en met 500 mbar, prestatie-eisen bestaande bouw) mag het lekverlies bij een voorziening van gas met een inhoud groter dan 50 liter meer zijn dan 1 liter per uur (0,27 ml/s). Bij een lek groter dan 5 liter per uur (1,4 ml/s) moeten maatregelen getroffen worden.

- > De uitstromingen leidden op de begane grond tot een gelaagde waterstoflaag. Dit laat zien dat de uitstromingen hoogstwaarschijnlijk laminair van aard waren.
- > De hoogste maximale waterstofconcentratie werd steeds gemeten in de ruimte waar waterstof vrijkwam en bij de hoogst geplaatste sensor. In de andere ruimtes op dezelfde verdieping werden soortgelijke concentraties gemeten.
- > Hoe luchtdichter het huis was, hoe groter de maximale waterstofconcentratie.

Tabel 4.1 De maximale gemeten waterstofconcentraties in het HyHouse-project

	Luchtdoorlatendheid woning ¹⁰ (m ³ /uur/m ²) (dm ³ /s/m ²)	Maximale waterstofconcentratie (vol.%)	
		Huis (excl. meterkast)	Meterkast
Fase 1	9,85 (2,74)	6,5 – 7,0	18,2
Fase 2	6,64 (1,84)	10,0 – 10,5	19,3
Fase 3	3,46 (0,96)	12,0 – 12,5	22,1

Samenvattend

- > De totale hoeveelheid waterstof die vrijkomt, is bepalend voor de uiteindelijke waterstofconcentratie in een ruimte.
- > Hoe hoger de hoeveelheid waterstof die vrijkomt, hoe risicovoller de situatie is, omdat het veel langer duurt voordat de concentraties onder de LFL komen.
- > Lage uitstroomdebieten zorgen voor gelaagdheid en de waterstofconcentratie in die lagen is gedurende de uitstroomfase en verspreidingsfase hoger dan tijdens de eindfase.
- > Bij lage uitstroomdebieten houden de hoge waterstofconcentraties langer aan dan bij hoge uitstroomdebieten.
- > Hoge uitstroomdebieten zorgen voor een uniforme waterstofverdeling; de waterstofconcentratie is daardoor lager dan bij lage uitstroomdebieten.
- > Opmenging van een waterstof-luchtmengsel, bijvoorbeeld door ventilatie, zorgt voor een verdeling van het mengsel en daarmee voor een verlaging van de waterstofconcentraties.

¹⁰ Het Bouwbesluit benoemt een aantal klassen van luchtdicht bouwen. Om te voldoen aan het Bouwbesluit mag de luchtdoorlatendheid (Q_{v,10}-waarde) voor klasse 1 maximaal 1,0 dm³/s/m² zijn. Deze klasse komt in nieuwbouw niet meer voor. Klasse 2 voor energiezuinig bouwen is voor nieuwbouw de standaard, waarbij de luchtdoorlatendheid tussen 0,4 en 0,6 dm³/s/m² moet liggen. De woning die in het HyHouse-project is gebruikt, is een woning met behoorlijk wat tochtgaten, aangezien pas in Fase 3, nadat alle kieren en gaten waren afgeplakt, de luchtdoorlatendheid overeenkwam met die van klasse 1 van het Bouwbesluit.

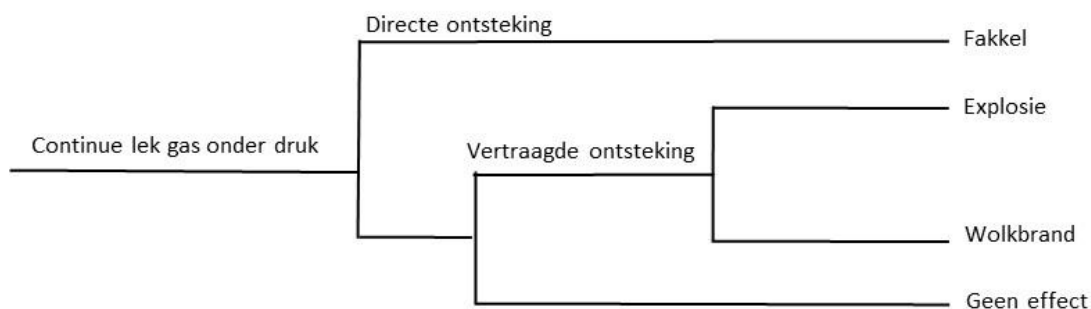
5 Wat zijn in een besloten ruimte gevaarlijke waterstofconcentraties?

5.1 Inleiding

Het werken met waterstof brengt gevaren met zich mee, want als waterstof ongewenst vrijkomt en de waterstofwolk een ontstekingsbron tegenkomt, kunnen risicovolle gebeurtenissen als een fakkelbrand of een explosie optreden. Dit hoofdstuk gaat in op deze risico's en beschrijft welke effecten op kunnen treden en welke invloed de waterstofconcentratie hierop heeft.

5.2 Gebeurtenissenboom

De effecten die plaats kunnen vinden nadat vrijgekomen waterstof al dan niet ontsteekt, worden weergegeven in een gebeurtenissenboom. Figuur 5.1 toont een eenvoudige 'gebeurtenissenboom' voor het continu vrijkomen van waterstof onder druk (RIVM, 2020). Op het moment van uitstromen, vindt er een drukval plaats en gaan de waterstofmoleculen naar omgedrukte druk.



Figuur 5.1 Gebeurtenissenboom van de continue uitstroming van waterstof (Bron: RIVM, 2020)

Als waterstofgas ontsteekt, kan dit meteen na de uitstroming plaatsvinden of enige tijd daarna. Dit leidt tot verschillende effecten, die hieronder staan beschreven.

- > Bij een directe ontsteking van waterstof dat uitstroomt uit een opening, zal een onzichtbare fakkel ontstaan die een bepaalde omvang en richting heeft. Fakkels kunnen personen verwonden en schade toebrengen aan naastgelegen objecten en gebouwen, met mogelijk secundaire effecten als gevolg.
Bij een waterstofuitstroming binnenshuis zal de fakkel niet noemenswaardig groot zijn (ordegrootte centimeters), omdat de drukken waarbij waterstof vrijkomt, daarvoor te klein zijn.

- > Bij vertraagde ontsteking zit er tijd tussen het vrijkomen en het ontsteken van waterstof. Gedurende die tijd vermengt waterstofgas zich met lucht tot een mogelijk ontvlambaar mengsel. Bevindt de wolk zich in de open lucht en vindt daar de ontsteking plaats, dan zal de waterstofwolk ontbranden (wolkbrand) en zijn er in principe geen overdrukeffecten te verwachten, maar alleen warmte-effecten. Bevindt de wolk zich in een besloten ruimte zoals een woning, dan zal de waterstofwolk bij ontsteking en bij een voldoende hoge concentratie leiden tot een explosie met overdrukeffecten. Deze effecten kunnen grote schade toebrengen, doordat puin weggevoerd wordt of doordat de constructie van het gebouw of van naastgelegen gebouwen het begeeft. Overdrukeffecten van een explosie reiken verder dan de warmte-effecten van de explosie, alhoewel brand en secundaire branden niet uit te sluiten zijn.

5.3 Brand

5.3.1 LFL

Zoals vermeld in paragraaf 1.2 staat LFL voor 'lower flammability limit', ofwel de laagste concentratie waarbij een ontvlambaar gas ontsteekt en waarbij de vlam die ontstaat zichzelf in stand houdt. In Nederland wordt in plaats van LFL ook de term LEL – 'lowest explosion limit' – gehanteerd, maar deze term is misleidend, omdat het suggereert dat het ontsteken van een ontvlambaar gas bij deze concentratie leidt tot het exploderen van dat gas. Dat is echter niet het geval: waterstofgas kan bij deze concentratie alleen ontbranden. De ontvlambaarheidsgrenzen van gassen (LFL en UFL) wordt onder specifieke omstandigheden bepaald, bijvoorbeeld via ASTM E681-09(2015): *Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals (Vapors and Gases)*.

Bij een waterstofconcentratie van 4 vol.% is de voortplantingssnelheid van de vlam lager dan de snelheid waarmee het waterstof-luchtmengsel stijgt. Onder deze omstandigheden kan de vlam zich alleen naar boven bewegen en niet naar beneden of naar opzij. Vanaf 6 vol. % waterstof kunnen de vlammen zich wel zijwaarts verplaatsen en vanaf 9 vol.% ook naar beneden (Kiwa Gastec, 2015).

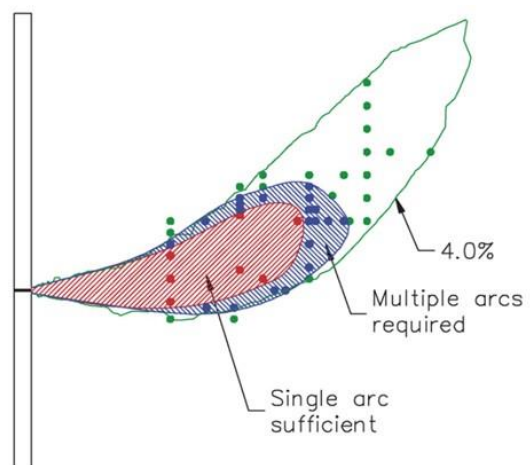
Tabel 5.1 Ontvlambaarheidsgrenzen waterstof (Bron: Kiwa Gastec, 2015)

Vlamrichting	LFL (vol.%)	UFL (vol.%)
Opwaarts	4	
Opwaarts en opzij	6	75
Alle richtingen	9	

Bij de LFL van 4 vol.% wordt slechts een fractie van de waterstof verbrand en omdat de vlammen zich niet zijwaarts of naar beneden verspreiden, kan de brand zich niet ontwikkelen, wordt er nauwelijks warmte geproduceerd en vindt er daardoor geen drukopbouw plaats (Molkov, 2012). Naarmate het percentage waterstof in een waterstof-luchtmengsel toeneemt, stijgt ook de hoeveelheid waterstof die verbrandt. Bij een waterstofmengsel van 5,6 vol.% zal de helft van het aanwezige waterstof verbranden; volledige verbranding zal pas plaatsvinden vanaf een waterstofconcentratie vanaf 10 vol.% (Coward et al, 1952).

Zoals gezegd, zal een waterstofvlam pas in neerwaartse richting kunnen branden, wanneer de waterstofconcentratie 9 vol.% is. Dat wil echter niet zeggen dat waterstof-luchtmengsels met lagere concentraties niet gevaarlijk zijn. Dit gevaar hangt grotendeels af van de plaats in de ruimte waar de ontsteking plaatsvindt. Wanneer een 6 vol.% waterstof-luchtmengsel ontstoken wordt bij het plafond, zullen de vlammen zich alleen opwaarts en horizontaal voortplanten, totdat zij de muren en het plafond bereiken en daar uitdoven. Wanneer hetzelfde mengsel echter ontstoken wordt in de buurt van de vloer, zullen de vlammen zich door de hele ruimte voortplanten, de ruimte flink opwarmen en een aanzienlijke overdruk opbouwen. Stijgt de waterstofconcentratie boven 9 vol. %, dan verspreiden de vlammen zich niet alleen in alle richtingen, maar neemt ook de voortplantingssnelheid snel toe.

Wanneer waterstofgas met grote snelheid uit een opening stroomt, beïnvloedt die snelheid óók de concentratie waarbij een waterstof-luchtmengsel ontsteekt. Bij experimenten heeft men geprobeerd een waterstofpluim te ontsteken die met een snelheid van tientallen meters per seconde horizontaal uitstroomde, door op meerdere plekken in de wolk vonken te genereren. Bij concentraties groter dan 4 vol.% kon de pluim vaak niet worden ontstoken of – wanneer er wel sprake was van ontsteking – leidde dit niet tot het ontstaan van een fakkel. Doordat de vlamsnelheid onvoldoende hoog was, konden de vlammen zich niet neerwaarts verspreiden richting de uitstroomopening. De vlammen brandden zo langzaam, dat ze weggedreven van het lek vandaan en uitdoofden vanwege gebrek aan waterstof (Swain et al, 2007).



Figuur 5.2 Waterstofpluim met de locaties voor ontsteking (groene punten) (Bron: Swain, 2007)

Figuur 5.2 laat een rode kern zien waarbij elke ontstekingspoging leidde tot volledige ontbranding van de wolk. De waterstofconcentratie op de grens van de kern is ongeveer 10 vol.%. In de blauwe zone leidde niet iedere poging tot ontbranding. Ontsteking kon optreden, maar dit kostte soms honderden pogingen. Buiten de blauwe zone kon de wolk niet worden ontstoken, ook al was de waterstofconcentratie hoger dan 4 vol.%

5.4 Explosie

Wanneer een waterstof-luchtmengsel ontsteekt, ontstaat een vlamfront waar de verbranding van waterstof plaatsvindt. Het vlamfront is dus eigenlijk ook de reactiezone. Het vlamfront verplaatst zich snel en dit veroorzaakt drukopbouw voor het vlamfront uit. Hoe hoger de snelheid van het vlamfront, hoe groter de drukopbouw. Obstakels en objecten veroorzaken turbulentie en verhogen de snelheid van het vlamfront en daarmee de overdruk (Lowesmith, 2011). Deze voortgang van het vlamfront heet deflagratie. Deflagratie kan overgaan in detonatie¹¹ als waterstof dermate snel verbrandt, dat de snelheid van het vlamfront groter is dan de snelheid van geluid in het waterstof-luchtmengsel (BRHS, 2009).

¹¹ Deze overgang heet DDT, deflagration to detonation transition.

5.4.1 Detonatie

Een detonatie van een waterstof-luchtmengsel is een worst-case scenario, omdat de overdruk die bij een detonatie ontstaat tot een factor 20 groter kan zijn dan bij een deflagratie, zodat er veel meer schade wordt aangericht (Alcock et al, 2001). Detonatie kan plaatsvinden tussen 11-70 vol.%, maar deze grenzen worden sterk bepaald door de grootte van de ruimte waarin het waterstof-luchtmengsel zich bevindt. Hoe groter de ruimte, hoe lager de ondergrens en hoe hoger de bovengrens van het detonatiegebied (Molkov, 2013). In de praktijk verwacht men detonatie bij concentraties tussen 18 - 59 vol.% (Molkov, 2012) (HySafe, 2009).

5.5 Overdruk

Overdruk zonder explosie

Wanneer waterstof vrijkomt in een besloten ruimte en er geen openingen aanwezig zijn en er ook geen sprake is van ventilatie, zal de druk in de ruimte toenemen. Met een eenvoudige berekening kan dit inzichtelijk worden gemaakt¹²:

In een ruimte bevindt zich 40 m³ lucht. De druk in de ruimte is gelijk aan de omgevingsdruk: 1 bar. Komt in deze ruimte 1 m³ gas vrij dat niet weg kan, dan bevindt zich in de ruimte 41 m³ lucht + gas. De druk in de ruimte wordt dan $(41/40) \times 1 \text{ bar} = 1,025 \text{ bar}$. Dit is een overdruk van 25 mbar ten opzichte van de omgevingsdruk.

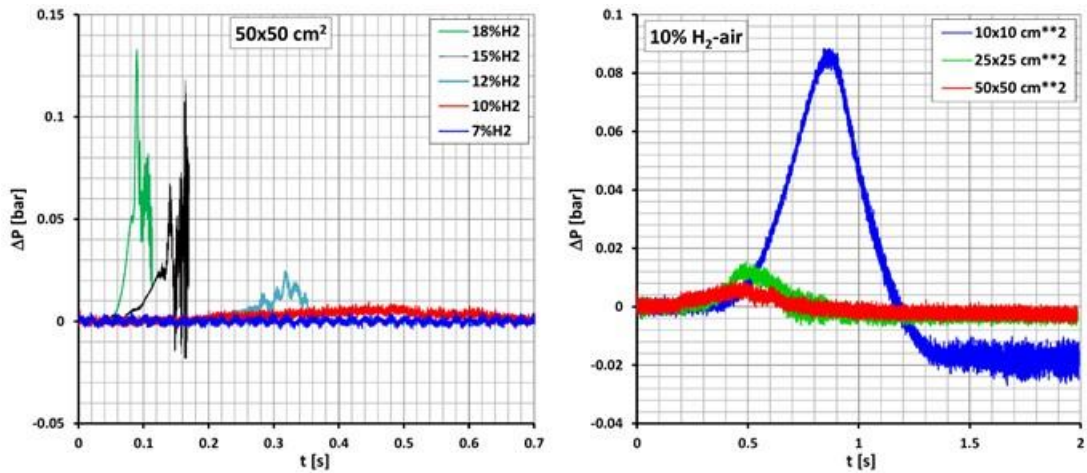
Overdruk bij explosie

De hoogte van de overdruk in een ruimte ten gevolge van een explosie van waterstofgas, is van veel factoren afhankelijk. De belangrijkste zijn de waterstofconcentratie, de grootte en geometrie van de ruimte, de aanwezigheid en grootte van openingen, de aanwezigheid van obstakels, de sterkte van de ontstekingsbron en de ontstekingslocatie (Bauwens et al, 2012) (Kundu, 2016).

In het Europese HyIndoor-project is onderzoek gedaan naar de mate van overdruk in een besloten ruimte van 1 m³ waar waterstof-luchtmengsels onder verschillende omstandigheden ontstoken werden. De besloten ruimte was voorzien van een opening om de overdruk te beperken ('vented explosion', Kuznetsov et al, 2015). De overdrukken die bij deze experimenten gemeten werden, waren klein, omdat de inhoud van de besloten ruimte klein was. Bij grotere ruimtes zijn overdrukken groter, omdat het vlamfront dan meer ruimte heeft om zich te ontwikkelen, waardoor er meer druk opgebouwd kan worden.

De experimenten toonden aan dat bij waterstofconcentraties kleiner dan 12 vol.% er niet of nauwelijks sprake was van overdruk, maar dat hierboven hogere waterstofconcentraties tot hogere overdrukken leidden (Figuur 5.3 (links)) (zie ook HyResponse, 2016c). Bij 10 vol.% was de overdruk bijvoorbeeld minder dan 10 mbar, maar deze werd vele malen groter op het moment dat de grootte van de opening te klein was om drukontlasting te geven (Figuur 5.3 (rechts)).

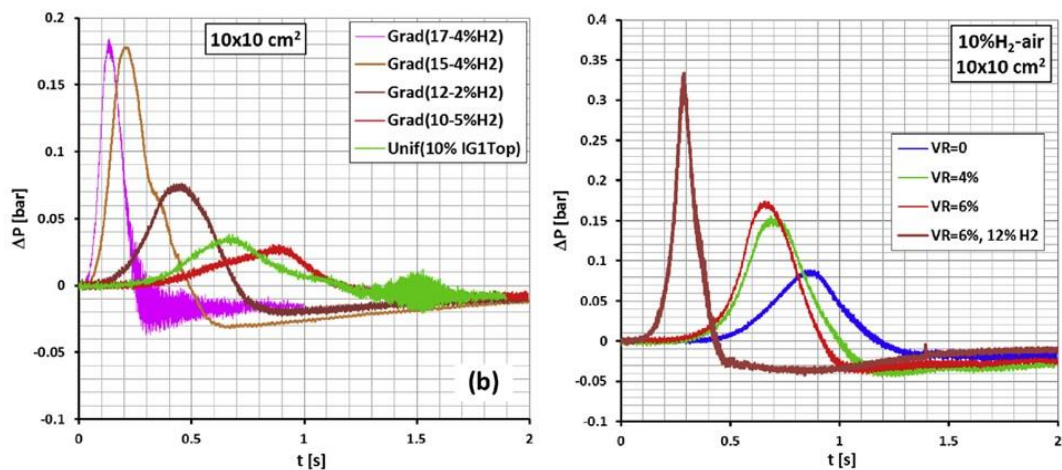
¹² Op basis van de wet van Boyle: $p \text{ (druk)} \times V \text{ (volume)} = \text{constant}$.



Figuur 5.3 Links: overdruk als functie van waterstofconcentratie bij een opening van 50x50 cm. Rechts: overdruk als functie van oppervlak opening bij een waterstofconcentratie van 10 vol.%. (Bron: Kuznetsov et al, 2015)

In de experimenten is ook gekeken naar de invloed van gelaagdheid op de mate van overdruk. Een waterstoflaag die uniform verdeeld is, leidt tot veel lagere overdrukken dan meerdere waterstoflagen die in concentratie verschillen (Figuur 5.4 links). Een langdurige uitstroom van waterstof uit een klein lek is dus gevaarlijk, omdat hierdoor meerdere waterstoflagen van hogere concentratie opgebouwd kunnen worden, die bij ontsteking tot grotere overdrukken leiden.

Een andere parameter die onderzocht is, is de aanwezigheid van obstakels. Daartoe werd een deel van de ruimte gevuld met een houten raster dat qua volume varieerde. De aanwezigheid van dit obstakel zorgde voor meer turbulentie, waardoor de verbranding versneld werd en de overdruk aanzienlijk toenam (Figuur 5.4 rechts). Hoe meer ruimte het obstakel in beslag nam, hoe groter de overdruk werd.



Figuur 5.4 Links: Overdruk bij uniforme ('Unif') of gelaagde verdeling ('Grad') van waterstof. Rechts: Overdruk als functie van het volumepercentage van de obstakels waarmee de ruimte is gevuld (Bron: Kuznetsov et al, 2015)

5.6 Zuurstofverdringing

De zuurstofconcentratie in lucht is gemiddeld genomen 21 vol.%. Wanneer waterstof vrijkomt en niet ontstoken is, verdringt het de lucht met de daarin aanwezige zuurstof, waardoor het zuurstofpercentage daalt. Als mensen zich bevinden in een ruimte met zuurstofconcentraties lager dan 18 vol.%, kunnen zij zich minder goed concentreren en bij concentraties lager dan 10 vol.% worden zij apathisch en raken bewusteloos (Linde, 2015). Om een zuurstofconcentratie van 18 vol.% te krijgen, is een waterstofconcentratie van 14,3 vol.% nodig. Voor 10 vol. % zuurstof is dat 52,4 vol.% waterstof (Buttner, 2014).

Samenvattend

- > De waterstofconcentratie bepaalt de richting en daarmee de verspreiding van waterstofvlammen. Waterstofvlammen gaan omhoog bij 4-6 vol.%, omhoog en zijwaarts bij 6-9 vol.% en alle richtingen op vanaf 9 vol.%.
- > De ruimte die het vlamfront heeft om zich te ontwikkelen, wordt enerzijds bepaald door de waterstofconcentratie (zie het punt hierboven) en anderzijds door de locatie van de ontstekingsbron in de besloten ruimte.
- > De snelheid die waterstofmoleculen hebben in de pluim is belangrijk. Als die snelheid groter is dan de snelheid waarmee waterstof verbrandt, gaat de vlam niet terug richting het uitstroompunt. Zie ook het volgende punt.
- > Bij de ontbranding van een waterstof-luchtmengsel bij de LFL, wordt slechts een fractie van het aanwezige waterstof verbrand. Omdat de vlammen zich maar beperkt kunnen verspreiden (alleen naar boven), wordt er geen warmte ontwikkeld en vindt er geen drukopbouw plaats.
- > In het HyHouse-project werd bij kleine leidinglekages de LFL in het huis niet bereikt.
- > In het HyHouse-project was de waterstofconcentratie in de meterkast altijd hoger dan in de rest van het huis in het geval het lek zich in de meterkast bevond.
- > De hoogte van de overdruk in een ruimte ten gevolge van een explosie van waterstof in die ruimte, is afhankelijk van onder andere de waterstofconcentratie, de grootte en geometrie van de ruimte, de aanwezigheid en grootte van openingen en van de aanwezigheid van obstakels.
- > Over het algemeen geldt dat hoe meer ruimte het vlamfront heeft, hoe hoger de overdruk kan worden wanneer het waterstof-luchtmengsel ontsteekt.
- > Waterstofconcentraties tot 10 vol.% geven nauwelijks overdruk, tenzij aanwezige openingen te klein zijn om drukontlasting te geven.
- > Obstakels zorgen voor meer turbulentie en een betere verbranding van waterstof, waardoor de overdruk hoger wordt.
- > Een uniforme waterstoflaag geeft lagere overdrukken dan wanneer sprake is van meerdere waterstoflagen van hogere concentratie.

6 Wat zijn de ontstekingskansen bij de gevaarlijke waterstofconcentraties?

6.1 Inleiding

Om risico's van waterstofbevattende systemen te kunnen berekenen, moet de kans op ontsteking bekend zijn. De kans op ontsteking is de som van de kans op directe ontsteking en de kans op vertraagde ontsteking:

$$P_{\text{totaal}} = P_{\text{direct}} + P_{\text{vertraagd}}$$

Het is erg lastig om de ontstekingskansen voor waterstof te bepalen, zowel van de totale kans op ontsteking als van de deeltkansen. Het ontbreekt vaak aan voldoende data en daarnaast zijn data vaak niet compleet (Moosemiller, 2011). Zo gaf het Health and Safety Laboratory in 2015 aan dat het op basis van de beschikbare literatuur over zeer ontvlambare stoffen geen directe ontstekingskansen voor waterstof konden vinden (McGillivray, 2015).

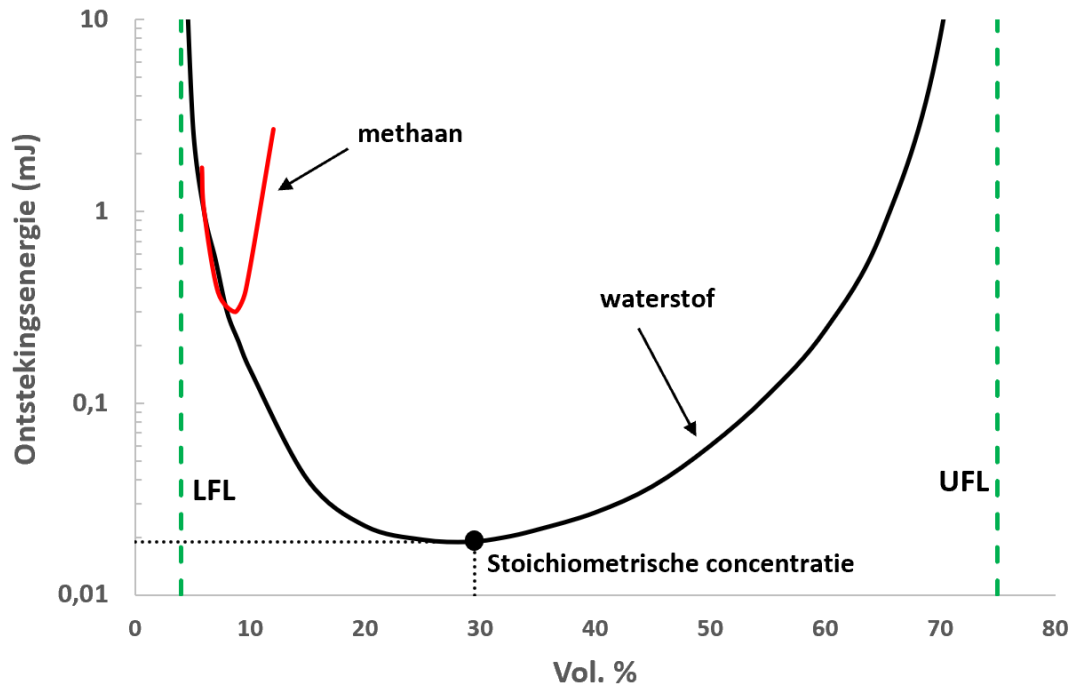
Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van de informatie die in de literatuur gevonden is over de ontsteking van waterstof, ontstekingskansen, ontstekingsbronnen en over diverse parameters die hierop van invloed zijn.

6.2 Minimum ontstekingsenergie

Bij gebrek aan data over ontstekingskansen, wordt in de literatuur gekeken naar de minimum ontstekingsenergie en naar de parameters die de minimum ontstekingsenergie beïnvloeden. Daarbij wordt de minimum ontstekingsenergie van waterstof vaak vergeleken met die van andere gassen om (kwalitatief) een uitspraak te kunnen doen over ontstekingskansen.

De ontstekingsenergie van een waterstofmengsel is het laagst bij de stoichiometrische concentratie (~ 30 vol. %), namelijk 0,019 mJ (Ono et al, 2007). De minimale ontstekingsenergie wordt groter naarmate de waterstofconcentratie dichter bij de LFL of de UFL komt te liggen, zie Figuur 6.1. Bij 4 vol. % waterstof (LFL) is de minimale ontstekingsenergie een factor 500 hoger (10 mJ) dan bij de stoichiometrische concentratie. Bij 75 vol.% waterstof (UFL) is de minimale ontstekingsenergie nog veel groter (Swain, 2005). Veel ontstekingsbronnen genereren of hebben voldoende energie om waterstof te doen ontsteken, zie Tabel 6.1.

Ter vergelijking is in Figuur 6.1 ook de curve opgenomen van methaan, het hoofdbestanddeel van aardgas. Te zien is dat bij lage concentraties (< 8 vol.%) de ontstekingsenergieën van waterstof en methaan vergelijkbaar zijn.



Figuur 6.1 De ontstekingsenergie van waterstof als functie van de concentratie

6.3 Ontsteking

Ontvlambare gassen als waterstof en methaan kunnen op diverse manieren ontsteken. De meest voorkomende oorzaak is elektrostatische ontlading. Andere mechanismes zijn ook mogelijk, maar komen bijvoorbeeld alleen voor bij hoge drukken of bij bijzondere omstandigheden. Genoemd worden onder andere het Joule-Thompson effect, diffusie-ontladingen, hete oppervlakken en schokgolven (Gummer et al, 2008). In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op enkele oorzaken van ontsteking.

Bij ontsteking van een ontvlambaar gas is overigens achteraf vaak niet bekend wat de ontstekingsbron was en hoe de ontsteking precies plaatsvond, zie ook paragraaf 6.5. Men spreekt dan ook wel van 'spontane ontsteking'. Er hoeft geen sprake te zijn van één ontstekingsmechanisme; een combinatie van ontstekingsmechanismen wordt ook als een mogelijkheid gezien.

6.3.1 Elektrostatische ontlading

Vonkontladingen

Een ontlading door een vonk ontstaat doordat er bij voldoende potentiaalverschil tussen twee geleidende voorwerpen een doorslag plaatsvindt door het niet-geleidende medium tussen de voorwerpen (Astbury, 2007). De energie van een vonk is: $E = \frac{1}{2} \times C \times V^2$. Hierbij is C de capaciteit van het object dat ontsteking kan veroorzaken en V het voltage dat door opladen ontstaat. Een spanning van 10 kV is door laden makkelijk te halen wat maakt dat vonkontladingen één van de meest voorkomende oorzaken zijn voor het ontsteken van ontvlambare gassen. In Tabel 6.1 staan enkele voorbeelden gegeven.

Tabel 6.1 Voorbeelden van vonkenergieën (bron: Sherwood, 2015)

Object	Capaciteit (pF)	Energie van een vonk (mJ) bij verschillende voltages		
		10 kV	20 kV	30 kV
Schroefje	1	0,05	0,2	0,45
Flens (∅ 10 cm)	10	0,5	2	4,5
Persoon	100-300	5-15	20-60	45-135

De energie die gepaard gaat met een vonk is in principe groot genoeg om een mengsel van waterstof en lucht te doen ontsteken. Bij de LFL ligt de benodigde ontstekingsenergie in de orde van 10 mJ (zie paragraaf 6.2). Het is dan de vraag of de beschikbare energie groot genoeg is om het waterstofmengsel te doen ontsteken. Experimenten door Swain laten bijvoorbeeld zien dat waterstofmengsels met concentraties tussen 4-10 vol.% niet altijd ontstoken kunnen worden door huis-tuin-en-keukenapparatuur of door schakelaars, zie Tabel 6.2 (Swain et al, 2005).

Tabel 6.2 Resultaten van de ontstekingsproeven van Swain (Bron: Swain et al, 2005)

Ontstekingsbron	Beschrijving ontstekingskans
Lichtschakelaar	<u>Geen</u> ontsteking bij concentraties tussen 4-10 vol.%
Nat-droogzuiger	Ontsteking vanaf concentraties groter dan 6 vol.%
Trekkoord plafondlamp	Ontsteking vanaf concentraties groter dan 8 vol.%
Motor van opener garagedeur	<u>Geen</u> ontsteking bij concentraties tussen 4-10 vol.%

De kans op ontsteking van waterstof door mechanische vonken (bijvoorbeeld vallend gereedschap of roterende schijven) is klein en sterk afhankelijk van de valhoogte. De kans op ontsteking van waterstof door mechanische vonken ligt in de orde van $1-3 \times 10^{-5}$ en is vergelijkbaar met die voor methaan: $< 0,7 \times 10^{-5}$ is (Shebeko et al, 2016).

Borstelontladingen

In vergelijking met vonkontladingen veroorzaken borstelontladingen veel minder vaak een explosie (Wingerden, 2020). Borstelontladingen komen voor tussen een geladen isolator (meestal een kunststof) en een geleidend voorwerp dat aan het oppervlak gebogen is. De ontlading heeft de vorm van een borstel met een energie die kleiner is dan 4 mJ en verdeeld is over meerdere ontladingskanaaltjes (Astbury, 2007).

Corona-ontladingen

Corona houdt in dat lucht rondom een geleider ioniseert, meestal bij de scherpe punten van een constructie die onder spanning staat. De energie van een corona-ontlading is beperkt ($< 0,1$ mJ). Corona-ontladingen zijn zelden de oorzaak van een explosie (Wingerden, 2020).

6.3.2 Het omgekeerde Joule-Thompson effect

Gassen koelen af wanneer de druk op het gas afneemt. Waterstof is samen met helium en neon een uitzondering hierop: bij expansie tot atmosferische druk zal waterstof opwarmen. Dit effect is echter niet bijzonder groot: de Joule-Thompson coëfficiënt voor waterstof bij kamertemperatuur is kleiner dan 0,05 K/bar. Bij een druk van 500 bar en een temperatuur van 9 °C zal waterstof maximaal 18 ° in temperatuur stijgen. Dit is onvoldoende om de zelfontstekingstemperatuur van waterstof (560 - 585 °) te bereiken (Gummer, 2008).

6.3.3 Ontsteking door een heet oppervlak

Wanneer een oppervlak heet genoeg is, vindt oxidatie van waterstof plaats. Hierbij komt meer warmte vrij dan dat er verloren gaat aan de omgeving, zodat de reactie in stand blijft. Ieder waterstof-luchtmengsel binnen de LFL en de UFL kan ontstoken worden door een heet oppervlak, maar of dit werkelijk gebeurt is afhankelijk van de grootte en geometrie van het hete oppervlak en van de besloten ruimte. Hoe groter het hete oppervlak en hoe groter de inhoud van de waterstofwolk, hoe groter de kans op ontsteking (Gummer, 2008).

6.4 Ontstekingskans

In de literatuur zijn formules te vinden waarmee een globale kans op directe ontsteking (P_{direct}) en op vertraagde ontsteking ($P_{vertraagd}$) kunnen worden uitgerekend (Moosemiller, 2011). De uitkomsten zijn een benadering en moeten slechts als indicatie worden beschouwd.

6.4.1 De kans op directe ontsteking

De kans op directe ontsteking is de som van de kans op zelfontsteking en de kans op statische ontlading.

- > Aangenomen wordt dat de kans op zelfontsteking 0 is wanneer de temperatuur veel lager is dan de zelfontbrandingstemperatuur van waterstof (585 °C). Dit zal in de praktijk meestal het geval zijn.
- > De kans op statische ontlading wordt gerelateerd aan de energie die vrijkomt en die is gerelateerd aan parameters als procesdruk en afgiftesnelheid. Hoe meer energie er vrijkomt, hoe groter de kans op directe ontsteking. De kans op statische ontlading wordt gegeven door formule 1:

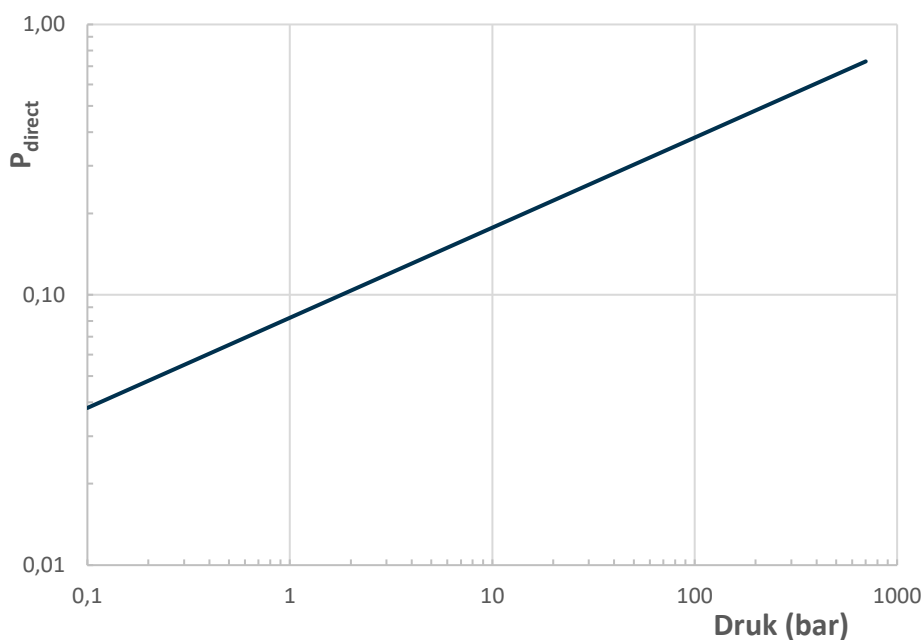
$$P_{statische\ ontlading} = 0,0024 \times \frac{(P)^{1/3}}{(MOE)^{2/3}} \quad [1]$$

Met:

P = druk in psi (1 psi = 0.069 bar)

MOE = minimum ontstekingsenergie in mJ

In Figuur 6.2 staat de formule grafisch weergegeven, waarbij de procesdruk is omgezet van psi naar bar en een minimum ontstekingsenergie gehanteerd is van 0,019 mJ.



Figuur 6.2 De kans op directe ontsteking als functie van de procesdruk

Bij een procesdruk van 100 mbar (1,45 psi) is P_{direct} gelijk aan 0,04. In een woning zal de procesdruk lager zijn en daarmee ook de kans op directe ontsteking. Als waterstof in een woning ontsteekt, zal dat eerder gebeuren door een vertraagde ontsteking dan door een directe ontsteking.

6.4.2 De kans op vertraagde ontsteking

Bij een vertraagde ontsteking zit er enige tijd tussen het vrijkomen van een ontvlambaar gas en het ontsteken daarvan. Ontsteking vindt dan plaats door een externe ontstekingsbron. De kans op vertraagde ontsteking wordt bepaald door (externe) factoren zoals de minimum ontstekingsenergie, de grootte en de duur van de uitstroming en de locatie van de uitstroming (binnen of buiten). Omdat de directe omgeving van de uitstroming de kans op vertraagde ontsteking beïnvloedt, zijn in de literatuur geen waarden te vinden voor de kans op vertraagde ontsteking. Wel zijn formules ontwikkeld waarmee bij benadering de kans op vertraagde ontsteking bepaald kan worden (Moosemiller, 2011). De formules en een uitgewerkt voorbeeld staan beschreven in Bijlage 1.

6.5 Ontstekingskansen bij grote incidenten

In de MHIDAS-database (Major Hazard Incident Database Service) staan incidenten beschreven die zich hebben voorgedaan in de procesindustrie. In de procesindustrie is de druk waarmee met waterstof wordt gewerkt niet te vergelijken met die voor waterstof in woningen. Daarom zal de kans op directe ontsteking in de procesindustrie op basis van Figuur 6.2 groter zijn dan voor waterstof in woningen.¹³ Desalniettemin geven de incidenten wel een gevoel over ontstekingsoorzaken en -kansen. Astbury heeft met behulp van de MHIDAS-database onderzoek gedaan naar het vrijkomen van waterstofgas en de ontstekingsoorzaken

¹³ Voor risicoberekeningen aan procesinstallaties en buisleidingen met waterstof wordt in Nederland conservatief uitgegaan van een ontstekingskans van 1, met een kans op directe ontsteking van 1. Dit wil zeggen dat wanneer waterstof vrijkomt, het altijd direct zal ontsteken (RIVM, 2020a en 2020b).

vergeleken met die van het vrijkomen van andere ontvlambare gassen, zie Tabel 6.3 (Astbury, 2007). Aangegeven wordt dat:

- > alle incidenten op één na betrekking hebben op waterstof onder hoge druk
- > de ontstekingsbron niet bekend is van de meerderheid van alle onderzochte incidenten
- > bij vier van de 81 incidenten sprake is van vertraagde ontsteking, maar dat de ontstekingsbron onbekend is
- > het gegeven dat er 0 waterstofincidenten zonder ontsteking in de database staan, niet wil zeggen dat die incidenten er niet zijn geweest. Omdat er geen effecten zijn waargenomen, kunnen dergelijke incidenten immers niet zijn opgenomen in de database.

Tabel 6.3 Verdeling van ontstekingsbronnen van waterstof en andere ontvlambare gassen op basis van de MHIDAS-database

Ontstekingsbron	Waterstof		Andere ontvlambare gassen	
	Aantal	%	Aantal	%
Brandstichting	0		37	2,6
Botsing	2	2,5	121	8,4
Vlam	3	3,7	113	7,9
Heet oppervlak	2	2,5	56	3,9
Electrische apparatuur	2	2,5	114	7,9
Vonk door wrijving	2	2,5	33	2,3
Niet geïdentificeerd	70	86,3	942	65,5
Geen ontsteking	0	0	21	1,5
Totaal	81	100	1437	100

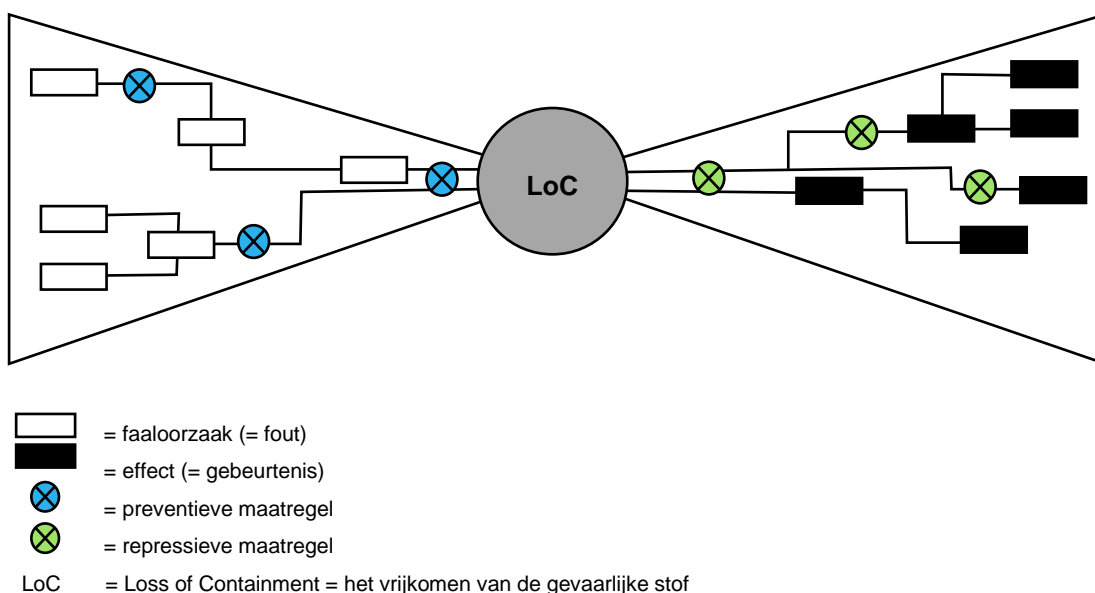
Samenvattend

- > De ontstekingskans van waterstof is onbekend, maar gezien de lage ontstekingsenergie van waterstof is de ontstekingskans voor waterstof hoger dan voor veel andere ontvlambare gassen. Veel hangt af van de omstandigheden ter plaatse.
- > Hoe lager de ontstekingsenergie, hoe groter de kans op ontsteking. De ontstekingsenergie van waterstof is het laagst bij 30 vol.% (stoichiometrische concentratie) en het hoogst bij de LFL en de UFL (500 keer hoger dan bij 30 vol.%).
- > Bij lage concentraties is de ontstekingsenergie van waterstof vergelijkbaar met die van methaan.
- > Als waterstof in een woning ontsteekt, zal dat eerder komen door een vertraagde ontsteking dan door een directe ontsteking.
- > Waterstofmengsels met concentraties tussen 4-10 vol.% worden niet ontstoken door een lichtschakelaar.
- > Vonkontladingen zijn de belangrijkste ontstekingsbron.

7 Welke maatregelen kunnen worden getroffen?

7.1 Inleiding

Het vrijkomen van waterstof is een ongewenste gebeurtenis. Met behulp van het vlinderdas-model kunnen zowel de oorzaken van het vrijkomen van waterstof (foutenboom) als de effecten van het vrijkomen ervan (gebeurtenissenboom) systematisch in beeld worden gebracht. Daarmee is een structuur beschikbaar om kansreducerende en effectreducerende maatregelen mee in kaart te brengen. Deze maatregelen worden ook wel LoD (Line of Defence) genoemd.



Figuur 7.1 Vlinderdasmodel voor het vrijkomen van een gevaarlijke stof. Links de foutenboom en rechts de gebeurtenissenboom

Er zijn drie soorten preventieve en drie soorten repressieve 'lines of defence' te onderscheiden (RIVM, 2019).¹⁴ Iedere line of defence kan uit één of meerdere maatregelen bestaan:

1. Preventief:
 - > Procesbeheersing
 - > Herstel van afwijkingen
 - > Noodbescherming
2. Repressief:
 - > Beperking van de uitstroming

¹⁴ Het model is weliswaar opgesteld voor de chemische industrie, maar de principes zijn ook van toepassing op het gebruik van een gevaarlijke stof zoals waterstof in woningen.

- > Voorkoming van escalatie
- > Persoonlijke bescherming en hulpverlening.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op maatregelen die getroffen kunnen worden wanneer waterstof binnenshuis wordt toegepast.

7.2 Procesbeheersing

De eerste line of defence betreft procesbeheersing. Dit houdt onder andere in dat de integriteit van de waterstofinstallatie geborgd moet zijn, dat procesparameters beheerst worden, evenals omgevingsfactoren die de installatie kunnen beschadigen (RIVM, 2019).

Om risico's te beheersen en de negatieve effecten voor mens en milieu te beperken, worden normen, voorschriften, protocollen en dergelijke geschreven voor de aanleg, het beheer en onderhoud van installaties. Op het gebied van het gebruik van waterstof binnenshuis kent Nederland nog geen normen¹⁵, maar zijn de volgende documenten mogelijk bruikbaar:

- > Engeland heeft sinds begin 2020 een norm voor de ontwikkeling en constructie van waterstof- en gastoestellen die ofwel speciaal zijn gebouwd om waterstof te gebruiken ofwel zijn ontworpen om te worden omgezet om waterstof te gebruiken: PAS 4444-2020 - *Hydrogen-fired gas appliances – Guide* (BSI, 2020).¹⁶ De norm is een aanvulling op bestaande normen.
- > De National Fire Protection Association (NFPA) kent voorschriften voor het gebruik van gassen in de industrie en in ziekenhuizen: NFPA 55 - *Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code* (NFPA, 2020). Hoofdstuk 10 gaat in op waterstof, en omdat de voorschriften gelden voor drukken vanaf 35 mbar (15 psi), kunnen ze ook gebruikt worden voor waterstof in woningen.
- > Voor aardgas geldt in Nederland NEN 8078:2018 (*Voorziening voor gasinstallaties in bestaande bouw voor werkdrukken tot 500 mbar*) en NPR 3378 (*Praktijkrichtlijn gasinstallaties*) waarin voorbeelden en toelichtingen worden gegeven.

Wel zijn in Nederland keuringseisen beschikbaar die certificeringsinstantie Kiwa heeft opgesteld. Deze eisen zijn van toepassing op distributiesystemen voor gas tot een druk van 16 bar met een bijmenging tot en met 100% waterstofgas, dus tot aan de meter (KIWA, 2019b). De keuringseis gaat o.a. in op de lektheid van afsluiters en regelaars.

- > Het niet toepassen van waterstof is een mogelijkheid om een proces met waterstof te 'beheersen'. Dit is net als het reduceren en vermijden van risico's een vorm van inherent veilig ontwerpen. De gedachte achter inherent veilig ontwerpen is dat als een gevaarlijke stof niet aanwezig is, deze ook niet vrij kan komen (Vaughen et al., 2012).
- > Het vermijden van risico's is een andere mogelijkheid en wordt beschreven in het document *Vijf veiligheidsprincipes voor waterstof als energiebron voor woningen* (IFV, 2020).
- > Ten slotte kan het reduceren van risico's ook bereikt worden door de benodigde druk en diameter van het waterstofbevattende systeem zo klein mogelijk te houden (Fuster et al, 2016).

¹⁵ Uit de webinar van het Normalisatieplatform Waterstof voor de industriële en gebouwde omgeving (NP H2IGO) wordt duidelijk dat er wel gewerkt wordt aan normering, maar dat er voorlopig nog geen vastgesteld normen zijn (NEN, 2020).

¹⁶ In het programma Hy4Heat worden standaarden ontwikkeld en voorwaarden voor certificering uitgewerkt. Zie <https://www.hy4heat.info/>.

7.3 Herstel van afwijkingen

De tweede line of defence betreft maatregelen om afwijkingen buiten operationele grenzen tijdig te ontdekken en te corrigeren. Voor het gebruik van waterstof in woningen kan het volgende gelden:

- > Storingen op het gebied van druk, temperatuur en debiet zijn relevant in waterstofbevattende systemen en worden middels druk-, temperatuur- en debietmeters gemonitord.
- > Wanneer een storing in een waterstofbevattend systeem optreedt, wordt onderzocht wat er aan de hand is en wordt eventueel (semi-)automatisch of handmatig actie ondernomen om de storing te verhelpen en escalatie te voorkomen.

7.4 Noodbescherming

De derde line of defence zijn maatregelen die een grote uitstroming voorkomen als er afwijkingen optreden en het herstel daarvan uitblijft. Voorbeelden uit de procesindustrie zijn secundaire containments, noodafblaassystemen, emergency shutdown systemen en breekplaten (RIVM, 2019). Voor het gebruik van waterstof in woningen kan gelden dat:

- > de toevoerleiding buiten de woning is voorzien van een overdrukbeveiliging waarbij een overdrukventiel automatisch opent als een vooraf ingestelde drukwaarde wordt overschreden
- > de toevoerleiding is voorzien van doorstroombegrenzers (Fuster et al, 2016).

7.5 Beperking van uitstroming

De vierde line of defence is het beperken van de impact van het incident. Maatregelen hebben betrekking op het sluiten van het insluitsysteem en het beperken van de toevoer van de gevaarlijke stof (RIVM, 2019). Voor het gebruik van waterstof in woningen kan gelden dat:

- > het waterstofsysteem in een woning is voorzien van een automatische doorstroombegrenzer om de toevoer van waterstof af te sluiten bij lekkage van de leiding (KIWA Gas-tec, 2015).
- > op een veilige plek een handmatige afsluiter aanwezig is.

7.6 Voorkomen van escalatie

De vijfde line of defence betreft maatregelen die moeten voorkomen dat het incident groter wordt (escaleert). Een voorbeeld uit de procesindustrie is de noodopvang van vloeistoffen. Voor waterstofsysteem zijn belangrijke maatregelen het voorkomen van ontsteking en het aanhouden van voldoende afstand tussen waterstofopslag en te beschermen objecten.

7.6.1 Detectie

Eén van de belangrijkste manieren om waterstof te detecteren, is door waterstofgas met behulp van geur waar te nemen. Dit is alleen mogelijk wanneer een geurstof aan waterstofgas is toegevoegd (odorisatie). De beste optie hiervoor lijkt THT (tetrahydrothiofeen) te zijn, omdat deze geur goed herkend wordt en geassocieerd wordt met aardgas (DNVGL, 2020b). THT bevat zwavel; een nadeel van geurstoffen op basis van zwavel is dat de levensduur van

de katalysatoren in brandstofcellen erdoor verkort wordt. Een zwavelvrije odorant is een alternatief, maar de herkenbaarheid en associatie met gevaar zijn hierbij niet gegarandeerd (KIWA, 2018).

Het waarnemen van waterstof kan ook met detectoren plaatsvinden. Een detector bevat een sensor die gekoppeld is aan een alarmsysteem. Er zijn diverse soorten sensoren en naast een verschillende werking, verschillen ze ook in gevoeligheid (detectietijd) en levensduur. Bij de keuze voor een sensor moet daarom gelet worden op de eisen die eraan gesteld worden in de te beschermen ruimte, bijvoorbeeld de detectietijd. Meestal zal een sensor niet aan alle eisen voldoen, waardoor het gebruik van meerdere soorten tegelijkertijd voor de hand ligt. Omdat de werking van sensoren in de loop der tijd achteruit gaat, moeten ze gecontroleerd en onderhouden worden.

De aanwezigheid van waterstof kan direct gedetecteerd worden met waterstofsensoren. De geldende normen hiervoor staan beschreven in ISO 26142:2010 (*Hydrogen detection apparatus — Stationary applications*).¹⁷ Bij de locatiebepaling van de detectoren moet rekening worden gehouden met aspecten als uitstroomrichting, verdunning, luchtstromen et cetera. De alarmniveaus die in de literatuur genoemd worden, zijn 25% van de LFL (= 1 vol.%) voor alarmering en 60% van de LFL (= 2,4 vol.%) voor het afsluiten van waterstofbevattende systemen en het activeren van ventilatie (Hysafe, 2009). Netbeheerders overwegen om in analogie met aardgas de grens van 10% van de LFL te hanteren als alarmniveau voor veilig werken (Morsche, 2020).

De aanwezigheid van waterstof kan ook indirect gedetecteerd worden met koolmonoxide- of zuurstofsensoren. Het voordeel van koolmonoxidesensoren is, dat ze vroegtijdig waterstof kunnen detecteren, omdat hun meetbereik in het ppm-gebied ligt (1 vol.% = 10.000 ppm). Bij zuurstofsensoren is er het nadeel dat kleine fluctuaties tot een vals alarm voor waterstof kunnen leiden. Een alarmeringsniveau van 0,4 vol. % waterstof (10% LEL) wordt al bereikt bij een afname van 0,084 vol.% zuurstof. Zuurstofsensoren zijn daarom meer geschikt om grote veranderingen in waterstofconcentraties te detecteren dan kleine veranderingen (Buttner et al, 2014).

Een interessante optie voor het detecteren van een waterstoflek, is het gebruik van coatings of tape die verkleuren zodra ze in contact komen met waterstof. Dit maakt een visuele inspectie van leidingen en apparatuur mogelijk (Hoagland, 2012).

7.6.2 Ventilatie

Ventilatie is één van de belangrijkste repressieve maatregelen die in de literatuur genoemd worden. Ventilatie zorgt ervoor dat:

- > voorkomen wordt dat ontvlambaar gas zich ophoopt door het uit een ruimte weg te blazen
- > het volume van de explosieve atmosfeer vermindert (door verdunnen)
- > de tijdsduur dat een explosieve atmosfeer aanwezig is, beperkt wordt (HySafe, 2009).

Ventilatie is een efficiënte en veel gebruikte veiligheidsmaatregel en kan natuurlijk of mechanisch van aard zijn. Er worden vier basistechnieken A, B, C en D onderscheiden (RvO, 2014).

¹⁷ Voor sensoren voor brandbare gassen gelden in algemene zin NEN-EN-IEC 60079-29-2:2015 (selectie, installatie, gebruik en onderhoud) en NEN-EN-IEC 60079-29-1:2017 (prestatie-eisen).

> **Natuurlijke ventilatie (type A)**

Drukverschillen tussen binnen en buiten veroorzaken in een gebouw een natuurlijke ventilatiestroom (RIVM, 2009). De drukverschillen ontstaan door wind die tegen het gebouw blaast en door thermische trek ten gevolge van temperatuurverschillen tussen binnen en buiten. Het plaatsen van ventilatieopeningen kan natuurlijke ventilatie bevorderen, waarbij gelet moet worden op de grootte van de openingen en het hoogteverschil tussen de openingen (Prasad et al, 2010). Windrichtingen, windsnelheden en temperatuurverschillen veranderen voortdurend, wat het reguleren van natuurlijke luchtstromen lastig maakt.

> **Mechanische ventilatie**

Luchtblazers (type B) en afzuigventilatoren (type C) of een combinatie daarvan (type D) zorgen voor een gecontroleerde aanvoer van verse lucht in een ruimte of in een gebouw. Een ventilator heeft ronddraaiende bladen die lucht een bepaalde kant opduwen, terwijl een blazer verse lucht toevoert. Een ventilator en een blazer kunnen gecombineerd zijn. De werking van ventilatiesystemen moet gegarandeerd en gecontroleerd worden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat het aanzetten van mechanische ventilatie tot een vonk en daarmee tot ontsteking van een waterstof-luchtmengsel zou kunnen leiden.

De op dit moment meest voor de hand liggende toepassing van waterstof is in oude woningen die lastig te isoleren en eigenlijk alleen met gas warm te krijgen zijn. Veel van deze woningen zijn momenteel niet voorzien van mechanische ventilatie, zodat natuurlijke ventilatie de enige manier is om de woning te voorzien van frisse lucht. Natuurlijke ventilatie vindt dan plaats via ramen, deuren, ventilatieroosters, kieren en naden. De manier waarop een woning of een gebouw geventileerd wordt, heeft in ieder geval invloed op de manier waarop waterstof zich kan verspreiden, mocht er sprake zijn van een lekkage.

Voor natuurlijke ventilatie worden de volgende aanbevelingen gedaan (HyIndoor, 2015) (Fuster et al, 2016).

- > Het gebruik van een horizontaal ventilatiekanaal moet voorkomen worden, om een overgang naar detonatie te voorkomen.
- > Een ventilatieopening in een muur heeft de voorkeur boven een opening in het dak, omdat een ventilatieopening in het dak minder efficiënt is.
- > Wanneer er één ventilatieopening is, moet deze zo hoog mogelijk in de ruimte geplaatst worden en zo dicht mogelijk tegen het plafond.
- > Wanneer er meerdere ventilatieopeningen zijn, moeten deze zo laag en zo hoog mogelijk geplaatst worden om een zo groot mogelijke luchtverplaatsing te krijgen.
- > De oriëntatie van een ventilatieopening moet bij voorkeur staand zijn in plaats van liggend.
- > Meerdere ventilatieopeningen op verschillende hoogtes in muren die tegenover elkaar staan, hebben de voorkeur boven één ventilatieopening met hetzelfde totaaloppervlak. Bij natuurlijke ventilatie geven meerdere kleine openingen een betere opmenging. (Matsuura, 2009).
- > De windkracht en de windrichting kunnen ventilatie bevorderen of tegenwerken. Tegenwerking gebeurt wanneer de wind tegen de hoger gelegen ventilatieopening blaast waardoor de uitstroom van gas bemoeilijkt wordt (Prasad et al, 2010).
- > Een ventilatieopening moet aan beide kanten van de muur vrij zijn van belemmeringen.

Voor mechanische ventilatie worden de volgende aanbevelingen gedaan.

- > Een ventilatiesysteem moet een dusdanige capaciteit hebben, dat een gevaarlijke atmosfeer voorkomen wordt. Bij het ontwerpen moet rekening worden gehouden met de snelheid van uitstromen, de hoeveel waterstof die kan uitstromen en met de snelheid waarmee waterstof kan worden gedetecteerd. In Bijlage 2 is een nomogram opgenomen waarmee grafisch bepaald kan worden wat de dimensies van één ventilatieopening moeten zijn om onder een bepaalde waterstofconcentratie te blijven bij een bepaald waterstofdebiet (Molkov, 2014).
- > Ventilatiesystemen kunnen permanent aan staan om een ruimte van verse lucht te voorzien of alleen worden geactiveerd zodra waterstof in een ruimte is gedetecteerd. In het laatste geval moet ook – als dat mogelijk is – de toevoer van waterstof worden afgesloten. De toevoer moet ook worden afgesloten wanneer het ventilatiesysteem uitvalt. Opgemerkt moet worden dat dicht bij een waterstoflek altijd een gevaarlijke concentratie waterstof aanwezig zal zijn, die niet met ventilatie verholpen kan worden.
- > In de literatuur wordt aangegeven dat voor waterstof ventilatievouden nodig zijn van 20x/uur of meer en dat de concentratie lager dan 0,4 vol.% waterstof moet blijven als mensen in de ruimte aanwezig kunnen zijn (HySafe, 2009).

7.6.3 Ontstekingsbronnen vermijden of beheersen

Een woning is geen procesinstallatie en maatregelen die gelden om explosieve atmosferen in procesinstallaties te voorkomen, bijvoorbeeld ATEX-zonering, zijn niet van toepassing op woningen (Europees Parlement, 1999). Desalniettemin kunnen in een woning vaak dezelfde principes en maatregelen worden toegepast.

- > Er zijn veel ontstekingsbronnen die een waterstofwolk kunnen doen ontsteken (zie ook paragraaf 6.3). Deze potentiële ontstekingsbronnen moeten geïdentificeerd worden en hun aantal moet zo laag mogelijk gehouden worden.
- > Waterstof is van zichzelf een slechte geleider, maar als de waterstofuitstroom hoog genoeg is, kan dat voldoende zijn om statische elektriciteit te geven. Daarom moeten waterstofbevattende systemen altijd geaard zijn, zeker als de druk in het systeem hoog is (Molkov 2012).
- > Waterstof dat vrijkomt, zal door het stijgend vermogen naar boven bewegen. Door ontstekingsbronnen lager te plaatsen dan de mogelijke leklocaties, kan in veel gevallen ontsteking voorkomen worden (Pritchard et al, 2009). Ook kan gebruik gemaakt worden van schotten of van drukverschillen om een waterstofwolk weg te houden van ontstekingsbronnen.

7.6.4 Afstand houden

Veiligheidsafstanden zijn bedoeld om onder andere gebouwen, installaties, mensen buiten en de omgeving te beschermen tegen een incident dat zich voor kan doen. Er zijn verschillende veiligheidsafstanden die in acht genomen kunnen worden, zoals de afstand tussen het uitstromingspunt en ontstekingsbronnen en de afstand tussen het uitstromingspunt en gebouwen.

De scheiding die de veiligheidsafstanden bieden, moet ervoor zorgen dat

1. de ontlambare waterstofwolk geen ontstekingsbron tegenkomt en
2. in geval het vrijkomende waterstof wél ontstoken is, de warmtestraling en/of de overdruk de te beschermen partij niet kunnen bereiken of beschadigen.

Voorbeelden van veiligheidsafstanden van waterstofinstallaties in de procesindustrie worden gegeven in NFPA 55 (NFPA, 2020). Voor het bepalen van de diverse veiligheidsafstanden

moet zoveel mogelijk rekening worden gehouden met de inhoud en de werkdruk van de waterstofbevattende installatie en met de lay-out van de situatie ter plaatse. Het toepassen van veilige afstanden komt terug in de vraag of waterstofbevattende systemen binnen of buiten een gebouw geplaatst moeten worden. Bij uitstroming buiten is de kans op hoge waterstofconcentraties immers een heel stuk kleiner.

De veiligheidsafstanden zoals die hierboven beschreven staan, zijn bedoeld om de effecten buitenshuis te bepalen. De rekenprogramma's die de verspreiding en de effecten van het vrijkomen van waterstof kunnen berekenen (bijvoorbeeld Phast en Effects), zijn niet bedoeld en niet geschikt om veiligheidsafstanden binnenshuis te bepalen, omdat binnenshuis sprake is van ophoping van waterstof in ruimtes en onder plafonds. CFD-software¹⁸ zoals FLACS is hiervoor wel geschikt.

Om toch een indruk te geven van de grootte van veiligheidsafstanden binnenshuis, is gezocht naar voorbeelden, maar deze zijn niet gevonden. Wel is inzage gekregen in verkennende berekeningen van het verticaal vrijkomen van waterstof uit een 100 mbar leiding in de grond in een open gebied (AVIV, 2019). De LFL van de uitstromende wolk was 1 m of minder. Het is te verwachten dat voor een 30 mbar-waterstofleiding binnenshuis deze afstand van dezelfde orde grootte is. Hier is een aantal redenen voor: de afstand tot de LFL zal bij een 30 mbar-leiding wat kleiner zijn dan bij een 100 mbar-leiding en bovendien verspreidt waterstof zich binnenshuis minder snel en minder ver dan buitenshuis. Dit effect wordt echter teniet gedaan wanneer de uitstroming horizontaal is, omdat de afstand tot de LFL dan groter wordt. Omdat deze drie genoemde effecten elkaar kunnen compenseren, kan dus verondersteld worden dat de afstand binnenshuis van vergelijkbare grootte is.

7.6.5 Limiet aan de maximale hoeveelheid waterstof

In het HyIndoor-project wordt aanbevolen dat maximaal 0,26 g/m³ waterstof aanwezig mag zijn c.q. mag vrijkomen in een besloten ruimte, om te voorkomen dat overdrukken groter dan 0,1 bar ontstaan (HyIndoor, 2015). Dit komt overeen met 0,3 vol.% waterstof, wat meer dan een factor 10 lager is dan de LFL. Ramen zullen bij deze overdruk wel breken, maar de draagconstructie van het gebouw blijft intact.

7.7 Persoonlijke bescherming en hulpverlening

De zesde en laatste line of defence heeft betrekking op het in veiligheid brengen van personen binnen of buiten de woning, door de bewoners zelf of door omstanders en professionals. Uitgangspunten zijn in ieder geval dat bewoners de woning binnen redelijke termijn kunnen verlaten, dat hulpverleners veilig genoeg kunnen werken en dat er geen sprake is van instortingsgevaar (Fuster et al, 2016).

- > Waterstofbranden moeten niet geblust worden totdat de toevoer gestopt is vanwege de kans op herontsteking met kans op explosie. Nabijgelegen objecten moeten gekoeld worden.
- > Waterstofvlammen zijn moeilijk te doven. Het besproeien van waterstofvlammen kan de situatie verergeren, omdat turbulentie bevordert wordt en daarmee de verbranding, en omdat waterstof rondom waterstofdruppels kan branden (HyResponse, 2016b).
- > De waterstofbevattende systemen moeten duidelijk herkenbaar zijn (Fuster et al, 2016).

¹⁸ Computational Fluid Dynamics.

Samenvattend

- > Aan de hand van het vlinderdasmodel zijn drie soorten preventieve en drie soorten repressieve maatregelen te onderscheiden.
- > Preventieve maatregelen hebben betrekking op het beheersen van processen, op het ingrijpen bij constatering van afwijkingen en op noodbescherming.
- > Repressieve maatregelen hebben betrekking op het beperken van de uitstroming van waterstof, op het voorkomen van het escaleren van een lekkage en op persoonlijke bescherming en hulpverlening.
- > De belangrijkste maatregelen voor het voorkomen van een ongewenste uitstroming van waterstof binnenshuis zijn normen met betrekking tot installatie, beheer en onderhoud van de waterstofbevattende systemen.
- > Belangrijke maatregelen voor het beheersen van een ongewenste uitstroming van waterstof zijn overdrukbeveiligingen en doorstroombegrenzers.
- > De belangrijkste maatregel voor het beperken van een uitstroming van waterstofgas is de aanwezigheid van automatische en/of handmatig te bedienen afsluiters.
- > De belangrijkste maatregelen om escalatie van een waterstofuitstroming te voorkomen, zijn detectie, ventilatie, het vermijden of beheersen van ontstekingsbronnen en afstand houden.
- > De belangrijkste maatregelen voor hulpverleners die waterstofbranden bestrijden zijn het stoppen van de toevoer en het niet blussen van waterstofbranden.

Literatuur

Alcock, J.L. et al. (2001). *Compilation of existing safety data on hydrogen and comparative fuels*, Deliverable report of European FP5 project EIHP2.

Astbury, G.R. et al. (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2178-2185.

AVIV. (2009). De QRA is onderhands verkregen en de titel en de herkomst kunnen om die reden niet genoemd worden.

Bauwens, C.R. et al. (2012). Effect of hydrogen concentration on vented explosionoverpressures from lean hydrogen/air deflagrations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 17599-17605.

Brain, P. (2019). Presentation *Hy4Heat* at the KIWA Hydrogen Knowledge trip November 2019.

British Standards Institution. (BSI, 2020). *Hydrogen-fired gas appliances – Guide. PAS 4444-2020*. Geraadpleegd op 9 juli 2020 van <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030389165>.

Buttner, W.J. et al. (2014). An assessment on the quantification of hydrogen releases through oxygen displacement using oxygen sensors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 20484-20490.

Cariteau, B. et al. (2012). Experimental study of the concentration build-up regimes in an enclosure without ventilation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 17400-17408.

Coward, H.F. & Jones, G.W. (1952). *Limits of flammability of gases and vapors*, Bulletin 503, Bureau of Mines. Washington: United States Government Printing Office.

De Stefano, M. et al. (2019). Hydrogen dispersion in a closed environment. *International Journal of hydrogen energy*, 44, 9031-9040.

Det Norkse Veritas – Germanischer Lloyd. (DNVGL, 2020a). *Gedrag van waterstof bij lekkages in het gasdistributienet*.

Det Norkse Veritas – Germanischer Lloyd. (DNV-GL, 2020b). *Ruikbaarheid van een aantal odoranten in aardgas-/waterstofmengsels*.

Europees Parlement. (1999). *Richtlijn 1999/92/EG betreffende minimumvoorschriften voor de verbetering van de gezondheidsbescherming en van de veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen*. Geraadpleegd op 18 augustus 2020 van <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0092>.

Frazer-Nash Consultancy. (2018). *Appraisal of Domestic Hydrogen Appliances*. Rapportnummer FNC 55089/46433R.

Fuster, B., et al. (2016). Guidelines and recommendations for indoor use of fuel cells and hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 7600-7607.

Gummer, J. et al. (2008). *Spontaneous ignition of hydrogen – Literature review*. Rapport RR615, Health and Safety Executive.

Gupta, S. et al. (2009). Hydrogen related risk within a private garage: concentration measurements in a realistic full scale experimental facility. *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 5902-5911.

H2Platform. (2020). Ons werk rond veiligheid (WVIP). Geraadpleegd op 2 september 2020 van <https://opwegmetwaterstof.nl/ons-werk-rond-veiligheid-wvip/>.

Hajji, Y. et al. (2014). Dispersion and behavior of hydrogen during a leak in a prismatic cavity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 6111-6119.

Hoagland, B. (2004). *Hydrogen leak detection – low cost distributed gas sensors*. Geraadpleegd op 17 augustus van https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/webinars_slides_element_one_040312.pdf

Hydrogen Incidents and Accidents Database. (HIAD, z.d.). Geraadpleegd op 7 juli 2020 van <https://odin.jrc.ec.europa.eu/giada/>.

HyIndoor. (2015). *Pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems - D6.1 Report on recommendations for RCS*.

HyResponse. (2016a). *D6.3 European Emergency Response Guide*.

HyResponse. (2016b). *Basics of hydrogen safety for first responders – Lecture: Hydrogen properties relevant to safety*.

HyResponse. (2016c). *Strategies and Intervention tactics - FC stationary installations*.

HySafe. (2009). *Deliverable D113 - Initial Guidance for Using Hydrogen in Confined Spaces - Results from InsHyde*.

Instituut Fysieke Veiligheid. (2020). *Vijf veiligheidsprincipes voor waterstof als energiebron voor woningen*. Arnhem: IFV.

Lacome, J.M. et al. (2011). Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2302-2312.

KIWA Gastec. (2015). *Energy storage component research & feasibility study scheme – HyHouse - Safety issues surrounding hydrogen as an energy storage vector*. Cheltenham: Kiwa Ltd.

KIWA Gastec. (2016). *DECC Desk study on the development of a hydrogen-fired appliance supply chain*. Cheltenham: Kiwa Ltd.

KIWA. (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*, rapportnr. GT-170272. Apeldoorn: Kiwa Technology B.V.

KIWA. (2019a). *Eerste inventarisatie naar waterstofuitstromen bij kleine toelaatbare aardgaslekken*. Apeldoorn: Kiwa Technology B.V.

KIWA. (2019b). *Keuringseis 214 - Geschiktheid voor bijmenging tot en met 100% waterstofgas*. Apeldoorn: Kiwa Technology B.V.

Kobayashi, K. et al. (2005). *Application of Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for BWR Plants in Japan*. Geraadpleegd op 26 mei 2020 van <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/33/003/33003503.pdf?r=1&r=1>.

Krom, A.H.M. (2020). *Hydrogen concentration / equivalent hydrogen pressure in steel from different sources of hydrogen*. Kenmerk VA 20.0203. Memo via mail ontvangen op 8 juli 2020.

Kundu, S. et al. (2016). A review on understanding explosions from methane-air mixture. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 507-523.

Kuznetsov, M. et al. (2015). Medium-scale experiments on vented hydrogen deflagration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36 416-428.

Lacome, J.M. et al. (2011). Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2302-2312.

Linde. (2015). *Folder Zuurstofgebrek*. Schiedam: Linde Gas Benelux B.V.

Liu, X. et al. (2014). Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen-air. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 6774-6782.

Lowesmith, B.J. et al. (2011). *Vented confined explosions involving methane/hydrogen mixtures*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 2337-2343.

Matsuura, K. (2009). Effects of the geometrical configuration of a ventilation system on leaking hydrogen dispersion and accumulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 9869-9878.

McGillivray, A. (2015). *Review of the event tree structure and ignition probabilities used in HSE's pipeline risk assessment code MISHAP*, Research Report RR1034.

Mejia, A.H. et al. (2020). Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low-pressure gas infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 8810-8826.

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2019). *Klimaatakkoord*.

Molkov, V. (2012). *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I*. Londen: Bookboon.com Ltd.

Molkov, V. (2013). *Chapter P: Hydrogen fundamental properties*. Geraadpleegd op 15 augustus 2020 van <http://www.h2euro.org/hyfacts/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/1-Chapter-P-teaching-materials-Hydrogen-fundamental-properties-VM-130228-altered-UU.docx>.

Molkov, V. (2014). *Passive ventilation of enclosures with one vent, the uniformity criterion, and validation of pressure peaking phenomenon (unignited releases)*. Presentatie gegeven tijdens de HySafe Research Priorities Workshop in Wahington DC in november 2014. Geraadpleegd op 10 juli 2020 van https://www.hysafe.info/wp-content/uploads/2016/07/156_RPW2014_Presentations-Research-Priorities-2014-distribution-updated-2016-05-20.pdf.

Moosemiller, M. (2011). Development of algorithms for predicting ignition probabilities and explosion frequencies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 259-265.

Morsche, P. te. (2020). Persoonlijke communicatie bij de review van dit rapport.

National Fire Protection Association. (NFPA, 2020). *Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code*. Geraadpleegd op 16 augustus 2020 van <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=55>.¹⁹

Nederlandse Normalisatie instituut. (NEN, 2018). *Voorziening voor gas met een werkdruk tot en met 500 mbar - Prestatie-eisen – Nieuwbouw*, NEN 1078:2018 nl.

Nederlandse Normalisatie instituut. (NEN, 2020). *Webinar NP-H2IGO*. Bijgewoond op 24 juli 2020 en te volgen via https://www.nen.nl/Evenementen/Presentaties/20200724-NPH2IGO.htm?utm_medium=email.

Netbeheer Nederland. (2019). *Betrouwbaarheid van gasdistributienetten in Nederland - Resultaten 2018*. versie: 098, kenmerk: GT-190045.

Ono, R. et al. (2007). Minimum ignition energy of hydrogen–air mixture: Effects of humidity and spark duration. *Journal of Electrostatics*, 65, 87-93.

Prasad, K. et al. (2010). Effect of wind and buoyancy on hydrogen release and dispersion in a compartment with vents at multiple levels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9218-9231.

Pritchard, D.K. et al. (2009). *Installation permitting guidance for hydrogen and fuel cell stationary applications: UK version*. Buxton: Health and Safety Laboratory.

Reinecke, E.-A. (2013). Simulation of the efficiency of hydrogen recombiners as safety devices. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 8117-8124.

¹⁹ NFPA 55 is gratis in te zien. Dit werkt wel met Google Chrome als browser, maar niet met Microsoft Edge.

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (RvO, 2014). *Infoblad Ventilatiesystemen in energiezuinige nieuwbouwwoningen*.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (RIVM, 2009) *GGD-richtlijn medische milieukunde - Beoordeling van ventilatie en ventilatievoorzieningen van woningen*. RIVM-rapport 609330011/2009.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (RIVM, 2019). *Vijftien jaar incidentanalyse - Oorzaken, gevolgen en andere kenmerken van incidenten met gevaarlijke stoffen bij majeure risicobedrijven in de periode 2004-2018*. RIVM-rapport 2019-0042.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (RIVM, 2020a). *Handleiding Risicoberekeningen Bevi*, versie 4.2, april 2020.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (RIVM, 2020b). *Handleiding Risicoberekeningen Bevb*, versie 3.1, april 2020.

Schefer, R.W. et al. (2006). Characterization of leaks from compressed hydrogen dispensing systems and related components. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1247-1260.

Shebeko, A.Y. (2016). An investigation of an ignition of flammable gaseous mixtures with mechanical sparks. *Fire Safety Journal*, 78, 122-129.

Sherwood, J. (2015). *The new standard on avoidance of electrostatic hazards*. Hazards 25, Symposium series No 160, paper 6007-32-1.

Swain, R.M. et al. (2005). Ignition of lean hydrogen–air mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1447-1455.

Swain, R.M. et al. (2007). An experimental investigation into the ignition of leaking hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 287-295.

Topsector Energie. (2020a). *Waterstof voor de energietransitie - Een programmatische aanpak voor innovaties op het thema waterstof in Nederland voor de periode 2020 – 2030*.

Topsector Energie. (2020b). *Overview of hydrogen projects in the Netherlands*. Geraadpleegd op 19 juli 2020 van <https://www.topsectorenergie.nl/nieuws/tki-nieuw-gas-zet-nederlandse-waterstofprojecten-de-etalage>.

TNO. (1992). *Onderzoek naar de effecten van een explosie in verdiept gelegen wegen met (niet) constructieve afdekking*. TNO-rapport PML 1992-C33. Rijswijk: TNO.

Vaughen, B.K. et al. (2012). What you don't manage will leak: A tribute to Trevor Kletz. *Process Safety and Environmental Protection*, 90, 411-418.

Wingerden, K. (2020). *Webinar Electrostatics hazards when handling flammable materials*. Geraadpleegd op 22 juni 2020 van https://www.youtube.com/watch?v=znm1jp3X7Bk&feature=youtu.be&utm_source=Email&utm_medium=Email&utm_campaign=Epost-22062020-Webinar-Replay&utm_content=Visit-to-YouTube-Page.

Bijlage 1

Bepaling van de kans op vertraagde ontsteking

In het artikel van Moosemiller uit 2011 worden formules gegeven met behulp waarvan de kans op een vertraagde ontsteking bij benadering bepaald kan worden. Hierover moet wel worden opgemerkt, dat de formules ontwikkeld zijn, ondanks het feit dat veel harde gegevens nog ontbreken. De formules zijn het resultaat van het combineren van beperkte praktijkgegevens en de ervaring en mening van experts. Gesteld wordt dat ondanks deze belangrijke beperkingen, de voorspellingen redelijk robuust zijn.

Diverse factoren bepalen de kans op vertraagde ontsteking ($P_{\text{vertraagd}}$). Voor elk van deze factoren F kan de bijdrage aan de kans op vertraagde ontsteking worden bepaald. De volgende factoren worden beschouwd:

Minimum ontstekingsenergie: F_{MOE}
Debiet: F_{debiet}
Uitstroomduur: F_{duur}
Locatie van de uitstroming: F_{locatie} .

F_{locatie} bestaat uit de subfactoren $F_{\text{volume ruimte}}$, $F_{\text{ventilatie}}$, $F_{\text{strategie}}$ en $F_{\text{electr. classificatie}}$.

Wanneer het product van deze factoren *groter* is dan 1, geldt voor $P_{\text{vertraagd}}$:

$$P_{\text{vertraagd}} = 1 - [0,7 / (F_{\text{MOE}} \times F_{\text{debiet}} \times F_{\text{duur}} \times F_{\text{locatie}})] \quad [2]$$

Wanneer het product van deze factoren *kleiner* is dan 1, geldt voor $P_{\text{vertraagd}}$:

$$P_{\text{vertraagd}} = 0,3 \times F_{\text{MOE}} \times F_{\text{debiet}} \times F_{\text{duur}} \times F_{\text{locatie}} \quad [3]$$

In Tabel B1.1 op de volgende bladzijde staan de (sub)factoren beschreven en wordt het volgende voorbeeld uitgewerkt.

In een huis van 300 m³ is sprake van een waterstoflek waarbij gedurende één uur 1 liter waterstof per seconde vrijkomt. In de woning is 1 persoon aanwezig en het ventilatievoud in de woning is 4x per uur. Alle deuren in de woning staan open. Er is geen specifieke strategie voor wat betreft ventilatie en voor wat betreft ontstekingsbronnen.

Tabel B1.1 Formules voor het bepalen van de kans op vertraagde ontsteking (Bron: Moosemiller, 2011)

Factor	Formule	Parameters	Uitkomst
F_{MOE}	$= 0,6 - 0,85 (\log MOE)$ Voorwaarde: $0,1 \leq F_{MOE} \leq 3$ (MOE in mJ)	[4] MOE = 0,019 mJ	$F_{MOE} = 2,06$
F_{debiet}	$= 7 \times e^{[0,642 \times \ln(\text{debiet}) - 4,67]}$ Voorwaarde: $F_{grootte} \leq 2$ (Debiet in lbs/s. 1 lbs/s = 0.4535 kg/s)	[5] Debiet = 0,183 lbs/s ($\equiv 1 \text{ liter/s} \equiv 0,083 \text{ kg/s}$)	$F_{debiet} = 0,022$
F_{duur}	$= [1 - (1 - S^2) \times [e^{-(0,015 \times S)t}]] / 0,3$ $S = 1 - 0,99^N$, N = aantal personen in woning (t in seconden)	[6] S = 0,01 t = 3600 s	$F_{duur} = 1,39$
$F_{binnen-buiten}$	$= F_{inhoud} \times F_{ventilatie} \times F_{strategie} \times F_{electr. class.}$		$F_{binnen-buiten} = 2,42 \times 1 \times 1 \times 2 = 4,84$
F_{inhoud}	$= (4250 / \text{inhoud}_{\text{ruimte-gebouw}})^{-0,3333}$ Voorwaarde: $0,5 \leq F_{inhoud} \leq 3$ (Inhoud ruimte/gebouw in m ³)	[7] Inhoud woning = 300 m ³	$F_{inhoud} = 2,42$
$F_{ventilatie}$	$= (4 / \text{ventilatievoud})^{0,5}$ Voorwaarde: $0,3 \leq F_{ventilatie} \leq 3$ (Ventilatievoud in aantal keren per uur)	[8] Ventilatievoud = 4x/uur	$F_{ventilatie} = 1$
$F_{strategie}$	= 0,5 als de gaswolk door ventilatie weggeduwd wordt van ontstekingsbron = 1 als voor ventilatie geen specifieke strategie geldt = 2 als de gaswolk door ventilatie door de ontstekingsbron kan gaan	Er is geen strategie	$F_{strategie} = 1$
$F_{electr. class.}$	= 0,5 voor Class I, Div. 1 (ATEX) = 1 voor Class I, Div. 2 (ATEX) = 1,5 voor Class I, Div. 2 (ATEX) = 2 voor niet-geclassificeerd gebied	Gebied is niet ATEX-geclassificeerd	$F_{electr. class} = 2$

$$\begin{aligned}
 \text{Het product van de vier factoren} &= F_{MOE} \times F_{debiet} \times F_{duur} \times F_{binnen-buiten} \\
 &= 2,06 \times 0,022 \times 1,39 \times 4,84 \\
 &= 3,05.
 \end{aligned}$$

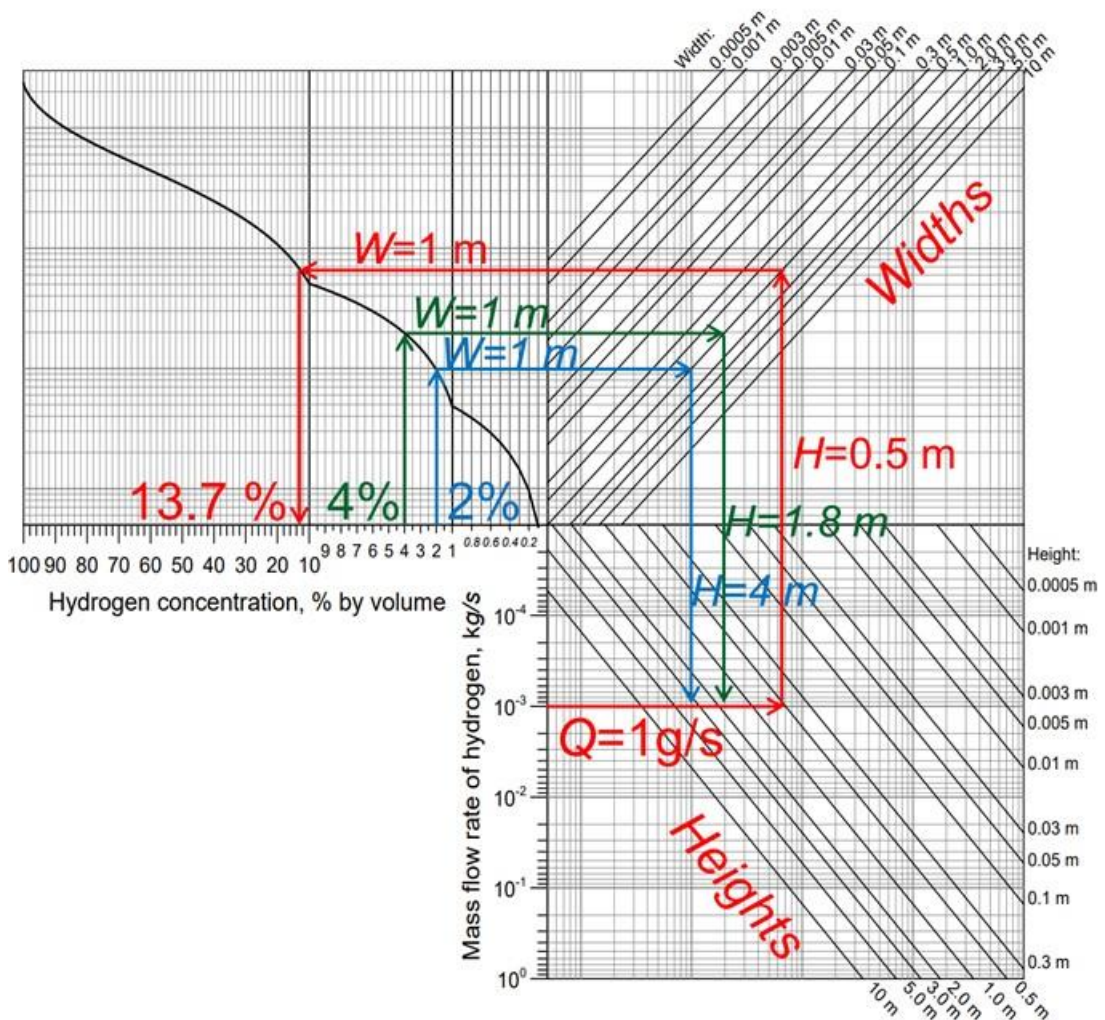
Dit is groter dan 1, waardoor de kans op vertraagde ontsteking bij benadering is:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{vertraagd}} &= 1 - [0,7 / (F_{MOE} \times F_{debiet} \times F_{duur} \times F_{binnen-buiten})] \\
 &= 1 - (0,7/3,05) \\
 &= \mathbf{0,77}
 \end{aligned}$$

Bijlage 2

Nomogram voor het grafisch bepalen van de waterstofconcentratie in een ruimte bij aanwezigheid van één ventilatieopening

Het nomogram kan gebruikt worden om de maximale waterstofconcentratie in evenwichtstoestand te bepalen op basis van de bekende hoogte en breedte van een ventilatieopening en op basis van het debiet. Het nomogram geldt zowel voor uniforme als niet-uniforme waterstof-luchtmengsels in een besloten ruimte met één ventilatieopening.



Figuur B2.1 Nomogram voor het bepalen van de waterstofconcentratie in een ruimte bij aanwezigheid van één ventilatieopening

De procedure voor het berekenen van de waterstofconcentratie kan aan de hand van een voorbeeld uitgelegd worden (volg hierbij de rode lijn). In een ruimte met een ventilatieopening van 1 m breed en 0,5 m hoog vindt uitstroming van waterstof plaats met een debiet van

1 g/s. Aangenomen wordt dat het waterstof-luchtmengsel uniform verdeeld is over de gehele ruimte. De procedure is als volgt:

- > Selecteer op de verticale as van het onderste blok van het nomogram het debiet van de waterstoflekkage en trek een horizontale lijn tot het snijpunt met één van de diagonale lijnen. Deze lijnen representeren de verschillende mogelijke hoogtes van de ventilatieopening. In het nomogram zijn 15 van deze lijnen beschikbaar die hoogtes beslaan van 0,5 mm tot 10 m.
- > Trek vanaf het eerste snijpunt een verticale lijn omhoog tot het snijpunt met één van de diagonale lijnen in het blok rechtsboven in het nomogram. Deze diagonalen representeren de verschillende breedtes van de ventilatieopeningen. Er zijn 15 van dergelijke lijnen die een breedte beslaan van 0,5 mm tot 10 m.
- > Trek vanaf het tweede snijpunt een horizontale lijn naar links tot het snijpunt met de curve in het linker blok van het nomogram.
- > Trek een verticale lijn vanaf het derde snijpunt naar de horizontale as van het linker blok. De waarde op de horizontale as komt overeen met de waterstofconcentratie (vol.%).

De uitkomst is 13,7 vol.%. Dat wil zeggen dat bij een continue uitstroom van 1 g/s en in aanwezigheid van een ventilatieopening van 1 x 0,5 m (B x H) in de ruimte een concentratie bereikt wordt van 13,7 vol.%

Het nomogram kan ook andersom worden gebruikt, wat wil zeggen dat de grootte bepaald kan worden van een ventilatieopening die moet voorkomen dat bij een bepaald debiet een bepaalde waterstofconcentratie overschreden wordt.