

Ventilatie en detectie van waterstof





Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2025

Auteurs	C. Stähler, M. Spoelstra
Contactpersoon	M. Spoelstra
Datum	17 januari 2025
Foto cover	Shutterstock

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

Inhoud

Samenvatting	4
Inleiding	6
Doel en onderzoeksvragen	6
Onderzoeksmethode	7
Afbakening	7
1 Waterstof	8
1.1 Eigenschappen	8
1.2 Maatregelen	8
1.3 Verspreiding	9
2 Ventilatie van waterstof	11
2.1 Doel van ventilatie	11
2.2 Vormen van ventilatie	11
2.3 Kwantificeren van ventilatie	13
2.4 Ontwerp van een ventilatiesysteem	15
2.5 Regelgeving in Nederland	20
2.6 Samenvatting	21
3 Detectie van waterstof	22
3.1 Detectoren en sensoren	22
3.2 Type detectoren	23
3.3 Eisen aan waterstofsensoren en -detectoren	26
3.4 Eisen aan de plaatsing van waterstofdetectoren	31
3.5 Kans op detectie van een waterstoflek	34
3.6 Regelgeving	35
3.7 Ontwikkelingen	36
3.8 Samenvatting	37
Bronnen	39

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van een literatuuronderzoek dat tot doel heeft om te bepalen welke principes worden toegepast voor ventilatie en detectie van waterstof in besloten ruimtes en om inzichtelijk te maken hoe ventilatie invloed heeft op detectie. De resultaten worden aan de hand van de onderzoeksvragen beschreven.

Ventilatie

Wat is het doel van ventilatie?

Ventilatie is erop gericht om de risico's van een gevaarlijke stof – in dit geval waterstof – te beperken. Ventilatie zorgt ervoor dat waterstof verdund wordt, dat waterstof zich niet ophoopt, dat de waterstofwolk klein blijft en korter aanwezig is, dat waterstof uit de ruimte wordt geblazen en dat er geen verstikkende atmosfeer ontstaat.

Welke vormen van ventilatie zijn mogelijk?

Het ventileren van een ruimte kan via natuurlijke of mechanische ventilatie. Het nadeel van natuurlijke ventilatie is dat de sterkte ervan afhankelijk is van de weersomstandigheden. Om de risico's van waterstof te beperken, wordt daarom meestal gebruikgemaakt van mechanische ventilatie.

Welke eisen worden gesteld aan ventilatiesystemen?

Er zijn normen en richtlijnen die aangeven wat de minimale eisen zijn voor de ventilatiecapaciteit en/of het ventilatievoud. Deze moeten ervoor zorgen dat de waterstofconcentratie laag blijft en niet boven de onderste explosiegrens uitkomt. Het voldoen aan de minimale eisen uit normen en richtlijnen garandeert echter niet dat waterstoflekken altijd afdoende geventileerd worden. Kleine lekken kunnen goed geventileerd worden, maar grote lekken mogelijk niet. Hiervoor zijn specifieke berekeningen nodig die per situatie bepaald moeten worden. Het is aan de gebruiker van de ruimte om te bepalen met welk doel ventilatie wordt ingezet en welke ventilatiecapaciteiten en ventilatievouden aangehouden moeten worden.

Met welke factoren moet rekening gehouden worden bij het ontwerpen van een ventilatiesysteem?

Veel factoren hebben invloed op het ontwerp van het ventilatiesysteem, zoals de grootte van het waterstoflek ten opzichte van de ruimte, de benodigde mate van ventilatie, ventilatieopeningen, obstakels en ventilatiestromingen. Een ventilatiesysteem moet dan ook per ruimte ontworpen worden.

Detectie

Wat is het doel van waterstofdetectie?

Waterstofdetectie heeft als doel om in een zo vroeg mogelijk stadium een waterstoflek te detecteren op basis waarvan eventuele vervolgacties genomen kunnen worden om een gevaarlijke situatie te voorkomen.

Welke vormen van waterstofdetectie zijn mogelijk?

Er zijn grofweg twee groepen detectoren, te weten gasdetectoren en gebiedsdetectoren. Gasdetectoren meten waterstof op één punt en waterstof moet hierbij de afstand tussen de leklocatie en de detector overbruggen. Voor gebiedsdetectoren is dat niet nodig, aangezien zij waterstof op een andere manier waarnemen, bijvoorbeeld via ultrasoon geluid.

Bij de sensor van gasdetectoren vindt een chemische reactie of een fysische interactie met waterstof plaats. De volgende type sensoren zijn mogelijk: katalytische sensoren, elektrochemische sensoren, metaaloxide sensoren, sensoren op basis van warmtegeleiding en optische sensoren.

Welke eisen worden gesteld aan waterstofdetectiesystemen?

Er zijn geen regels waaraan waterstofdetectiesystemen moeten voldoen. Het is aan de gebruiker zelf om te bepalen waar waterstofdetectiesystemen aan moeten voldoen. Factoren die hierbij een rol spelen, zijn bijvoorbeeld de gevoeligheid, nauwkeurigheid, selectiviteit, reactietijd, stabiliteit, onderhoud en kosten. De keuzes die in de praktijk worden gemaakt, zijn afhankelijk van de toepassing (opslag, productie, woningen, voertuigen en grote binnenruimtes). Er is weliswaar een lijst met algemene eisen beschikbaar, maar geen enkele waterstofdetector kan voldoen aan alle eisen.

Waterstofdetectoren mogen in ATEX-zones niet als ontstekingsbron fungeren en moeten daarom explosie veilig zijn en voldoen aan de eisen die NEN 60079-29-2 daaraan stelt.

Waar kunnen detectoren het best geplaatst worden, rekening houdend met de ruimte, de installatie en de luchtstromingen?

Voor het bepalen van de meest geschikte locatie van een of meerdere waterstofdetectoren is kennis nodig over de waterstofdetector zelf, over de verspreiding van waterstof, over de omgeving en over wat te doen na detectie.

Voor binnenruimtes gelden de volgende vuistregels voor het plaatsen van een of meerdere waterstofdetectoren:

- > Een waterstofdetector moet geplaatst worden op locaties waar weinig luchtstromingen en weinig turbulenties zijn. Dus niet in de luchtstromingen die door mechanische ventilatie worden gecreëerd en niet bij afzuigingen naar buiten,
- > In ruimtes van maximaal vijf meter hoog moet een waterstofdetector op 30 centimeter afstand onder het plafond worden geplaatst.
- > In ruimtes die hoger zijn dan vijf meter, is het plaatsen van een waterstofdetector onder het plafond weinig zinvol. De detector kan het best (schuin) boven de installatie op een afstand van niet meer dan drie meter geplaatst worden.
- > Een waterstofdetector moet niet laag bij de vloer worden geplaatst.

In buitenruimtes wordt de plaatsing van gasdetectoren vooral bepaald door de te verwachten grootte van een waterstofwolk. De vuistregel is dat er een per 40 m³ geplaatst wordt, of dat de onderlinge afstand tussen detectoren maximaal 10 meter is. Als er muren, overkappingen en/of veel obstakels zijn, is de onderlinge afstand tussen detectoren kleiner en maximaal vijf meter. De afstanden gelden in drie richtingen. Akoestische detectie bevindt zich bij voorkeur 1 à 2 meter boven een potentiële uitstroombestemming.

Inleiding

Waterstof kent een breed ontvlambaarheidsgebied. De LEL ('lower explosion limit') ligt bij 4 vol.% en de UEL ('upper explosion limit') bij 75 vol.%. De LEL is van deze twee grenswaarden de belangrijkste, omdat deze als eerste wordt bereikt bij het vrijkomen van waterstof (Spoelstra, 2020).

Waterstof is een ontvlambaar gas dat een lagere dichtheid heeft dan lucht en zal daardoor opstijgen in lucht. Als waterstof vrijkomt in een besloten ruimte, kan het zich ophopen onder plafonds en in zogenoemde 'pockets' of 'dode hoeken'. Dat zijn kleine ruimtes in en tussen apparatuur. In deze ruimtes kunnen hoge concentraties waterstof ontstaan die tot potentieel gevaarlijke situaties leiden, omdat hierin een explosieve wolk aanwezig kan zijn. Om te voorkomen dat de waterstofconcentratie in een ruimte te hoog wordt, moeten beheersmaatregelen worden getroffen. Deze staan beschreven in normen, voorschriften en protocollen. Twee van die maatregelen zijn ventilatie en detectie, maar kennis en informatie hierover zijn vaak beperkt beschikbaar.

Om dit kennishiaat te vullen, heeft het NIPV een literatuuronderzoek uitgevoerd. De kennis die hiermee is verkregen, is niet alleen relevant voor het bepalen van de manier waarop ventilatie- en detectiesystemen opgebouwd kunnen worden, maar ook voor het beoordelen van veiligheidsrisico's van waterstof in besloten ruimtes door gebruikers, veiligheidsregio's, omgevingsdiensten, overheden en andere organisaties.

Doel en onderzoeksvragen

Het doel van dit onderzoek is tweeledig:

- a) Inzicht krijgen in de principes van ventilatie en van detectie van waterstof in besloten ruimtes.
- b) Inzichtelijk maken hoe ventilatie invloed heeft op detectie.

Op basis van het doel van het onderzoek zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

Ventilatie

- > Wat is het doel van ventilatie?
- > Welke vormen van ventilatie zijn mogelijk?
- > Welke eisen worden gesteld aan ventilatiesystemen?
- > Met welke factoren moet rekening gehouden worden bij het ontwerpen van een ventilatiesysteem?

Detectie

- > Wat is het doel van waterstofdetectie?
- > Welke vormen van waterstofdetectie zijn mogelijk?
- > Welke eisen worden gesteld aan waterstofdetectiesystemen?

- > Met welke factoren moet rekening gehouden worden bij het ontwerpen van een waterstofdetectiesysteem?
- > Waar kunnen detectoren het best geplaatst worden, rekening houdend met de ruimte, de installatie en de luchtstromingen?

Onderzoeksmethode

De meeste artikelen die gebruikt zijn in dit literatuuronderzoek zijn verkregen door specifiek in ScienceDirect op een onderwerp te zoeken. Voor ventilatie gaat het dan om zoektermen als 'Indoor hydrogen ventilation' en 'Design principles ventilation', en voor detectie om zoektermen als 'detector placement models hydrogen', 'fiber sensors hydrogen' en 'MOS hydrogen sensors'. Als aanvulling hierop zijn publicaties doorgenomen van de International Conference on Hydrogen Safety (ICHHS) uit 2021 en 2023. Daarnaast zijn artikelen gevonden doordat ze als bron in andere artikelen vermeld staan ('sneeuwbalmethode'), of doordat de onderzoekers ze tijdens andere onderzoeksactiviteiten op het gebied van waterstofveiligheid tegenkwamen.

Voor het onderdeel ventilatie is een webinar bekeken (Zalosh et al., 2021) en voor het onderdeel detectie is een bezoek gebracht aan een leverancier van waterstofdetectoren (Adema, 2024). Hieruit kwamen artikelen en informatie naar voren die ook zijn gebruikt.

Afbakening

Algemeen

- > Het onderzoek richt zich op gasvormig waterstof, in het bijzonder op waterstof dat onder (hoge) druk aanwezig is en vrijkomt, maar nog niet ontstoken is. Met de term 'waterstof' wordt in dit rapport daarom gasvormig waterstof bedoeld.
- > Het onderzoek gaat niet in op maatregelen die bedrijven kunnen nemen op het moment dat waterstof gedetecteerd wordt en ventilatie in werking wordt gezet.
- > Het onderzoek laat vloeibaar waterstof buiten beschouwing.

Ventilatie

- > Het onderzoek richt zich niet op brandwerende maatregelen en ook niet op het ventileren van overdruk, bijvoorbeeld door middel van explosieluiken.
- > Het onderzoek richt zich niet draagbare ventilatieapparatuur.

Detectie

- > Het onderzoek richt zich op vaste installaties voor het detecteren van waterstof en niet op de volgende middelen:
 - draagbare detectieapparatuur
 - apparatuur waarmee luchtmonsters worden genomen
 - apparatuur waarmee waterstofvlammen waargenomen kunnen worden.
- > Dit onderzoek richt zich op detectie van gasvormig waterstof, maar niet op:
 - detectie van vloeibaar waterstof
 - detectie van waterstofvlammen.

1 Waterstof

Dit hoofdstuk beschrijft kort de eigenschappen van waterstof, waarna verschillende maatregelen aan de orde komen die genomen kunnen worden om de risico's van waterstof te beperken. Ook wordt het verspreidingsgedrag van waterstof besproken, omdat dit van invloed is op het plaatsen van ventilatie- en detectiesystemen.

1.1 Eigenschappen

Waterstof staat door de energietransitie volop in de belangstelling, niet alleen in de chemische industrie, maar ook in de gebouwde omgeving. Het is echter een gevaarlijke stof met specifieke eigenschappen waarmee rekening moet worden gehouden (Spoelstra, 2020):

- > Waterstof (H_2) is het kleinste en lichtste molecuul dat er bestaat. Onder normale omstandigheden is waterstof gasvormig en lichter dan lucht. Als het vrijkomt, stijgt het en zal het zich mengen met lucht. Onder een plafond of afdak kan waterstof zich ophopen en gevaarlijk hoge concentraties bereiken
- > Waterstof heeft een breed ontvlambaarheidsgebied. De onderste explosiegrens (LEL)¹ is 4 vol.% en de bovenste explosiegrens is 75 vol.%.
- > De ontstekingsenergie is afhankelijk van de waterstofconcentratie. Bij 30 vol.% is de ontstekingsenergie zeer laag.
- > Waterstof is geurloos en kleurloos en waterstofvlammen zijn slecht zichtbaar. Daardoor kunnen waterstoflekken of -branden niet goed visueel worden waargenomen. Lekken van systemen waarbij waterstof onder hoge druk is opgeslagen, zijn wel goed hoorbaar.

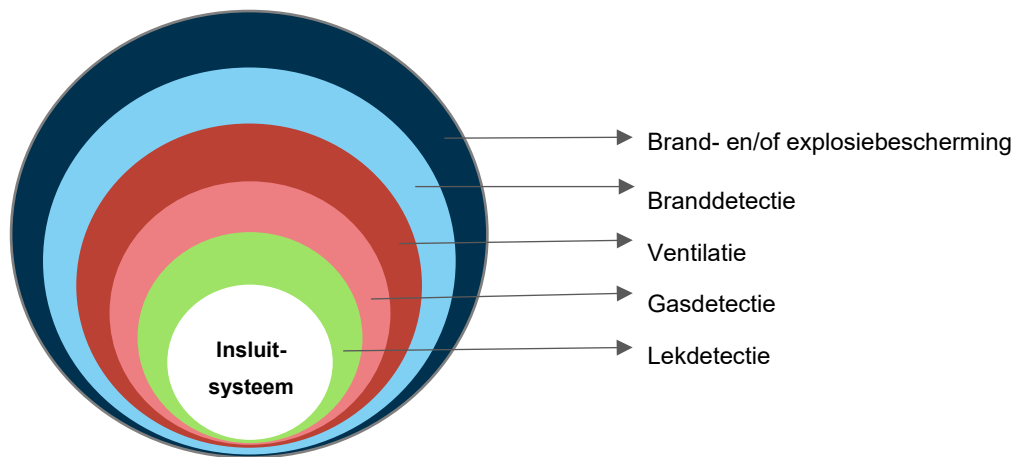
De onderste explosiegrens van waterstof is 4 vol.%. Als 60 gram waterstof vrijkomt in een ruimte van 15 m^3 ($2 \times 3 \times 2,5\text{ m}$), wordt deze grens overschreden en is ontsteking van waterstof mogelijk. Een gram waterstof heeft een volume van 11,9 liter. De waterstofconcentratie is dan:

$$(60 \times 11,9) / (15.000) \times 100\% = 4,8\text{ vol.\%}$$

1.2 Maatregelen

Bij het gebruik van waterstof bestaat de kans op een brand of een explosie; het nemen van maatregelen is dus noodzakelijk. Dat kan op verschillende manieren, zie Figuur 1.1. Insluiting zorgt er (uiteraard) voor dat uitstroming wordt voorkomen. Met detectie in het waterstof bevattende systeem kan een lek vroegtijdig worden opgespoord, bijvoorbeeld door het monitoren van de druk. Mocht er toch sprake zijn van een waterstoflek, dan kan in de directe omgeving hiervan waterstof worden gedetecteerd. Als dit tijds gebeurt, kan de waterstofconcentratie onder de LEL worden gehouden door het ventilatiesysteem te activeren. Mocht er desondanks een brand of explosie ontstaan, dan kunnen brand- en/of explosiebeschermende maatregelen de gevolgen beperkt houden

¹ LEL = lower explosion limit. Deze term is feitelijk niet juist, omdat waterstof bij 4 vol.% weliswaar ontbrandt, maar niet explodeert. Een betere term is 'laagste ontvlambaarheidslimiet (LFL)', maar de afkorting LEL is ingeburgerd bij hulpverleningsdiensten en daarom ook aangehouden in dit rapport



Figuur 1.1 Beschermende barrières bij het ongewenst uitstromen van waterstof (Bron: (Murphy, 2023))

Dit rapport gaat in op twee veel voorkomende maatregelen die de gevolgen van het vrijkomen van waterstof tot een minimum moeten beperken, namelijk gasdetectie en ventilatie.

1.3 Verspreiding

Zowel voor het detecteren van waterstof als voor het ventileren van ruimtes waar waterstof aanwezig kan zijn, is het belangrijk te weten hoe waterstof zich verspreidt als het vrijkomt. Dit heeft namelijk invloed op de plaatsbepaling van waterstofdetectoren en op het ontwerp van ventilatiesystemen.

Bij uitstroom van waterstof, zal waterstof zich vooral verspreiden als gevolg van de impuls die het meekrijgt bij de uitstroming en als gevolg van het stijgend vermogen. Verspreiding van waterstof als gevolg van diffusie, is een langzamer proces en vindt plaats op basis van concentratieverschillen. Waterstof heeft ten opzichte van andere gassen een hoge diffusiesnelheid en zal zich in de open lucht daarom sneller verspreiden (Spoelstra, 2020).

In een besloten ruimte zal waterstof zich ophopen onder plafonds en daken en daar gevaarlijke concentraties kunnen bereiken, met een kans op explosie tot gevolg. Dergelijke waterstoflagen kennen 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 (stratificatie). Factoren zoals de snelheid waarmee waterstof uitstroomt en de aanwezigheid van obstakels beïnvloeden het verspreidingsgedrag van waterstof. Een verdere toelichting hierop staat beschreven in NIPV-rapport *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte* (Spoelstra, 2020).

Als waterstof vrijkomt in een besloten ruimte, bestaat de kans dat het ontsteekt en explodeert. Daarom is het raadzaam waterstof zoveel mogelijk buiten op te slaan en te gebruiken. Waterstof stijgt in de open lucht op en wordt snel verdund, waardoor de risico's lager zullen zijn dan in een besloten ruimte.² Als waterstofinstallaties alsnog in besloten ruimtes worden geplaatst, moet rekening worden gehouden met de volgende aspecten:

² Hoewel mechanische ventilatie voornamelijk binnen wordt toegepast, kan het ook worden toegepast in situaties in de open lucht als daar sprake is van beperkte of belemmerde luchtverplaatsing.

- > In grotere ruimtes worden gevaarlijke waterstofconcentraties minder snel bereikt.
- > Een ruimte met open zijanten wordt beschouwd als een buitenruimte, als er sprake is van vrije doorgang van lucht door alle delen van die ruimte (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020).
- > Als in een open ruimte gebruikgemaakt wordt van natuurlijke ventilatie, moet er rekening mee worden gehouden dat de windsnelheid ter plaatse lager kan zijn dan op 10 meter hoogte (de hoogte waarop standaard de windsnelheid wordt bepaald). Gebouwen, bomen en obstakels als leidingen en apparatuur beïnvloeden de windsnelheid (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020).

2 Ventilatie van waterstof

In dit hoofdstuk komen eerst het doel en de verschillende vormen van ventilatie aan bod. Daarna wordt ingegaan op het kwantificeren van ventilatie en het ontwerp van ventilatiesystemen. Vervolgens komt de relevante regelgeving in Nederland aan de orde. Het hoofdstuk sluit af met een samenvatting.

2.1 Doel van ventilatie

Het onbedoeld vrijkomen van waterstof in besloten ruimtes wordt als een groot veiligheidsrisico beschouwd, omdat waterstof zich kan ophopen en met lucht een ontvlambaar en mogelijk explosief mengsel vormen, zoals eerder beschreven. Ontsteking van dit waterstof kan tot een explosie leiden met mogelijk schade en slachtoffers tot gevolg.³ Ventilatie is een van de belangrijkste maatregelen om te voorkomen dat de onderste explosiegrens (LEL) wordt bereikt (HySafe, 2009).

Ventilatie is het verplaatsen en vervangen van lucht door verse lucht, waarbij verse lucht wordt aangevoerd en naar binnen wordt gebracht (HySafe, 2009). De luchtstromingen zorgen ervoor dat waterstof met lucht wordt vermengd, met als resultaat dat (Fuster et al., 2017):

- > waterstof zich niet ophoopt doordat het uit een ruimte wordt weggeblazen
- > waterstof verdund wordt, waardoor de waterstofconcentratie afneemt en het volume van de ontvlambare wolk kleiner wordt
- > de tijdsduur dat een ontvlambare wolk aanwezig is, beperkt wordt
- > er geen verstikkende atmosfeer ontstaat.

Bij woningen is het doel van natuurlijke ventilatie om een gezond binnenmilieu te krijgen en te houden. Door natuurlijke ventilatie wordt vochtophoping voorkomen, wordt de temperatuur gereguleerd en het aandeel CO₂ in de lucht laag gehouden. Natuurlijke ventilatie wordt bereikt door ventilatie-roosters of door een raam of een deur open te zetten. Natuurlijke ventilatie moet niet verward worden met infiltratie (tocht). Bij infiltratie komen kleine hoeveelheden lucht een ruimte binnen via naden, kieren en andere kleine openingen.

2.2 Vormen van ventilatie

Het ventileren van besloten ruimtes kan op diverse manieren gebeuren. De ventilatiesystemen worden aangeduid als natuurlijke ventilatie (type A) en mechanische ventilatie (type B, type C en type D). Deze paragraaf beschrijft beide ventilatievormen.

³ Het snel vrijkomen van waterstof uit een drukcilinder kan van zichzelf ook tot overdrukeffecten leiden, vooral als de ruimte en de ventilatieopeningen klein zijn (Jallais et al., 2015).

2.2.1 Natuurlijke ventilatie

Bij natuurlijke ventilatie wordt gebruikgemaakt van natuurlijke luchtstromen om lucht te verplaatsen via roosters of ramen. Het gaat hierbij om luchtstromen die het gevolg zijn van druk- of temperatuurverschillen, waardoor respectievelijk wind en thermische trek ontstaan. Zowel de grootte van de ventilatieopeningen als de afstand daartussen beïnvloeden de mate van natuurlijke ventilatie. Natuurlijke ventilatie is een passieve vorm van ventileren, omdat de mate van ventileren afhankelijk is van de weersomstandigheden (Prasad et al., 2010). Natuurlijke ventilatie wordt ook type A ventilatie genoemd (RvO, 2014).

Een manier om natuurlijke ventilatie toe te passen is het plaatsen van ontluchtingsopeningen in de ruimte waar waterstof zich kan ophopen. Bij containers met waterstofapparatuur wordt soms het plafond van de container losgemaakt van de wanden en enkele centimeters hoger geplaatst, zodat het lijkt te zweven. Tussen de wanden en het plafond ontstaat een opening die zich uitstrekt langs de gehele omtrek van de container (Pannekoek, 2024).

Natuurlijke ventilatie is goedkoop, vergt weinig onderhoud en hoeft niet aan- of uitgeschakeld te worden. Het nadeel is echter dat natuurlijke ventilatie afhankelijk is van de weersomstandigheden. Bij het ontwerp van een systeem dat gebaseerd is op natuurlijke ventilatie, moet rekening worden gehouden met mogelijk niet ideale weersomstandigheden. Ook dan moet immers voldoende ventilatie gewaarborgd zijn (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020).

Door natuurlijke ventilatie kan minder lucht worden verplaatst dan met mechanische ventilatie. Hierdoor wordt een eventuele waterstofwolk minder snel verdund, zodat hogere waterstofconcentraties bereikt worden en het langer duurt voordat een veilige waterstofconcentratie wordt behaald (Lee et al., 2022; Prasad et al., 2010; Zhao et al., 2024). Een voldoende hoog ventilatiedebiet kan met natuurlijke ventilatie dus niet gegarandeerd worden.

De manier waarop de weersomstandigheden (wind en temperatuur) natuurlijke ventilatie beïnvloeden, wordt hieronder beschreven.

Wind

Ventilatie in een ruimte waar waterstof aanwezig kan zijn, wordt bevorderd door de inlaatopening laag in de ruimte te plaatsen en de uitlaatopening hoog. Dit bevordert de luchtstroming, waardoor waterstof makkelijker wordt afgevoerd (meer hierover in paragraaf 2.4.4). Wind die tegen de inlaatopening aanwaait, heeft een positieve invloed op de luchtverplaatsing in de ruimte. In Nederland waait de wind meestal uit zuidwestelijke richting. Daar kan bij het plaatsen van de ventilatieopeningen rekening mee worden gehouden (RIVM, 2021). Als de wind echter draait of in de tegenovergestelde richting waait, kan de ventilatie zelfs verslechteren (Prasad et al., 2010). Bij hoge windsnelheden veroorzaakt de wind turbulentie in de besloten ruimte die de verplaatsing van waterstof naar buiten weer kan bevorderen (Brennan et al., 2011).

Temperatuur

Warme lucht heeft een lagere dichtheid dan koude lucht. Dit verschil in dichtheid zorgt ervoor dat lucht gaat bewegen. Als de temperatuur in een ruimte hoger is dan buiten, zal lucht van buiten naar binnen stromen, en als deze lucht boven de ruimte kan verlaten, ontstaat een luchtstroming ('thermische trek'). Hoe groter het temperatuurverschil, hoe sterker de luchtstroming. De luchtstroming kan ook van binnen naar buiten gaan als het buiten warmer is dan binnen (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020).

2.2.2 Mechanische ventilatie

Bij mechanische ventilatie wordt een kunstmatige luchtstroom gecreëerd. Deze vorm van ventilatie wordt ook wel kunstmatige, actieve of geforceerde ventilatie genoemd. Mechanische ventilatie kent diverse vormen die hieronder worden toegelicht.

Tabel 2.1 De diverse soorten mechanische ventilatie

Type	Beschrijving
Overdruk (Type B)	Bij type B ventilatie worden ventilatoren gebruikt voor de toevoer van lucht. Hierdoor ontstaat een overdruk in de ruimte, waardoor de afvoer van lucht naar buiten op een natuurlijke manier kan gebeuren, bijvoorbeeld via ventilatieroosters.
Onderdruk (Type C)	Bij type C ventilatie wordt lucht uit een ruimte gezogen door afzuigventilatoren. Hierdoor ontstaat in de ruimte een onderdruk. De toevoer van lucht gebeurt op een natuurlijke manier, bijvoorbeeld via ventilatieroosters.
Balansventilatie (Type D)	Bij type D ventilatie worden de toevoer en afvoer van lucht mechanisch gestuurd (balansventilatie), waardoor er in de ruimte geen onderdruk of overdruk ontstaat.

In tegenstelling tot natuurlijke ventilatie, kan mechanische ventilatie gereguleerd of helemaal uitgeschakeld worden. Daardoor is het mogelijk continu te ventileren of te ventileren op momenten dat dat nodig is, bijvoorbeeld na het detecteren van waterstof (noodventilatie).

Met mechanische ventilatie kunnen in een kort tijdsbestek grote hoeveelheden lucht verplaatst worden. Het is aan de gebruiker om te bepalen of mechanische ventilatie permanent aan moet staan of dat het systeem geactiveerd of versterkt moet worden als waterstof gedetecteerd wordt.

Voorkomen moet worden dat het ventilatiesysteem een ontstekingsbron is; ventilatoren moeten daarom explosie veilig zijn. Systemen die voor mechanische ventilatie zorgen, moeten gecontroleerd en onderhouden worden, waardoor mechanische ventilatie duurder is in gebruik dan natuurlijke ventilatie. Een ventilatiesysteem kan niet of onvoldoende functioneren, bijvoorbeeld door uitval van stroom, door falen op aanvraag ('failure on demand') of door een niet goed uitgedacht ontwerp (Fuster et al., 2017).

2.3 Kwantificeren van ventilatie

Het is belangrijk om te begrijpen hoe ventilatie gekwantificeerd wordt. Dit gebeurt aan de hand van twee verschillende parameters, te weten de ventilatiecapaciteit en het ventilatievoud. Deze parameters worden in deze paragraaf toegelicht.

2.3.1 Ventilatiecapaciteit

De ventilatiecapaciteit (VC) is het volume van de aangezogen of uitgeblazen lucht per tijdseenheid, bijvoorbeeld in m³/h of cm³/s. Een ruwe schatting van de benodigde ventilatiecapaciteit kan berekend worden met formule 1 (NPR 7910-1, 2015):

$$VC = Q \times \frac{100}{LEL} \times \frac{100}{k} \quad (1)$$

Q is het verwachte lekdebiet (m^3/h), LEL de onderste explosiegrens (vol.%) en k is een veiligheidsfactor (percentage van de LEL). Voor deze factor wordt een waarde van 10 aangehouden, omdat de ventilatiecapaciteit dan als voldoende wordt beschouwd. Dit wil zeggen dat bij het verwachte lekdebiet de waterstofconcentratie in een ruimte niet hoger zal zijn dan 10 % van de LEL, te weten 0,4 vol.% (NPR 7910-1, 2015).

Voorbeeld

Bij een lekkage komt 0.1 g/s waterstof vrij. Met behulp van de dichtheid van waterstof kan dit massadebiet omgerekend worden naar een volumedebiet: 0.1 g/s is ongeveer gelijk aan $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Om de concentratie van waterstof onder de 10% LEL te houden, moet de ventilatiecapaciteit zo'n 1.000 m^3 per uur zijn:

$$VC = 4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{100}{4} \times \frac{100}{10} \approx 1.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Toelichting:

De formule gaat uit van een homogeen verdunde waterstofwolk in een ruimte. Als een ruimte gevuld is met 100 vol.% waterstof en deze wolk door middel van ventilatie verdund moet worden naar 4 vol.% (LEL), dan moet de waterstofwolk een factor 25 verdund worden. In werkelijkheid zal er geen sprake zijn van een homogeen verdunde waterstofwolk en is het gewenst om een veilige marge aan te houden. Daarom wordt een veiligheidsfactor van 10 toegepast, wat ervoor zorgt dat de wolk een factor 250 verdund moet worden. Bij een lek van $4 \text{ m}^3/\text{h}$ is de benodigde ventilatiecapaciteit dus $250 \times 4 = 1.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.3.2 Ventilatievoud

Het ventilatievoud (VV) is het aantal keer per uur dat een ruimte volledig van verse lucht wordt voorzien. Dit wordt ook wel ACH ('air changes per hour') genoemd. Het ventilatievoud geldt voor de hele ruimte en gaat uit van een homogeen verdunde waterstofwolk. Er wordt dus geen rekening gehouden met 'pockets' (plekken waar waterstof zich kan ophopen, omdat er minder lucht stroomt), obstakels en ophoping van waterstof onder een plafond.

Het ventilatievoud is gerelateerd aan de ventilatiecapaciteit via de volgende formule (NPR 7910-1, 2015):

$$VV = \frac{VC}{V} \quad (2)$$

Hierin is VC de ventilatiecapaciteit (m^3/h), V het volume van de ruimte (m^3) en VV het ventilatievoud ($1/\text{h}$). Om een bepaald ventilatievoud te halen, hebben grote ruimtes een grotere ventilatiecapaciteit nodig dan kleine ruimtes.

Voorbeeld

Het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) geeft aan dat woonruimtes en kantoren voorzien moeten worden van verse lucht en dat de ventilatiecapaciteit minimaal $0,9 \text{ dm}^3$ lucht per seconde moet zijn per vierkante meter vloeroppervlak (Bbl, 2024). Dit komt overeen met $3,24 \text{ m}^3$ lucht per uur per vierkante meter. Een ruimte van 10 m^2 heeft per uur dan $32,4 \text{ m}^3$ lucht nodig. Als de ruimte een inhoud heeft van 25 m^3 , is het ventilatievoud (ACH) gelijk aan 1,3. In formulevorm:

$$\begin{aligned} VV = \frac{VC}{V} &= \frac{\text{vent. capaciteit per m}^2 \text{ vloeroppervlakte} \times \text{vloeroppervlakte}}{\text{volume ruimte}} \\ &= \frac{3,24 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \times 10 \text{ m}^2}{25 \text{ m}^3} \approx 1,3 / \text{h} \end{aligned}$$

Een ventilatievoud van 1,3 ($ACH = 1,3$) houdt in dat in deze ruimte het vervangen van lucht voor verse lucht ongeveer 46 minuten duurt ($60 \text{ min} / 1,3$).

2.4 Ontwerp van een ventilatiesysteem

Bij het ontwerpen van een ventilatiesysteem voor een ruimte waar waterstof aanwezig is, moet rekening gehouden worden met de ventilatie-eisen voor normale bedrijfsvoering en voor noodsituaties (het onbedoeld vrijkomen van waterstof). In dit hoofdstuk wordt aangenomen dat onder normale bedrijfsvoering de ruimte mechanisch geventileerd wordt volgens de eisen die de ATEX-regelgeving voorschrijft (zie paragraaf 2.4.1). De ventilatie die nodig is in noodsituaties, moet bepaald worden aan de hand van de formules die beschreven staan in paragraaf 2.3.

2.4.1 Ventilatie tijdens bedrijfsvoering

Tijdens bedrijfsvoering kan er sprake zijn van kleine waterstoflekjes waarvoor het mechanische ventilatiesysteem geen extra capaciteit hoeft te leveren. In ruimtes waar het risico op kleine lekjes bestaat, zal met behulp van de standaard ventilatiecapaciteit geprobeerd worden de waterstofconcentratie onder de 0,4 vol.% of 1 vol.% te houden. Dit komt overeen met respectievelijk 10 % ('voldoende capaciteit') en 25 % ('gematigde capaciteit') van de onderste explosiegrens (LEL) van waterstof, kortweg 10 % LEL en 25 % LEL (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020; NPR 7910-1, 2015). Voor grote waterstoflekken is deze ventilatie niet toereikend en moet de ventilatiecapaciteit verhoogd worden (zie paragraaf 2.4.3).

Tabel 2.2 geeft de eisen voor het aan te houden ventilatievoud tijdens normale bedrijfsvoering. De ventilatievouden in NPR 7910 zijn gerelateerd aan de ATEX-zonering.

Tabel 2.2 Eisen aan ventilatievoud

Norm, richtlijn	Waarde	Bron
NPR 7910	Geen ventilatie: < 1 Gematigde ventilatiecapaciteit: 1 – 5 Voldoende ventilatiecapaciteit: > 5	(NPR 7910-1, 2015)
PGS 36	> 4 tenzij waterstofconcentratie nooit groter is dan 0,4 vol.%.	(PGS 36, 2023)
Parkeergarage	> 10*	(Lach & Gaathaug, 2021)
ANSI/FM	Voldoende ventilatie: > 6	(FM Approvals LLC & Underwriters Laboratories Inc, 2020)

*aanbevolen ventilatievoud

ATEX-zones

Om ontsteking van vrijkomend waterstof te voorkomen, wordt de directe omgeving van een waterstofbevattend systeem in zones verdeeld. Apparatuur die zich in die zones bevindt, moet voldoen aan regels die passend zijn voor de desbetreffende zone. In Europa worden hiervoor de regels van de ATEX ('ATmosphères Explosibles') gebruikt.

Zone 2 is het gebied dat bij waterstofinstallaties het meest van toepassing zal zijn ('Ex-zone 2').⁴ Waterstof bevindt zich onder normale omstandigheden in een vat of een leiding en zal alleen bij een incident onbedoeld vrijkomen. Volgens de ATEX-regels is de kans gering dat een explosief waterstof-

⁴ Dit is vergelijkbaar met 'Class 1 / Division 2', de indeling volgens Amerikaanse regelgeving.

luchtmengsel aanwezig is. Ook zal een dergelijk mengsel maar kort bestaan, namelijk minder dan 0,1 % van de bedrijfsduur van een installatie of van de duur van een activiteit. In deze zone worden de minst strenge eisen gesteld aan apparatuur, omdat de kans op de aanwezigheid van een explosieve atmosfeer zeer klein is en bij normaal bedrijf nauwelijks voorkomt (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020).

Bij het ontwerpen van een ventilatiesysteem voor een ruimte of locatie waar waterstof vrij kan komen, is het belangrijk om te weten of waterstofdetectie aanwezig is. Als dit het geval is, zal de ventilatiecapaciteit pas verhoogd worden als waterstof gedetecteerd wordt. Als waterstofdetectie niet aanwezig is, zal de benodigde ventilatiecapaciteit continu gerealiseerd moeten worden (Zevenbergen, 2024). In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op waterstofdetectie.

De aanwezigheid van waterstofdetectie is niet de enige factor die invloed heeft op het ontwerp van een ventilatiesysteem. De volgende onderwerpen bepalen mede hoeveel en hoe lang geventileerd moet worden als er onverhoopt waterstof vrijkomt (Kim & Hwang, 2024):

- > uitstroomscenario's
- > de benodigde hoeveelheid ventilatie
- > ventilatieopeningen
- > obstakels
- > de stroomrichting van ventilatie
- > eisen gesteld aan het ventilatiesysteem.

Een ventilatiesysteem moet voor iedere situatie ontworpen worden, maar dat is niet eenvoudig. Luchtstromingen en de verspreiding van waterstof kunnen in beeld gebracht worden met behulp van rookproeven (NEN-EN-IEC 60079-29-2, 2015) of met behulp van computermodellen zoals CFD (Computational Fluid Dynamics).

2.4.2 Uitstroomscenario's

Een belangrijke factor bij het ontwerpen van een ventilatiesysteem is de hoeveelheid waterstof die vrijkomt: bij een klein lek hoeft immers minder geventileerd te worden dan bij een groot lek. In grotere ruimtes worden gevaarlijke waterstofconcentraties minder snel bereikt, omdat de vrijkomende waterstofwolk in een groter volume lucht wordt verdund (Kim & Hwang, 2024; Lach & Gaathaug, 2021). Daarom is het belangrijk om in beeld te krijgen welke scenario's mogelijk plaats kunnen vinden en representatief zijn, en hoeveel waterstof hierbij uitstroomt.

Het staat de gebruiker vrij om bij het ontwerp van het ventilatiesysteem te bepalen van welke uitstroomscenario's wordt uitgegaan. PGS 36 heeft het over 'voorzienbare incidenten' en NPR 7910 over 'verwachte lekdebieten' (NPR 7910-1, 2015). Waterstof kan bijvoorbeeld lekken op aansluitpunten, maar kan ook vrijkomen door breuk van een leiding. Uit veiligheidsoverwegingen is het verstandig om uit te gaan van een worst-case-scenario, maar of dit in de praktijk ook gebeurt, is nog maar de vraag, gezien de hogere kosten die hiermee gemoeid zijn. Als men uitgaat van kleine lekkages als meest waarschijnlijke scenario, zal het ventilatiesysteem voldoende zijn om escalatie bij kleine lekkages te voorkomen, maar onvoldoende zijn bij grote lekkages (Zalosh et al., 2021).

2.4.3 Benodigde hoeveelheid ventilatie

In Tabel 2.3 staan de eisen voor de ventilatiecapaciteit in noodsituaties, dat wil zeggen als een waterstoflek gedetecteerd is en de capaciteit van het ventilatiesysteem verhoogd wordt.

Tabel 2.3 Eisen aan ventilatiecapaciteit

Norm, richtlijn	Waarde	Bron
NEN 60079 10-1	Te bepalen aan de hand van formule 1	(NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020)
NFPA	> 5,1 liter/(s·m ²)	(NFPA, 2023)

Ventilatie zorgt ervoor dat het volume van een waterstofwolk tijdens een lekkage beperkt blijft, waardoor de hoge waterstofconcentratie in een kleiner gebied aanwezig is (Y. Xie et al., 2024). Het zorgt er ook voor dat de aanwezigheid van de waterstofwolk in een besloten ruimte korter wordt (Lach & Gaathaug, 2021; Kim & Hwang, 2024). Ventilatie geeft dus niet de garantie dat er geen hoge waterstofconcentraties in een ruimte meer aanwezig zullen zijn. In de buurt van een waterstoflek of in een pocket waar waterstof zich heeft opgehoopt en afgeschermd zit van ventilatie, kunnen waterstofconcentraties gevaarlijk hoog zijn. Om dergelijke situaties te voorkomen, is lokale ventilatie nodig, dat wil zeggen gerichte ventilatie bij de plek waar waterstof zou kunnen ontsnappen (Lach & Gaathaug, 2021). Waterstof wordt dan wel verdund, maar niet noodzakelijkerwijs afgevoerd (H. Xie et al., 2015).

2.4.4 Ventilatieopeningen

De aanwezigheid van een of meerdere ventilatieopeningen heeft grote invloed op de effectiviteit van ventilatie. Bepalend hierbij is het aantal ventilatieopeningen, de locatie van de ventilatieopeningen en de grootte en oriëntatie ervan.

Aantal

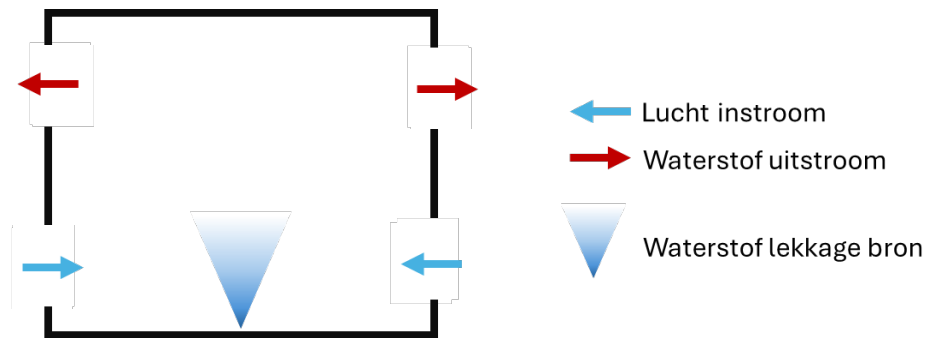
Als in een ruimte één ventilatieopening aanwezig is, moet zowel de instroom als de uitstroom van lucht via dezelfde opening plaatsvinden. De effectiviteit van ventilatie vermindert hierdoor drastisch, zodat de aanwezigheid van slechts één ventilatieopening af te raden is (Swain & Swain, 1996).

Locatie

Ventilatie zorgt voor luchtstromingen in een ruimte. Hoe groter deze luchtstromingen zijn, hoe effectiever het ventileren van waterstofwolken is. De locatie van de ventilatieopeningen speelt hierin een belangrijke rol:

- > Ventilatieopeningen voor lichte gassen als waterstof bevinden zich aan de bovenkant van een ruimte. Openingen in een muur hebben hierbij de voorkeur boven openingen in een dak (Fuster et al., 2017).
- > Luchtstromingen worden bevorderd als naast ventilatieopeningen hoog in een ruimte ook ventilatieopeningen laag in een ruimte aanwezig zijn, in de buurt van de vloer (Lee et al., 2022). Hierbij fungeert de onderste opening als luchtinlaat en de bovenste opening als luchtuitlaat.
- > Hoe groter het hoogteverschil tussen de ventilatieopeningen, hoe meer lucht verplaatst kan worden en hoe effectiever waterstof verdreven kan worden (Prasad et al., 2010).
- > Ventilatieopeningen boven in een ruimte hebben meer invloed op de effectiviteit van ventilatie dan ventilatieopeningen onder in een ruimte. Als de uitlaatopening zich dicht bij de lekkagebron bevindt, kan waterstof uit de ruimte worden verwijderd zonder zich eerst over de ruimte te verdelen. Hierbij wordt gebruikgemaakt van het stijgend vermogen van waterstof (Swain & Swain, 1996).

- > De luchtcirculatie in een ruimte verbetert als ventilatieopeningen aan weerszijden van de ruimte worden geplaatst. De meest ideale situatie is die waarbij ventilatieopeningen zowel aan de boven- als aan de onderkant van twee tegenover elkaar staande muren worden aangebracht, dus vier openingen in totaal (Lee et al., 2022). Zie Figuur 2.1. De wind bevordert natuurlijke ventilatie als ventilatieopeningen in alle zijden van een ruimte aanwezig zijn, omdat natuurlijke ventilatie dan minder gevoelig is voor de windrichting (Fuster et al., 2017).



Figuur 2.1 De optimale configuratie voor het plaatsen van ventilatieopeningen in een ruimte waar mogelijk waterstof kan lekken (Gebaseerd op (Jallais et al., 2015; Lee et al., 2022))

Grootte ventilatieopening

De grootte van ventilatieopeningen speelt op de volgende manieren een rol in de effectiviteit van ventilatie:

- > Meerdere kleine ventilatieopeningen samen in een muur hebben in vergelijking met één ventilatieopening met hetzelfde oppervlak een groter ventilatiecapaciteit (Fuster et al., 2017). Hetzelfde geldt voor ventilatieopeningen in een dak (Matsuura et al., 2012).
- > De oppervlaktes van de verschillende ventilatieopeningen moeten onderling in verhouding zijn, zodat de instroom van lucht in balans is met de uitstroom. De uitstroom van lucht moet namelijk niet worden belemmerd worden door onvoldoende luchtinstroom (Swain & Swain, 1996).
- > Een groot ventilatieoppervlak is beter dan een klein ventilatieoppervlak; dit geldt zowel voor mechanische ventilatie als voor natuurlijke ventilatie. De effectiviteit van ventilatie neemt echter niet evenredig toe met de grootte van het ventilatieoppervlak (Lee et al., 2022; Swain & Swain, 1996).

Oriëntatie

Ventilatieopeningen die hoger zijn dan dat ze breed zijn ('portret-stand') zijn effectiever dan openingen die breder zijn dan dat ze hoog zijn ('landschap-stand') (Fuster et al., 2017; Zhao et al., 2024).

2.4.5 Obstakels

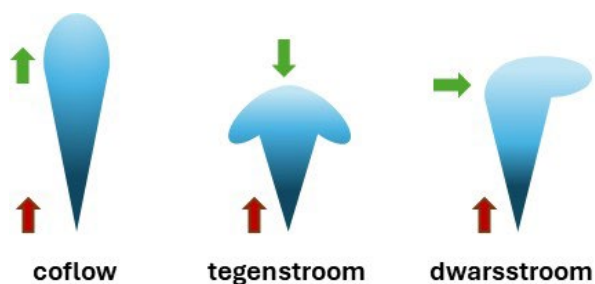
Obstakels in een ruimte beïnvloeden de effectiviteit van de ventilatie. Voorbeelden van obstakels zijn apparatuur, kasten, voertuigen, stoelen, borden en lampen aan muren en plafonds enzovoort. Obstakels zorgen ervoor dat lucht slechter of zelfs niet wordt verplaatst, zodat delen van een ruimte slecht geventileerd worden en waterstof zich lokaal kan ophopen (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020). Sommige obstakels zijn niet te vermijden, maar andere moeten zoveel mogelijk voorkomen worden (NPR-ISO/TR 15916, 2023; Zalosh et al., 2021).

Obstakels veranderen ook het verspreidingsgedrag van waterstof. Bij een klein waterstoflek zorgen ze namelijk voor meer turbulentie, waardoor waterstof beter gemengd wordt (Prasad et al., 2010). Bij een groot waterstoflek verstoren obstakels de uitstroming, zodat waterstof zich juist minder goed kan mengen met de lucht (De Stefano et al., 2019).

Soms kan het nodig zijn om een ventilatieopening te beschermen tegen weersinvloeden (dichtvriezen) of om te voorkomen dat dieren via de opening in de ruimte kunnen komen. Het plaatsen van een kap of van een rooster daartoe leidt wel tot minder effectieve ventilatie (Witte, 2023). Bij het ontwerp van het ventilatiesysteem en het bepalen van de benodigde ventilatiecapaciteit moet hiermee rekening worden gehouden (Fuster et al., 2017; NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020).

2.4.6 Stroomrichting van ventilatie

De stroomrichting van lucht ten opzichte van de stroomrichting van waterstof beïnvloedt de effectiviteit van (lokale) ventilatie. Lucht en waterstof kunnen zich in dezelfde richting bewegen ('co-flow'), in tegengestelde richting bewegen ('counter-flow') of loodrecht op elkaar staan ('cross-flow'), zie Figuur 2.2. Cross-flow-ventilatie is het effectiefst, gevolgd door counter-flow-ventilatie (Grune et al., 2021). Hoe meer de luchtstroom gericht is op de plaats van een mogelijk lek, hoe beter de verdunning van waterstof zal zijn (H. Xie et al., 2015).



Figuur 2.2 Richting van lokale ventilatiestromen (groene pijlen) ten opzichte van de uitstroomrichting van een waterstoflek (rode pijlen) (Gebaseerd op (Grune et al., 2021))

2.4.7 Eisen aan een ventilatiesysteem

Bij het ontwerp van een ventilatiesysteem moet rekening gehouden worden met een aantal randvoorwaarden die ervoor zorgen dat het systeem veilig en gegarandeerd functioneert:

- > Het ventilatiesysteem mag geen ontstekingsbron zijn waardoor waterstof kan ontsteken. Dit betekent dat het systeem geen vonken mag veroorzaken door elektrische stroom of mechanische wrijving, en dat er geen hete oppervlaktes mogen zijn. Ventilatoren, afzuigkappen en andere onderdelen van het ventilatiesysteem moeten daarom geschikt zijn voor explosieve atmosferen (NEN-EN 14986, 2024).
- > Het ventilatiesysteem moet altijd beschikbaar is, dat wil zeggen altijd aan of op stand-by staan (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020).
- > Het ventilatiesysteem moet regelmatig onderhouden worden, waarbij de ventilatiecapaciteit wordt gecontroleerd (NEN-EN-IEC 60079-13, 2017).
- > De stroomvoorziening van het ventilatiesysteem moet onafhankelijk zijn van die van de geventileerde ruimte (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020; Zalosh et al., 2021)
- > Bij detectie van een waterstoflek moet het ventilatiesysteem op maximale capaciteit worden gezet en moet de waterstoftoevoer worden afgesloten als dat mogelijk is (Kim & Hwang, 2024).

- > Het ventilatiesysteem moet ook tijdens en na het afsluiten van de waterstoftoevoer blijven draaien om er zeker van te zijn dat alle waterstof uit de ruimte wordt verwijderd (NPR-ISO/TR 15916, 2023; Zalosh et al., 2021).

2.5 Regelgeving in Nederland

De eisen die aan ventilatie in het algemeen en waterstofventilatie in het bijzonder gesteld worden, staan in diverse normen en richtlijnen beschreven. De regelgeving is vooral gericht op kleine lekkages, omdat dat de meest voorkomende uitstroomscenario's zijn. De gestelde eisen zijn dan ook de minimaal aan te houden eisen voor ventilatie (NPR 7910-1, 2015) (NEN-EN-IEC 60079-10-1, 2020). De belangrijkste normen en richtlijnen op het gebied van ventilatie staan hieronder samengevat.

NEN-EN-IEC-60079 serie

De NEN 60079-serie bevat normen voor het veilig ontwerpen van installaties met brandbare en explosieve gassen zoals waterstof. Deel 10-1 van NEN 60079 gaat in op het voorkomen van ontsteking door het toepassen van een gevarenzone-indeling. Informatie over de gevarenzone-indeling is te vinden in bijlage 1. Hoofdstuk 7 van deel 10-1 beschrijft eisen voor ventilatie.

NPR 7910-1 Gevarenzone-indeling met betrekking tot explosiegevaar

De Nederlandse Praktijkrichtlijn (NPR) 7910-1 ondersteunt de NEN 60079-serie en gaat dieper in op het toepassen van een gevarenzone-indeling. Hoofdstuk 8 van de richtlijn gaat in op ventilatie.

NEN-EN 14986:2024: Ontwerp van ventilatoren voor potentieel explosieve atmosferen

NEN-EN 14986 richt zich op het veilig toepassen van ventilatoren in explosiegevaarlijke omgevingen. De norm gaat vooral in op de technische eisen aan ventilatoren, zoals materiaalgebruik, gasdichtheid en weerstand tegen trillen.

ATEX-Regelgeving

ATEX staat voor 'Atmosphères Explosibles' en is een Europese richtlijn (2014/34/EU) over werken in en gebruikmaken van apparatuur in een omgeving waar sprake kan zijn van ontploffingsgevaar. Er zijn twee ATEX-richtlijnen, namelijk ATEX 153 die bedoeld is voor werkgevers en over arbeidsveiligheid gaat, en ATEX 114 die bedoeld is voor fabrikanten en over productveiligheid gaat. Ventilatiesystemen die gebruikt worden in ruimtes waar waterstof vrij kan komen, vallen onder ATEX 114.

NEN-EN-ISO 80079-36/37: Niet-elektrische uitrusting voor gebruik in explosieve atmosferen

NEN-EN-ISO 80079 heeft betrekking op explosieve atmosferen. Delen 36 en 37 gaan specifiek over het gebruik van niet-elektrische apparatuur, die een ontstekingsbron kunnen zijn als gevolg van mechanische processen (vonken) of wrijving (warmte). Delen 36 en 37 geven basisprincipes en algemene eisen voor het ontwerpen en gebruiken van apparatuur in explosieve atmosferen.

PGS 36: Waterstof - Stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen

PGS 36 beschrijft in maatregel 26 de eisen aan de mechanische ventilatie van de stalling van motorvoertuigen en van de waterstofwerkplaats. Afwijken van de eisen is mogelijk als aangetoond kan worden dat met de 'van oorsprong aanwezige ventilatie' de waterstofconcentratie nooit boven de 10 % LEL komt.

2.6 Samenvatting

Ventilatie is het verplaatsen en vervangen van lucht door verse lucht en kan natuurlijk of mechanisch gerealiseerd worden. Bij natuurlijke ventilatie is de mate waarin een ruimte geventileerd wordt afhankelijk van de weersomstandigheden. Bij mechanische ventilatie is dat niet het geval.

Het ventileren van een ruimte waar waterstof vrij kan komen, gebeurt meestal met mechanische ventilatie. Hierdoor hoopt waterstof zich niet op, wordt de waterstofwolk verdund en nemen de omvang en de tijdsduur van de waterstofwolk af.

De mate van ventilatie wordt aangegeven met twee parameters, te weten de ventilatiecapaciteit en het ventilatievoud. De ventilatiecapaciteit is het volume van de aangezogen of uitgeblazen lucht per tijdseenheid, bijvoorbeeld in m³/h. Het ventilatievoud is het aantal keer per uur dat een ruimte volledig van verse lucht wordt voorzien. Het wordt ook wel ACH ('air changes per hour') genoemd.

Bij het ontwerpen van een ventilatiesysteem voor een ruimte waar waterstof aanwezig is, moet rekening gehouden worden met de ventilatie-eisen voor normale bedrijfsvoering en voor noodsituaties (het onbedoeld vrijkomen van waterstof).

In dit rapport wordt aangenomen dat bij normale bedrijfsvoering de ruimte mechanisch geventileerd wordt volgens de eisen die de ATEX-regelgeving voorschrijft. De gestelde eisen zijn dan de minimaal aan te houden eisen voor ventilatie. Bij voldoende ventilatiecapaciteit is het ventilatievoud > 5 en wordt de waterstofconcentratie onder de 10 % LEL gehouden. Bij gematigde capaciteit is het ventilatievoud 1-5 en wordt de waterstofconcentratie onder de 25 % LEL gehouden.

Voor het berekenen van het benodigde ventilatievoud en de ventilatiecapaciteit in noodsituaties moet bepaald worden welk lekscenario als representatief wordt beschouwd en wat het bijbehorende uitstroomdebiet is.

Bij het ontwerpen van een ventilatiesysteem moet rekening worden gehouden met factoren als de grootte, het aantal en de locatie van de ventilatieopeningen, de uitstroomrichting van mogelijke waterstoflekken en de aanwezigheid van obstakels. De stroomvoorziening van het ventilatiesysteem moet onafhankelijk zijn van die van de geventileerde ruimte en het ventilatiesysteem moet tijdens en na het afsluiten van de waterstoftoevoer blijven draaien om er zeker van te zijn dat alle waterstof uit de ruimte wordt verwijderd.

3 Detectie van waterstof

Waterstof is een licht ontvlambaar gas en bij het vrijkomen ervan kan ontsteking tot een explosie leiden, met alle gevolgen van dien. In standaarden en protocollen worden daarom maatregelen voorgeschreven die erop gericht zijn om mogelijke incidenten te voorkomen en te beperken. Een van de belangrijkste maatregelen om de veiligheid te borgen, is het detecteren van vrijgekomen waterstof voordat dit een explosief mengsel met lucht kan vormen (NEN-EN-IEC 60079-29-2, 2015).

Een detectiesysteem voor waterstof moet een waterstoflek kunnen detecteren, waarna het systeem vervolgacties kan ondernemen. Voorbeelden hiervan zijn het alarmeren van de gebruiker en deze van informatie voorzien of het activeren of bevorderen van ventilatie (Walsh & Kelsey, 2017). Waterstofdetectoren worden gebruikt bij installaties met brandstofcellen, bij mobiele en stationaire installaties en bij chemische processen en installaties (Hübert et al., 2014).

Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende manieren waarop waterstofgas gedetecteerd kan worden en geeft vuistregels voor het bepalen van de plaats waar waterstofdetectoren het beste aangebracht kunnen worden. Daarnaast wordt de kans op detectie van een waterstoflek besproken, en komt de relevante regelgeving aan bod, evenals ontwikkelingen op het gebied van waterstofdetectie. Het hoofdstuk sluit af met een samenvatting.

3.1 Detectoren en sensoren

In spreektaal worden de termen ‘detector’ en ‘sensor’ vaak door elkaar gebruikt. Toch is een detector niet hetzelfde als een sensor: een sensor is een instrument dat een fysische verandering meet en omzet in een elektrisch signaal. De sensor heeft de grootte van een vingerhoedje en bevindt zich in de detector. Het elektrische signaal dat de sensor genereert, wordt in de detector versterkt. De detector waarschuwt als het signaal van de sensor een bepaalde waarde bereikt, eventueel aangevuld met het in gang zetten van mitigerende maatregelen (Post et al., 2021; Rehman, 2023). Sensoren zijn gevoelige instrumenten en daarom ook gevoeliger voor uitval dan de elektronica van de detector zelf (Walsh & Kelsey, 2017). De verschillen tussen een sensor en een detector staan samengevat in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Verschillen tussen sensor en detector

Onderwerp	Sensor	Detector
Doel	Metten van een fysische grootte	Waarschuwen
Werking	Omzetten verandering van fysische grootte in een elektrisch signaal	In gang zetten van een actie op basis van een ingestelde (drempel)waarde van een elektrisch signaal

Onderwerp	Sensor	Detector
Toepassing	Breed, continue monitoring: industrie, auto's, elektronica	Specifiek: waar veiligheid ('safety') en beveiliging ('security') nodig zijn
Voorbeeld	Thermometer	Alarm als temperatuur te hoog wordt

3.2 Type detectoren

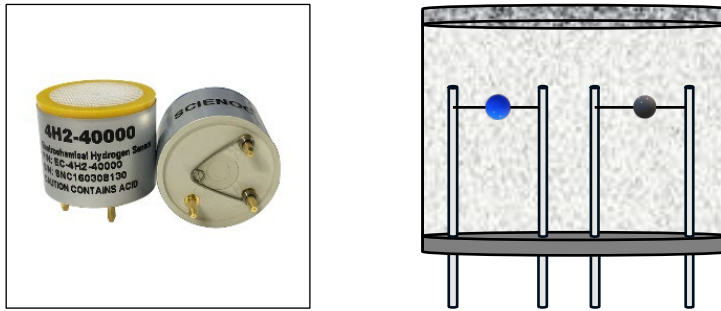
Waterstofdetectoren zijn grofweg in twee groepen in te delen, namelijk gasdetectoren en gebiedsdetectoren. Met gasdetectoren worden detectoren bedoeld die waterstof op een specifieke locatie meten en waarvoor het nodig is dat waterstof de sensor in de detector bereikt (puntdetectoren). Gasdetectoren detecteren waterstof op één punt en zijn geschikt voor kleine ruimtes, maar niet voor grote (buiten)ruimtes, tenzij er meerdere detectoren worden geplaatst (Post et al., 2021). Voor gebiedsdetectoren is het niet nodig dat waterstof bij de detector komt, aangezien zij waterstof op een andere manier waarnemen, bijvoorbeeld via ultrasoon geluid (zie paragraaf 3.2.2).

3.2.1 Gasdetectoren

Gasdetectoren zijn de meest gebruikte detectoren om waterstof kwantitatief te meten in een ruimte of in de open lucht. Er zijn veel soorten gasdetectoren. Bij de meeste gasdetectoren vindt bij de sensor een chemische reactie of een fysische interactie met waterstof plaats (Post et al., 2021). De keuze voor een type gasdetector wordt bepaald door factoren als gevoeligheid, nauwkeurigheid, selectiviteit, reactietijd, stabiliteit, onderhoud en kosten (Walsh & Kelsey, 2017). Deze factoren worden in paragraaf 3.3 besproken. Op de volgende pagina's wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste typen gassensoren en hun werking.

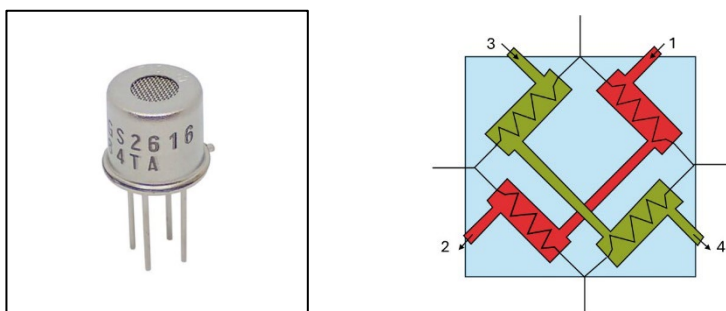
- > Bij een **elektrochemische sensor** wordt waterstof geoxideerd: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$. Waterstof reageert aan de platina electrode van de sensor en zuurstof reageert aan de tegenelectrode. Bij deze halfreacties vindt overdracht van elektronen plaats, waardoor stroom gaat lopen. De grootte van de elektronenstroom is een maat voor de waterstofconcentratie. De platina electrode is bedekt met een katalysator om de oxidatie van waterstof te bevorderen (Wang et al., 2023). Figuur 3.1 (links) geeft een voorbeeld van een elektrochemische sensor.
- > Ook bij een **katalytische sensor** wordt waterstof geoxideerd, maar dit is een chemische reactie (verbranding) waarbij geen elektronenstroom ontstaat.⁵ De verbranding vindt plaats op een aluminium kraal ('pellistor') die bedekt is met een dun laagje palladium en platina. De kraal wordt verwarmd om het verbrandingsproces te bevorderen. De extra warmte die door de verbranding ontstaat, veroorzaakt een verschil in weerstand ten opzichte van de referentiekraal. De verandering in weerstand is een maat voor de waterstofconcentratie (Ivanov et al., 2021; Yunusa et al., 2014). Figuur 3.1 (rechts) laat de opbouw van een katalytische sensor zien.

⁵ De laagste ontvlambaarheidsgrens (LEL) van waterstof in lucht is 4 vol.%. Door het gebruik van een katalysator kan een katalytische sensor waterstof bij lagere concentraties dan de LEL meten (Adema, 2024).



Figuur 3.1 Links: een elektrochemische sensor (Bron: [Scienoc](#)). Rechts: een schematische weergave van een katalytische sensor. Op de blauwe kraal vindt de verbranding plaats; de zwarte kraal is de referentie. De sensor is qua grootte vergelijkbaar met een elektrochemische sensor.

- > Bij een sensor op basis van een **metaaloxide** hechten waterstofmoleculen zich aan het oppervlak van metaaloxides als WO_3 , ZnO , TiO_2 , MoO_3 en Nb_2O_5 (Phanichphant, 2014). Om de hechting van en de selectiviteit voor waterstof te bevorderen, is het oppervlak voorzien van een katalysator.⁶ De metaaloxides zijn halfgeleiders en als waterstofmoleculen zich hieraan hechten, verandert de elektronische geleidbaarheid c.q. de weerstand van deze laag. De verandering in geleidbaarheid is een maat voor de waterstofconcentratie (Gao et al., 2024; Ivanov et al., 2021). De eigenschappen van de metaaloxidelag kunnen geoptimaliseerd worden door het oppervlak te 'verontreinigen' (doping) met bepaalde stoffen of door de structuur van het oppervlak aan te passen (Dey, 2018). Figuur 3.2 (links) geeft een voorbeeld van een metaaloxidesensor.
- > In een sensor die werkt op basis van **warmtegeleiding** zijn er twee elementen die in temperatuur verschillen. Het temperatuurverschil wordt constant gehouden, omdat de omringende lucht warmte overdraagt van het warme naar het koude element. In aanwezigheid van waterstof verloopt de overdracht van warmte sneller, omdat de thermische geleidbaarheid van waterstof veel groter is dan van lucht. Het vermogen dat nodig is om het temperatuurverschil constant te houden, is een maat voor de waterstofconcentratie (Hübert et al., 2011; Post et al., 2021). Figuur 3.2 (rechts) laat de opbouw zien van een sensor op basis van warmtegeleiding.



Figuur 3.2 Links: een metaaloxidesensor (Bron: [Figaro](#)). Rechts: een schematische weergave van een sensor op basis van warmtegeleiding. Waterstof komt bij 1 de sensor binnen en verlaat deze bij 2, terwijl het referentiegas (lucht) dat respectievelijk bij 3 en 4 doet.

⁶ Dit type sensor wordt ook wel MO-sensor (Metaal Oxide) of MOS (Metal Oxide Semiconductor) genoemd.

- > **Optische sensoren** maken gebruik van het gegeven dat de eigenschappen van bepaalde stoffen veranderen als deze in contact komen met waterstof. De meeste optische waterstofsensoren zijn optische vezels die gecoat zijn met een dunne laag palladium of met 'chemochrome' oxides (oxides die van kleur kunnen veranderen). Deze dunne lagen kunnen op de punt van de optische vezel zijn aangebracht of over de lengte van de vezel (Hübert et al., 2011). Enkele voorbeelden zijn:
 - Het uitzetten van een optische vezel als een dunne laag palladium op het oppervlak in contact komt met waterstof.
 - Het reflectievermogen van een wolframoxidelaag op een vezel neemt af, doordat de oxidelaag dunner wordt in aanwezigheid van waterstof.

Hoewel er al lang onderzoek wordt gedaan naar optische waterstofsensoren, zijn de technieken nog niet zover dat ze op grote schaal worden geproduceerd en worden toegepast. Redenen hiervoor zijn de complexe productieprocessen, de stabiliteit van palladium, de gevoeligheid van de sensoren voor omgevingslicht en het driften van het signaal in afwezigheid van gas (Hübert et al., 2011; Shen et al., 2023).

Een andere manier om lekkage van waterstof waar te nemen, is met behulp van tape die voorzien is van een pigment dat van kleur verandert op het moment dat het in aanraking komt met waterstof. De tape wordt aangebracht op koppelstukken en moet visueel worden geïnspecteerd om te bepalen of er sprake is van een waterstoflekkage (Hoagland et al., 2023).

3.2.2 Gebiedsdetectoren

De gasdetectoren die in de vorige paragraaf beschreven zijn, kennen enkele nadelen. Zo is een gasdetector een puntdetector die pas in alarm gaat als waterstof de afstand tussen de leklocatie en de sensor heeft overbrugd. Door wind en/of snelle dispersie kan het echter gebeuren dat waterstof de sensor niet bereikt, waardoor de gasdetector niet in alarm zal gaan. Een ander nadeel is, dat gasdetectoren elektronica bevatten die een vonk kunnen geven, waardoor het vrijgekomen waterstof ontsteekt, met alle gevolgen van dien.

Om bovengenoemde situaties te voorkomen, kunnen sensoren gebruikt worden die de aanwezigheid van waterstof op afstand meten, namelijk in een zone rondom de sensor. Voor waterstof is ultrasone detectie hiervoor de belangrijkste techniek. Bij deze techniek signaleren **akoestische sensoren** een gaslek door middel van ultrasoon geluid (25 kHz – 100 kHz) dat wordt geproduceerd als gas ontsnapt. De techniek is niet specifiek voor waterstof, aangezien bij alle gaslekken een ultrasoon geluid ontstaat, mits de gasdruk hoger is dan 3 bar (Walsh & Kelsey, 2017). Met ultrasone detectie kan echter niets gezegd worden over de exacte locatie van het gaslek en ook niets over het gas en de gasconcentratie (Royle et al., 2007; Walsh & Kelsey, 2017). Het bereik van akoestische detectoren is 20 tot 40 meter (Emerson, 2015; Honeywell, 2021).

Akoestische detectoren kunnen een gaslek zeer snel detecteren, maar om valse alarmen te voorkomen, wordt vaak een vertraging ingebouwd van 10-30 seconden (Walsh & Kelsey, 2017). Valse alarmen kunnen ontstaan door ultrasound geluid afkomstig van andere apparatuur en van akoestische reflecties. Een andere manier om valse alarmen te voorkomen, is om profielen te maken van omgevingsgeluiden, zodat akoestische sensoren deze geluiden kunnen onderscheiden van geluiden die ontstaan bij gaslekken (Azkarate et al., 2020).

Gaslekkages kunnen ook waargenomen worden met behulp van infraroodsensoren. Hierbij wordt infraroodlicht naar de sensor gestuurd (lijndetectie); dit signaal wordt zwakker, zodra gassen als bijvoorbeeld methaan en kooldioxide het licht bij specifieke golflengtes absorberen. Waterstof kan echter geen infraroodstraling absorberen en de infraroodtechniek is daarom niet geschikt om waterstoflekkages waar te nemen (W. J. Buttner et al., 2011).

3.2.3 Gebiedsmonitoring

Het monitoren van een gebied op de aanwezigheid van waterstof (gebiedsdetectie) kan gedaan worden door gasdetectoren (puntdetectie), eventueel in combinatie met gebiedsdetectoren (akoestische detectie). Gasdetectoren kunnen minder effectief zijn bij wind en natuurlijke ventilatie. Akoestische detectoren kunnen dan geschikter zijn. De waterstofbevattende installatie en de omgeving waarin deze staat, dragen in belangrijke mate bij aan de keuze voor een of meerdere typen detectoren. Het is gunstiger om meerdere type detectoren te hebben dan dezelfde type (Walsh & Kelsey, 2017).

Als gekozen wordt voor meerdere detectoren, moet aangegeven worden hoeveel detectoren minimaal geactiveerd moeten worden bij een waterstoflek. Dit wordt 'voting' genoemd. Een dergelijk systeem wordt aangeduid als 'nooN' (n out of N), waarbij 'n' het minimale aantal detectoren is dat geactiveerd moet worden van de 'N' aanwezige detectoren. Dergelijke systemen veroorzaken minder valse alarmen (Walsh & Kelsey, 2017).

3.3 Eisen aan waterstofsensoren en -detectoren

Waterstofsensoren moeten aan een groot aantal eisen voldoen: ze moeten waterstof specifiek en bij lage concentraties kunnen meten, de sensor moet snel reageren op de aanwezigheid van waterstof en gedurende lange tijd stabiel zijn, de kosten voor aanschaf en onderhoud moeten laag zijn en de sensor moet eenvoudig te maken en te integreren zijn (Ortiz Cebolla et al., 2017; Shen et al., 2023; Walsh & Kelsey, 2017). Er is echter geen detector die aan alle eisen voldoet, want een voorwaarde als een lange levensduur gaat bijvoorbeeld niet samen met lage kosten voor onderhoud (Ortiz Cebolla et al., 2017). Iedere sensor heeft z'n voor- en nadelen en de gebruiker zal in overleg met de fabrikant of leverancier een keuze moeten maken en bepalen waar de sensor(en) geplaatst moet(en) worden (Walsh & Kelsey, 2017).

Er wordt onderscheid gemaakt tussen analytische eisen, operationele eisen en eisen bij in-gebruikname. Tabel 3.2 geeft een overzicht van de parameters waar eisen aan gesteld worden (W. Buttner et al., 2011).

Tabel 3.2 Overzicht van parameters die bepalend zijn voor de eisen aan en de werking en effectiviteit van detectoren

Type	Parameter
Analytisch	Selectiviteit, meetbereik, resolutie, lineair bereik (en dynamisch bereik), nauwkeurigheid, responstijd, hersteltijd, herhaalbaarheid, drift, weersinvloed, omkeerbaarheid, gevoeligheid.
Operationeel	Levensduur, kalibratie- en onderhoudsvereisten, matrixvereisten, signaalbeheer, opwarmtijd, mechanische stabiliteit.

Type	Parameter
Ingebruikname	Kosten aanschaf en installatie, locatie, grootte detector, besturingscircuits, energieverbruik, elektronische interface, regelgeving, technical readiness level, alarminstelpunten.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op een aantal belangrijke parameters. De keuzes die in de praktijk worden gemaakt, zijn afhankelijk van de toepassing. Waterstofdetectoren worden onder meer geplaatst in ruimtes voor opslag en productie, woningen, voertuigen en in grote binnenruimtes (W. Buttner et al., 2011). Het is daarom weinig zinvol een lijst met criteria op te stellen die voor alle toepassingen geldt. In 2007 heeft het U.S. Department of Energy (DoE) wel een kort overzicht gepubliceerd met generieke doelen voor waterstofsensoren, zie Tabel 3.3 (U.S. Department of Energy, 2007). Anno 2024 is deze lijst niet veranderd (U.S. Department of Energy, 2024).

Tabel 3.3 Generieke eisen voor waterstofsensoren

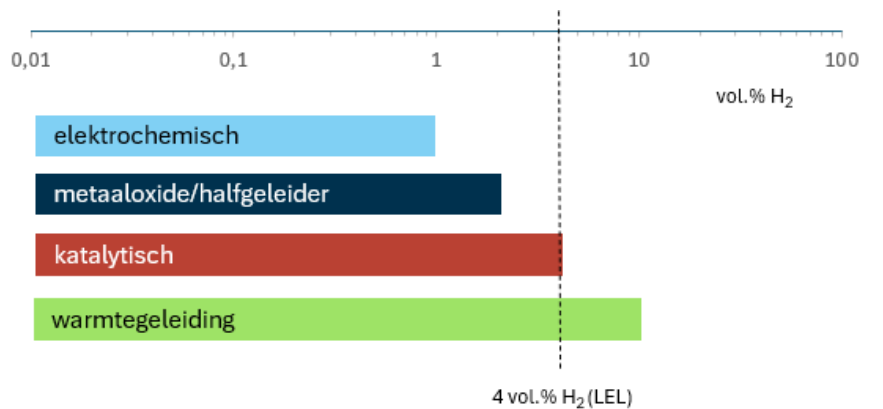
Parameter	Waarde
Meetbereik	0,1 tot 10 vol. %
Werktemperatuur	-30 °C tot 80 °C
Responstijd	Minder dan 1 seconde
Omgeving	Lucht, relatieve luchtvochtigheid 10 tot 98 %
Levensduur	10 jaar
(Kruis)gevoeligheid	Bestand tegen koolwaterstoffen, zwavel en/of CO

De National Renewable Energy Laboratory (NREL) heeft voor diverse toepassingen een lijst met criteria en specificaties opgesteld waaraan waterstofsensoren bij die toepassingen moeten voldoen. Hierbij wordt ook een relatieve ranking van de diverse criteria gegeven, dus welk criterium noodzakelijk is en welk gewenst.

3.3.1 Meetbereik sensor

Bij de keuze van een type sensor is het meetbereik een belangrijke parameter. Het meetbereik van elektrochemische sensoren is meestal enkele duizenden ppm's waterstof⁷ (Ivanov et al., 2021), terwijl dat voor sensoren op basis van warmtegeleiding meestal zo'n 10 vol. % waterstof of meer is (Gao et al., 2024). Sensoren op basis van warmtegeleiding hebben namelijk geen zuurstof nodig en kunnen tot wel 100 vol. % waterstof meten (Hübert et al., 2014). Figuur 3.3 geeft een globaal overzicht van de meetbereiken van een aantal typen waterstofdetectoren en is gebaseerd op een database van de Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) met technische informatie over waterstofdetectoren (BAM, 2015).

⁷ 1 vol. % waterstof is 10.000 ppm.



Figuur 3.3 Het meetbereik van de diverse type waterstofdetectoren. Merk op dat de schaal logaritmisch is.

Zoals vermeld, wordt in de praktijk vaak een combinatie van typen sensoren gebruikt. Een sensor op basis van warmtegeleiding is bijvoorbeeld minder goed in het meten van zeer lage waterstofconcentraties en wordt dan gecombineerd met een elektrochemische sensor die daar beter in is (Hübert et al., 2011). Op die manier kan waterstof in een breed concentratiegebied worden gemeten.

Enkele aspecten die bij het meetbereik van sensoren een rol spelen, zijn:

- > De sensor moet lineair reageren in een zo groot mogelijk concentratiegebied, liefst tot 4 vol.% (NFPA, 2023).
- > De gevoeligheid van een sensor moet voldoende nauwkeurig zijn. De onzekerheid mag niet meer dan 5-10 % van het signaal bedragen (Hübert et al., 2014).
- > De detectielimiet van een sensor moet een factor drie groter zijn dan het achtergrondsignaal en tenminste 25 % van het (laagste) alarmniveau bedragen (NFPA, 2023).
- > Een katalytische detector heeft minstens 10 vol.% zuurstof nodig om goed te kunnen functioneren, terwijl detectoren die gebaseerd zijn op warmtegeleiding ongevoelig zijn voor zuurstof (Hübert et al., 2014).
- > Een sensor kan verzadigd raken bij een hoge waterstofconcentratie, waardoor de gevoeligheid vermindert (Hübert et al., 2014).

3.3.2 Responstijd

De responstijd is de tijd die nodig is om 90 % van het signaal te bereiken dat hoort bij het ingestelde alarmniveau van de sensor (W. Buttner et al., 2011). De responstijd zegt iets over de snelheid waarmee een sensor de aanwezigheid van waterstof detecteert. Typische responstijden liggen in de orde van enkele tot tientallen seconden. Dit geldt niet voor akoestische detectoren, want voor hun werking is het niet nodig dat waterstof de sensor bereikt. Hun responstijden vallen in de orde van milliseconden tot seconden. Bij akoestische detectoren worden alarmeringen vertraagd uitgevoerd om het aantal valse alarmen te verminderen. De vertraging bedraagt over het algemeen 10 tot 30 seconden (Walsh & Kelsey, 2017).

De responstijd die nodig is voor een detector, verschilt per toepassing. In een waterstofauto is een responstijd van minder dan 1 seconde gewenst, terwijl op een terrein in de open lucht een responstijd tot 30 seconden vaak als voldoende wordt beschouwd. Daarnaast spelen de weersomstandigheden en de locatie van de detector ten opzichte van de mogelijke leklocatie(s) een grote rol in de responstijd (W. Buttner et al., 2011).

3.3.3 Alarmeringsniveaus

De laagste explosiegrens van waterstof is 4 vol.%. Om veiligheid te kunnen garanderen, moet een sensor waterstof bij (veel) lagere concentraties kunnen meten. Het alarmniveau moet laag genoeg zijn om veilig werken te kunnen garanderen, maar tegelijkertijd ook hoog genoeg zijn om te veel valse alarmen te voorkomen. Valse alarmen kunnen voorkomen worden door het toepassen van sensoren met een goede signaal-ruisverhouding of door gebruik te maken van twee detectoren waarbij beide detectoren moeten detecteren om alarm te kunnen geven (Walsh & Kelsey, 2017).

Er zijn diverse alarmeringsniveaus mogelijk, zie Tabel 3.4 (W. Buttner et al., 2011). Veelgebruikte waterstofconcentraties waarbij de detector in alarm gaat, zijn 10 % LEL en 25 % LEL (NFPA, 2023; Walsh & Kelsey, 2017).

Tabel 3.4 Mogelijke alarmeringsniveaus van waterstofsensoren

Risico	% van de LEL	[H ₂] in vol.%	[H ₂] in ppm
Zeer laag	2,5	0,1	1.000
Laag	10	0,4	4.000
Medium	25	1	10.000
Verhoogd	100	4	40.000
Hoog	> 200	> 8	> 80.000

Bij het bepalen van het alarmeringsniveau moet rekening gehouden worden met de snelheid waarmee een lek zich ontwikkelt, de omgeving, de aanwezigheid van mensen, de responstijd van de sensor en de te ondernemen acties. Per situatie moet bepaald worden of een waterstofdetector een of meerdere alarmeringsniveaus moet hebben. Als gekozen wordt voor twee alarmeringsniveaus, kan het eerste niveau fungeren als een waarschuwing voor een potentieel probleem waarvoor nader onderzoek nodig is, terwijl bij het tweede niveau verdergaande acties nodig zijn (Walsh & Kelsey, 2017).

Bij akoestische detectoren zijn de alarmeringsniveaus gebaseerd op het geluidsniveau (dB) van het lek. Het geluidsniveau dat de detector bereikt, hangt af van de grootte van het lek, de waterstofdruk en de afstand tussen het lek en de akoestische detector. Het alarmeringsniveau ligt doorgaans minimaal 6 dB boven het ultrasone achtergrondgeluid (Honeywell, 2021; Walsh & Kelsey, 2017).

3.3.4 Invloed van andere stoffen

De aanwezigheid van andere chemische stoffen dan waterstof kan het meetsignaal beïnvloeden. De bekendste verontreinigers zijn koolwaterstoffen, siliciumverbindingen, zwavel en koolmonoxide. Als de respons op een verontreiniging een tijdelijk karakter heeft, is er sprake van interferentie. Als de respons permanent is, is de sensor vergiftigd en kan niet meer gebruikt worden. Als de respons van een waterstofsensor meer dan 20 % afwijkt als gevolg van blootstelling aan een verontreiniging, voldoet een detector niet meer (Palmisano et al., 2015).

Sensoren die gebruikmaken van een katalysator, zijn gevoelig voor vergiftiging. Dit geldt dus voor elektrochemische sensoren, katalytische sensoren en metaaloxidesensoren. Sensoren op basis van warmtegeleiding zijn hier niet gevoelig voor, omdat zij geen katalysator bevatten (Hübert et al., 2011).

Met een koolmonoxidedetector kan de aanwezigheid van waterstof worden aangetoond, omdat een dergelijke detector kruisgevoelig is voor waterstof. Hiermee wordt bedoeld dat de sensor in de detector niet alleen reageert op de gewenste stof (koolmonoxide), maar ook op een andere stof (waterstof). Hoe lager de waterstofconcentratie, hoe groter de verschillen tussen de werkelijke waterstofconcentratie en wat de display op de detector aangeeft. Dit kan tot een factor 10 verschillen. Koolmonoxidetectoren die niet kruisgevoelig zijn voor waterstof, worden aangeduid met 'CO/H₂ LOW' (Robinson & Allason, 2021).

3.3.5 Weersinvloeden

Weersomstandigheden kunnen de werking van waterstofdetectoren en de juistheid van hun meetresultaten beïnvloeden. Te denken valt aan de temperatuur, de windsnelheid en de luchtvochtigheid:

- > Elektrochemische sensoren doen het minder goed bij temperaturen onder het vriespunt en kunnen degraderen bij lage luchtvochtigheid (NFPA, 2023).
- > Katalytische sensoren hebben minder last van weersomstandigheden, omdat beide kraken op dezelfde manier beïnvloed worden (Hübert et al., 2011).
- > Bij metaaloxidesensoren verandert de meting onder invloed van extremen in luchtvochtigheid (Hübert et al., 2011; NFPA, 2023). Dit kan voorkomen worden door de detector te voorzien van een nagenoeg impermeabel filter om condensatie te voorkomen of door het plaatsen van een vochtigheidsmeter op basis waarvan de meting gecorrigeerd kan worden (Hübert et al., 2014).
- > Sensoren op basis van warmtegeleiding zijn gevoelig voor temperatuurschommelingen. De invloed hiervan kan beperkt worden door het plaatsen van een thermometer op basis waarvan de meting gecorrigeerd kan worden (Hübert et al., 2014).

3.3.6 Invloed van trillingen

Naast stoffen en weersomstandigheden kan de werking van detectoren ook beïnvloed worden door trillingen. Dit speelt bijvoorbeeld een rol in voertuigen. Detectoren moeten daar dan ook mechanisch robuust zijn (Hübert et al., 2014).

3.3.7 Onderhoud en kalibratie

De prestaties van een detector kunnen veranderen onder invloed van het weer, verontreinigingen, trillingen en stroomstoringen. Voor een juiste en zo accuraat mogelijke werking van waterstofdetectoren, moeten deze daarom regelmatig gecontroleerd en gekalibreerd worden (W. Buttner et al., 2011). Controle en kalibratie zijn twee verschillende procedures. Bij een controle worden diverse testen gedaan om te zien of de functies van de detector nog binnen de specificaties liggen. Kalibratie is nauwkeuriger, omdat meetresultaten aangepast kunnen worden als die buiten de specificaties liggen. Controle vindt vaker plaats dan kalibratie (Walsh & Kelsey, 2017). Hoe vaak er gekalibreerd moet worden, hangt af van het type sensor, de condities in het veld, stof, vergiftiging enzovoort.

Akoestische detectoren kunnen gekalibreerd worden met een geluidbron op een bepaalde afstand, volgens de specificaties van de fabrikant. Deze detectoren kunnen zichzelf ook

controleren door een lek te simuleren waarbij regelmatig een geluidssignaal wordt uitgezonden dat de microfoon moet detecteren (Walsh & Kelsey, 2017) (Walsh & Kelsey, 2017b).

3.3.8 Gebruik van detectoren in ATEX-zones

Waterstof is een ontvlambaar gas dat bij hoge concentraties kan exploderen. De elektrische eigenschappen van waterstofdetectoren kunnen ervoor zorgen dat ze als ontstekingsbron fungeren (Shen et al., 2023). Dit is ongewenst en daarom moeten waterstofdetectoren die gebruikt worden in ATEX-zones, explosieveilig zijn en voldoen aan de eisen van (NEN-EN-IEC 60079-29-2, 2015). De behuizing van detectoren in ATEX-zones moet drukvast en gecertificeerd zijn (Adema, 2024). Dit maakt dergelijke detectoren groter en zwaarder.

3.3.9 Overige eisen

In de vorige paragrafen is beschreven aan welke eisen waterstofdetectoren moeten voldoen. Er zijn er echter nog meer zoals ook te zien is in Tabel 3.2. Het is bijvoorbeeld belangrijk dat detectoren een lange levensduur en een laag energieverbruik hebben, dat ze klein en goedkoop zijn en dat ze gecertificeerd zijn. Dit laatst geeft de gebruiker het vertrouwen dat een detector nauwkeurig, betrouwbaar en robuust is (Hübert et al., 2014).

Over het algemeen worden de aanschaffkosten door de gebruikers minder belangrijk gevonden dan de onderhoudskosten (Ortiz Cebolla et al., 2017). De onderhoudskosten worden vooral bepaald door de frequentie van onderhoud (controle en kalibratie). Voor de levensduur van een detector variëren de eisen. Voor stationaire installaties moet de levensduur van een detector idealiter minimaal vijf jaar zijn, maar elders wordt minimaal tien jaar gevraagd. Voor transporttoepassingen gaat het om 6.000 tot 9.000 uur (Ortiz Cebolla et al., 2017).⁸

3.4 Eisen aan de plaatsing van waterstofdetectoren

Een waterstofdetector moet een waterstofwolk meten voordat een gevaarlijke situatie ontstaat. In paragraaf 3.3 zijn de eisen aan waterstofdetectoren zelf besproken. Er zijn echter geen richtlijnen bekend die aangeven waar een waterstofdetector het beste geplaatst kan worden (W. Buttner et al., 2011). Desalniettemin is de locatie van een waterstofdetector belangrijk, want als de detector op een ongeschikte locatie geplaatst wordt, kan het zo zijn dat de waterstofwolk niet gedetecteerd wordt. De meest geschikte locatie van een waterstofdetector is echter niet eenvoudig te bepalen. Daarvoor is kennis nodig over de waterstofdetector zelf, over de verspreiding van waterstof, over de omgeving en over wat te doen na alarmering (NEN-EN-IEC 60079-29-2, 2015).

Algemeen

De beste plaatsing van detectoren wordt meestal op basis van ervaring bepaald. Factoren die daarbij een rol spelen, zijn onder andere (Walsh & Kelsey, 2017):

- > Het doel van detectie: als het doel is om vrijkomend waterstof te detecteren, kan dat tot andere locaties leiden dan als het doel is het voorkomen van een te hoge waterstofconcentratie.
- > De grootte van de waterstofwolk: wat mag de maximale omvang van een waterstofwolk zijn in verband met de te verwachten schade?

⁸ De levensduur van elektrochemische sensoren is twee à drie jaar, van katalytische sensoren vijf jaar (Adema, 2024).

- > Verspreiding van waterstof: in een binnensituatie verspreidt waterstof zich op een andere manier dan in een buitensituatie waar de wind vat kan krijgen op de waterstofwolk. Daarnaast hoeft waterstof zich niet meer als een licht gas te gedragen als het door turbulentie is opgemengd en hebben ventilatie, de geometrie van een ruimte en de aanwezigheid van obstakels invloed op de verspreiding van waterstof.
- > Het aantal detectoren: het plaatsen van meer detectoren vergroot de kans op detectie en verkleint de kans op escalatie van een incident.
- > Daarnaast zijn er nog praktische aspecten die een rol spelen bij de plaatsing van waterstofdetectoren, zoals de toegankelijkheid van de detector en mogelijke weersomstandigheden.

De plaatsing van detectoren kan bepaald worden met behulp van een risicoanalyse waarbij installaties en de geografische dekking van de bijbehorende scenario's in kaart worden gebracht. De verspreiding van waterstof kan gesimuleerd worden met softwareprogramma's of met rookexperimenten (NEN-EN-IEC 60079-29-2, 2015). Overigens kunnen de data die detectoren genereren nuttige informatie bevatten over bijvoorbeeld storingen, reparatie en onderhoud en over het aantal vals positieve en vals negatieve meldingen.⁹ Dergelijk informatie zegt iets over de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van de geplaatste detectoren (Walsh & Kelsey, 2017).

Binnenruimte

Als er een waterstoflek is, dan moet dit zo snel mogelijk gedetecteerd worden om ophoping en mogelijke ontsteking te voorkomen. Bij het bepalen van de optimale locatie van een waterstofdetector moet de kans op detectie zo hoog mogelijk zijn en moet detectie onafhankelijk zijn van de richting waarin waterstof uitstroomt. De grootte en de indeling van de ruimte en de luchtstroming in de ruimte spelen een belangrijke rol in de plaatsbepaling van waterstofdetectoren. Voor het goed en betrouwbaar kunnen meten van waterstof is een stabiel signaal nodig (Tchouvelev, 2024). Daarom is de kans op het detecteren van waterstof op plekken met veel ventilatie en luchtstromingen lager dan op plekken met weinig ventilatie en geen luchtstromingen (Tchouvelev, Buttner, & Angers, 2021).

Voor binnenruimtes zijn de vuistregels voor het plaatsen van waterstofdetectoren als volgt (Tchouvelev, Buttner, & Angers, 2021):

1. Geen waterstofdetector plaatsen in de luchtstroom vanaf de luchtinlaat naar de afzuiging naar buiten.
2. Geen waterstofdetector plaatsen bij de afzuiging naar buiten, zowel niet binnen als buiten de ruimte.
3. Een waterstofdetector plaatsen op locaties waar weinig luchtstromingen en turbulenties zijn.
4. Geen waterstofdetector plaatsen laag bij de vloer.
5. Een waterstofdetector plaatsen op 30 centimeter afstand onder het plafond voor ruimtes met een plafond van maximaal 5 meter.
6. Geen waterstofdetector plaatsen onder het plafond bij ruimtes met een plafond hoger dan 5 m, maar (schuin) boven de installatie op een afstand van niet meer dan 3 meter.

Ad. 1 en Ad. 2: Mechanische ventilatie zorgt ervoor dat waterstof makkelijker wordt meegezogen richting de afzuiging naar buiten. Het is een logische gedachte om een

⁹ Bij een vals positieve uitslag wordt ten onrechte waterstof gedetecteerd, terwijl dat niet aanwezig is. Bij een vals negatieve uitslag wordt ten onrechte geen waterstof gedetecteerd, terwijl dat wel aanwezig is.

waterstofdetector bij de uitlaatopening te plaatsen, omdat waterstof daar snel aanwezig zal zijn. Ter hoogte van de uitlaatopening is echter sprake van turbulentie, waardoor een sensor daar geen stabiele metingen kan doen. De turbulentie bij de uitlaatopening zorgt er ook voor dat waterstof daar snel verdund wordt, waardoor het niet mogelijk is om daar in een vroeg stadium op een betrouwbare manier waterstof te detecteren. Kleine waterstoflekages kunnen hierdoor niet worden gemeten en niet worden opgemerkt (Tchouvelev, 2024). Experts van het NREL zijn daarom van mening dat het beter is om waterstof niet bij hoge, maar bij lage concentraties te meten (0,1 – 0,5 vol.%) en om dat te doen op locaties met weinig turbulentie om een stabiel meetsignaal te krijgen.¹⁰

In de literatuur zijn de meningen verdeeld over de beste locaties voor het plaatsen van waterstofdetectoren. Het is gebruikelijk om detectoren te plaatsen in gebieden waar waterstof zich kan ophopen en dat is vaak dicht bij het plafond en boven de opening van de uitlaatventilatie (Adema, 2024; NEN-EN-IEC 60079-29-2, 2015; RKI, 2021). Het lijkt er echter op dat de inzichten aan het veranderen zijn en dat waterstofdetectoren juist geplaatst moeten worden in gebieden waar sprake is van weinig ventilatie. Zo schrijft de Health and Safety Executive (HSE): *“Somewhat unexpectedly, however, the modelling demonstrated that optimal sensor placement may be achieved in locations of low ventilation flow within the facility (as modelled by CFD), and that in doing so, leaks can be more predictably and quickly detected than by placing the sensor in front of a ventilation exhaust system as is currently more frequently performed”* (Azkarate et al., 2020, blz. 54).

Ook zijn de inzichten aan het veranderen als het gaat over de te meten concentraties. Het is gebruikelijk om concentraties tussen de 8.000 en 16.000 ppm te meten (20 % LEL – 40 % LEL), maar experts geven aan dat 1.000 en 10.000 ppm beter is (2,5 % LEL – 25 % LEL), omdat de kans op vroegtijdige detectie dan groter is (Tchouvelev, Buttner, & Angers, 2021).

Ad. 3: De te meten waterstofconcentratie moet niet onder het meetbereik van een waterstofdetector liggen. Laag bij de grond kan dat echter wel het geval zijn (Tchouvelev, Buttner, & Angers, 2021).

Ad. 4 en Ad. 5: Aan het plafond kunnen obstakels als lampen en leidingen aanwezig zijn. Deze veroorzaken turbulentie rondom de sensor en beïnvloeden de nauwkeurigheid van de waterstofdetector. De detector moet daarom onder de obstakels geplaatst worden. De afstand tussen het waterstoflek en de sensor mag hierbij niet meer dan 3 meter bedragen (Tchouvelev, Buttner, & Angers, 2021). In hoge binnenruimtes is waterstofdetectie onder het plafond mogelijk niet zinvol (Tchouvelev, Buttner, & Angers, 2021).

Aspecten waarmee rekening gehouden moet worden bij het plaatsen van een waterstofdetector in een binnenruimte:

- > In een binnenruimte kan niet worden uitgegaan van een uniforme verdeling van waterstof, omdat de waterstofconcentraties in de ruimte kunnen verschillen (W. Buttner et al., 2011).
- > Hierdoor kan het nodig zijn om op meerdere locaties in de ruimte detectoren te plaatsen (W. Buttner et al., 2011; RKI, 2021).
- > Bij indoor tanken worden sensoren geplaatst aan de muur waar de dispenser staat en in de dispenser zelf (W. Buttner et al., 2011).
- > De HSE adviseert om in kleine binnenruimtes om de vier meter een detector te plaatsen (Walsh & Kelsey, 2017).

¹⁰ Alleen bij natuurlijke ventilatie is het zinvol om een waterstofdetector bij de uitlaatopening te plaatsen (Tchouvelev, 2024).

Buitenruimte

De verspreiding van waterstof in de open lucht is heel anders dan in een besloten ruimte. Buiten heeft waterstof meer ruimte om te stijgen en om zich te verspreiden, waardoor er minder kans op ophoping is. Toch bestaat die mogelijkheid wel, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van muren en/of overkappingen.

De plaatsing en spreiding van waterstofdetectoren in buitenruimtes wordt vooral bepaald door de te verwachten grootte van een waterstofwolk. De vuistregel is dat er eens per 40 m³ of eens per 10 meter een detector geplaatst wordt (Hatech, z.d.). Dit komt overeen met (RKI, 2021) die stelt dat een vuistregel is om detectoren 9 tot 12 meter uit elkaar te plaatsen. De HSE hanteert een onderlinge afstand van maximaal 10 meter voor open ruimtes met weinig obstakels en een onderlinge afstand van maximaal 5 meter voor het geval er muren, overkapping en/of veel obstakels zijn. De afstanden gelden in drie richtingen (Walsh & Kelsey, 2017).

Stel dat bij een incident een ronde gaswolk met een maximale inhoud van 220 m³ wordt verwacht. De diameter van die wolk is dan 7,5 meter. Om de gaswolk te kunnen detecteren, moet de afstand tussen twee detectoren maximaal 7,5 meter zijn. Is deze afstand groter, dan bestaat de kans dat de wolk tussen de detectoren door gaat en de sensoren in de detectoren niet bereikt.

Akoestische detectie bevindt zich bij voorkeur 1 à 2 meter boven een potentiële uitstroomlocatie (Walsh & Kelsey, 2017).

Bij het tanken van waterstof moet minimaal één detector per tankzuil geplaatst worden. Als een afdak gebruikt wordt om tankzuilen te beschermen, moeten detectoren direct boven de dispenser geplaatst worden (NFPA, 2023). PGS 35 geeft aan dat bij onbemande tankstations waterstofdetectoren in elk geval in tankzuilen aanwezig moeten zijn (PGS 35, 2021).

3.5 Kans op detectie van een waterstoflek

De belangrijkste taak van een waterstofdetector is het waarnemen van waterstof in lucht. In dat opzicht zijn de juiste plaatsing en het aantal detectoren van cruciaal belang, zie ook paragraaf 3.4. Bij onjuiste plaatsing van een detector of bij te weinig detectoren kan een waterstoflek namelijk niet of te laat waargenomen worden. Onderzoek door de HSE heeft uitgewezen dat bij stationaire installaties doorgaans meer dan 10 % van de installatie niet gedekt wordt door waterstofdetectoren (Walsh & Kelsey, 2017). De risicoreductie zal daarom nooit groter zijn dan een factor 10. De aanwezigheid van waterstofdetectie is dus geen garantie dat een waterstoflek (op tijd)esignaleerd wordt.

De kans dat een waterstofdetectiesysteem geen alarm geeft terwijl er wel waterstof aanwezig is, wordt geschat op 0,001-0,01 per aanspraak: 0,001 voor de software en 0,01 voor de hardware (Hübert et al., 2014).

Bij offshore installaties hebben vaste gasdetectiesystemen in de periode 1992 – 2000 ongeveer 65 % van de lekkages van brandbare gassen gedetecteerd. De overige 35 % werd voornamelijk door personeel ontdekt (Royle et al., 2007). Deze cijfers hebben waarschijnlijk alleen betrekking op de waargenomen lekkages, aangezien er ook altijd lekkages zijn die niet worden waargenomen. Zo is gebleken dat tussen 2000 en 2008 gasdetectoren op

offshore installaties 35 % van de grote lekken en 69 % van de minder grote lekken niet hebben waargenomen (McGillivray & Hare, 2008). Het is te verwachten dat op onshore installaties deze cijfers beter zijn, omdat de invloed van wind op land beperkter is dan op zee.

3.6 Regelgeving

De vraag wanneer waterstofdetectie aanwezig moet zijn, is niet eenvoudig te beantwoorden, omdat hier nog geen alomvattende regelgeving voor bestaat. Zo verplicht NFPA 2 het gebruik van waterstofdetectoren bij waterstoftoepassingen (NFPA, 2023), geeft PGS 35 aan dat waterstofdetectie alleen nodig is bij onbemande waterstoftankstations (PGS 35, 2021)¹¹ en geeft PGS 36 aan dat detectie moet worden toegepast in voertuigstallingen (PGS 36, 2023). In de praktijk wordt per situatie bekeken of waterstofdetectie nodig is en wordt voor de onderbouwing zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij bestaande regelgeving.

De eisen die aan waterstofdetectie en waterstofdetectoren gesteld worden, staan in diverse normen beschreven. Tabel 3.5 geeft een overzicht van Europese normen (Hübert et al., 2014; Ortiz Cebolla et al., 2017; Walsh & Kelsey, 2017). Regels voor het certificeren van waterstofdetectoren staan beschreven in Richtlijn 2014/34/EU (EU, 2014) en in (FM Approvals, 2018).

Tabel 3.5 Overzicht van normen en standaarden op het gebied van waterstofdetectie – en detectoren

Norm	Titel
NEN-EN-IEC 60079-29-1:2017 en	Explosieve atmosferen - Deel 29-1: Gasdetectoren - Prestatie-eisen voor detectoren van brandbare gassen
NEN-EN-IEC 60079-29-2:2015 en	Explosieve atmosferen - Deel 29-2: Gasdetectoren - Selectie, installatie, gebruik en onderhoud van detectoren van brandbare gassen en zuurstof
NEN-EN-IEC 60079-29-3:2014 en	Explosieve atmosferen – Deel 29-3: Gasdetectoren - Richtlijn op functionele veiligheid van vaste gasdetectiesystemen
NEN-EN-IEC 60079-29-4:2010 en	Explosieve atmosferen - Deel 29-4: Gasdetectoren - Prestatie-eisen van detectoren die gebruikmaken van een optische weg voor de detectie van brandbare gassen
NEN-EN 50194-1:2023 en	Elektrische apparaten voor de detectie van ontvlambare gassen in huishoudelijke en niet-industriële gebouwen - Deel 1: Testmethoden en prestatie-eisen
NEN-EN-IEC 60529:1992/A2:2013 en	Beschermingsgraden van omhulsels van elektrisch materieel (IP-codering)
NEN-EN 50402:2017 en	Elektrisch materieel voor de detectie en meting van brandbare of giftige gassen, dampen of zuurstof - Eisen aan de functionele veiligheid van vastbevestigde gasdetectiesystemen

¹¹ Voor bemande tankstations geldt artikel 3.5g van het Arbeidsomstandighedenbesluit. Hierin staat dat “als er gevaar is op explosie of brand, doeltreffende maatregelen genomen moeten worden”.

Norm	Titel
NEN-EN 50244 en	Elektrische toestellen voor de detectie van brandbare gassen in woonhuizen - Leidraad voor de keuze, het installeren, het gebruik en het onderhoud
NEN-EN 50271:2018 en	Elektrisch materieel voor de detectie en meting van brandbare gassen, giftige gassen of zuurstof - Eisen voor en beproevingen van toestellen die gebruikmaken van programmatuur en digitale technieken
NEN-EN-IEC 61508-1:2010 en	Functionele veiligheid van elektrische/elektronische/programmeerbare elektronische systemen verbandhoudend met veiligheid - Deel 1: Algemene eisen
NEN-EN-IEC 61511-1	Functionele veiligheid - Veiligheidssystemen voor de procesindustrie - Deel 1: Raamwerk, definities, systeem, hardware en applicatieprogrammeringsvereisten.
NEN-EN-IEC 61511-2 (en)	Functionele veiligheid - Veiligheidssystemen voor de procesindustrie - Deel 2: Richtlijnen voor de toepassing van IEC 61511-1
NPR 7910-1	Gevarenzone-indeling met betrekking tot explosiegevaar - Deel 1: Gasexplosiegevaar, gebaseerd op NEN-EN-IEC 60079-10-1:2015

3.7 Ontwikkelingen

Op het gebied van waterstofdetectie zijn veel ontwikkelingen gaande. Die ontwikkelingen liggen op het gebied van selectiviteit, robuustheid, meettechnieken, productietechnieken, responstijd, energieverbruik en miniaturisering (Tchouvelev, Buttner, Melideo, et al., 2021). Het kan hierbij gaan om prototypes waarvan de werking is aangetoond of om commercieel verkrijgbare sensoren en detectoren. Deze paragraaf beschrijft enkele van deze ontwikkelingen.

- > Waterstof kan op afstand gemeten worden door lichtpulsen van een bepaalde golflengte uit te zenden. Waterstof zorgt voor een verschuiving van de golflengte; dit effect is weliswaar klein, maar meetbaar. Op deze manier konden onderzoekers op 50 meter afstand onderscheid maken tussen 0,1 vol.% en 1 vol.% waterstof. De onderzoekers denken dat dit in de toekomst ook mogelijk is op 100 meter afstand (Armstrong et al., 2021).
- > Het is bekend dat waterstof voor de verkleuring van pigmenten kan zorgen. Hier wordt gebruik van gemaakt door tapes te voorzien van een pigment en koppelingen in waterstofsysteem van deze tape te voorzien. Het nadeel is dat visuele inspectie nodig is om de kleurverandering te zien. Er wordt onderzoek gedaan of de verkleuring van het pigment omgezet kan worden in een signaal dat draadloos verstuurd kan worden (Hoagland et al., 2023).
- > Al jaren wordt onderzoek gedaan naar het kleiner maken van waterstofsensoren (W. Buttner et al., 2011; Hübert et al., 2014). De responstijd van deze sensoren is korter en het stroomverbruik is lager, maar ze kunnen ook snel verzadigd raken (W. Buttner et al., 2011). Er worden sensoren ontwikkeld die zo klein zijn, dat ze direct op een koppelstuk geplaatst kunnen worden. De sensor zit in een behuizing die moet voorkomen dat de sensor vies wordt en dat waterstof verwaait, voordat het gedetecteerd wordt. De

responstijd ligt in de orde van milliseconden en het signaal wordt door middel van Bluetooth verzonden (Deng et al., 2023).

- > Er is een akoestische systeem dat gebruik maakt van gewone microfoons om waterstoflekken te detecteren. Het systeem heet AGLED (Acoustic Gas Leak Early Detection). In een gebied worden diverse antennes geplaatst; iedere antenne bevat vier microfoons die in een periode van 12 seconden steeds een paar seconden geluid opnemen (Masson et al., 2023).
- > Bij 'fiber optic sensing' wordt gebruikgemaakt van een glasvezelkabel. Deze kan lichtsignalen over lange afstanden transporteren, omdat licht via zijwaartse reflectie in de vezel wordt gehouden. De techniek wordt toegepast bij aardgasleidingen en kan ook voor waterstofleidingen worden gebruikt. Men kan een waterstofgevoelig element aan de kabel toevoegen. Voordeel van 'fiber optic sensing' is dat ze geen ontstekingsbron is en in smalle ruimtes zoals batterijen gebruikt kan worden. Wel is de techniek gevoelig voor interferenties door druk, temperatuur en trillingen (Post et al., 2021).
- > Het combineren van akoestische detectietechnieken met imaging technieken heeft geleid tot de ontwikkeling van ultrasone camera's. Hiermee kan op een afstand tot 6 meter een gaslek gedetecteerd en in beeld gebracht worden. De ultrasone camera berekent ook het lekdebiet (Distran, z.d.).



Figuur 3.4 Gebruik van ultrasone camera om waterstoflek te detecteren (Bron: (Distran, z.d.))

- > Waterstofdetectie wordt gecombineerd met technieken als Internet of Things (IoT) waarbij detectoren op een mobiel robotsysteem continu waterstof meten in een gebied. De verzamelde data wordt verzameld in een database, gecombineerd met gegevens in een digitale omgeving ('digital twins') en geanalyseerd. Er worden hoge eisen gesteld aan 3D plaatsbepaling en aan het draadloos versturen van data (Hwang & Hwang, 2024).

3.8 Samenvatting

Een waterstofsensor maakt onderdeel uit van een waterstofdetector. De sensor meet een verandering in fysische of chemische eigenschappen en zet dit om in een elektrisch signaal. De detector verwerkt dit signaal tot een alarm.

Voor veel waterstofdetectoren is het nodig dat waterstof de sensor bereikt. Het gaat dan om elektrochemische-, katalytische-, metaaloxide- en warmtegeleidingsensoren. Met

akoestische detectie kan waterstof op afstand worden gemeten, waardoor de detector zelf geen potentiële ontstekingsbron kan zijn.

De werking van en de keuze voor een waterstofdetector zijn van een groot aantal factoren afhankelijk. Te denken valt aan het meetbereik, de responstijd, de invloed van stoffen (kruisgevoeligheid, vergiftiging), de invloed van het weer, kosten (aanschaf, onderhoud, kalibratie, levensduur, aantal) en explosieveiligheid. Geen enkele detector kan aan alle eisen voldoen, de ideale waterstofdetector bestaat daarom niet.

Voor de plaatsing van waterstofdetectoren zijn het doel van detectie en de grootte van een mogelijke waterstofwolk belangrijk. Vanwege het stijgend vermogen van waterstof is het gebruikelijk om waterstofdetectoren hoog te plaatsen, niet te ver van mogelijke leklocaties en op enige afstand van het plafond. Of een waterstofdetector ook in de buurt van de uitlaatopening moet worden geplaatst, is nog maar de vraag. Dat is wel gebruikelijk, maar omdat daar veel luchtstromingen zijn, is een betrouwbaar en stabiel meetsignaal niet mogelijk.

De aanwezigheid van waterstofdetectie is geen garantie dat een waterstoflek voortijdig gesignaleerd wordt. De aanwezigheid van meerdere waterstofdetectoren vergroot wel de kans hierop. Als meerdere waterstofdetectoren gewenst zijn, varieert de onderlinge afstand tussen de 5 en de 10 meter. De risicoreductie die dit met zich meebrengt, is minder dan een factor 10, omdat een ruimte of een gebied nooit volledig gedekt kan worden door de aanwezige waterstofdetectoren.

Bronnen

- Adema, P. (2024). *Persoonlijke communicatie*.
- Armstrong, D., Warden, M., & Sothard, D. (2021, september 24). Stand-off detection of hydrogen concentration. *International Conference on Hydrogen Safety (ICHS)*.
- Azkarate, I., Buttner, W., Barthélémy, H., Cirrone, D., Coldrick, S., Hooker, P., Hawksworth, S., Jeffrey, K., Jordan, T., Keller, J., Markert, F., Melideo, D., Moretto, P., & Tchouvelev, A. (2020). *Research Priorities Workshop (RR1159)*.
- BAM. (2015, september 30). *The H2Sense Hydrogen Sensor Database*.
https://www.bam.de/_SharedDocs/DE/Downloads/Projekte/h2sense-database.html
- Brennan, S., Bengaouer, A., Carcassi, M., Cerchiara, G., Evans, G., Friedrich, A., Gentilhomme, O., Houf, W., Kotchourko, A., Kotchourko, N., Kudriakov, S., Makarov, D., Molkov, V., Papanikolaou, E., Pitre, C., Royle, M., Schefer, R., Stern, G., Venetsanos, A. G., ... Yanez, J. (2011). Hydrogen and fuel cell stationary applications: Key findings of modelling and experimental work in the HYPER project. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2711–2720.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.127>
- Buttner, W., Burgess, R., Post, M., & Rivkin, C. (2011). *Summary and Findings from the NREL/DOE Hydrogen Sensor Workshop (June 8, 2011)*. <http://www.osti.gov/bridge>
- Buttner, W. J., Post, M. B., Burgess, R., & Rivkin, C. (2011). An overview of hydrogen safety sensors and requirements. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2462–2470. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.176>
- De Stefano, M., Rocourt, X., Sochet, I., & Daudey, N. (2019). Hydrogen dispersion in a closed environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(17), 9031–9040.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.099>
- Deng, X., Wang, T., Yang, F., & Ouyang, M. (2023, september 20). Design of long-life wireless near-field hydrogen gas sensor (ID234). *International Conference on Hydrogen Safety (ICHS)*.
- Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 229, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036>
- Distran. (z.d.). *Distran Ultrasonic Cameras for gas leak detection*.
<https://distran.swiss/en/home/>
- Emerson. (2015). *Ultrasonic Gas Leak Detection – Your First Line of Defense*.
<https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-technical-ultrasonic-leak-detection--your-first-line-of-defense-data-en-us-191168.pdf>
- EU. (2014). *RICHTLIJN 2014/34/EU VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 26 februari 2014 betreffende de harmonisatie van de wetgevingen van de lidstaten inzake apparaten en beveiligingssystemen bedoeld voor gebruik op plaatsen waar ontploffingsgevaar kan heersen* (Vol. 2014, pp. 309–356).
- FM Approvals. (2018). *Approval Standard for Combustible Gas Detectors* (Nummer 6310).
- FM Approvals LLC, & Underwriters Laboratories Inc. (2020). *ANSI/FM 121303-2020 - Guide for Use of Detectors for Flammable Gases*.
- Fuster, B., Houssin-Agbomson, D., Jallais, S., Vyazmina, E., Dang-Nhu, G., Bernard-Michel, G., Kuznetsov, M., Molkov, V., Chernyavskiy, B., Shentsov, V., Makarov, D., Dey, R., Hooker, P., Baraldi, D., Weidner, E., Melideo, D., Palmisano, V., Venetsanos, A., & Der Kinderen, J. (2017). Guidelines and recommendations for indoor use of fuel cells and hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7600–7607.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.266>
- Gao, L., Tian, Y., Hussain, A., Guan, Y., & Xu, G. (2024). Recent developments and challenges in resistance-based hydrogen gas sensors based on metal oxide semiconductors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 416(16), 3697–3715.
<https://doi.org/10.1007/s00216-024-05213-z>
- Grune, J., Sempert, K., Kuznetsov, M., & Jordan, T. (2021, september 21). Hydrogen jet

- structure in presence of forced co-, counter- and cross-flow ventilation. *International Conference on Hydrogen Safety*.
- Hatech. (z.d.). *Waterstof detectie*. <https://www.hatechgas.com/waterstof-detectie/>
- Hoagland, W., Bannantine, J., & Smith, R. (2023, september 20). Very low-cost wireless hydrogen leak detection for hydrogen infrastructure (ID285). *International Conference on Hydrogen Safety*.
- Honeywell. (2021). *Searchzone Sonik™ Ultrasonic Gas Leak Detector*. [https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/his/en-us/products/gas-and-flame-detection/documents/Searchzone Sonik Spec Sheet.pdf](https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/his/en-us/products/gas-and-flame-detection/documents/Searchzone_Sonik_Spec_Sheet.pdf)
- Hübert, T., Boon-Brett, L., Black, G., & Banach, U. (2011). Hydrogen sensors – A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 157(2), 329–352. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.04.070>
- Hübert, T., Boon-Brett, L., Palmisano, V., & Bader, M. A. (2014). Developments in gas sensor technology for hydrogen safety. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20474–20483. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.042>
- Hwang, H.-J., & Hwang, S.-H. (2024). Developing an internet of things system for hydrogen leak detection at hydrogen refueling stations integrating LoRa and global positioning system. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 8(5), 1582–1593. <https://doi.org/10.55214/25768484.v8i5.1874>
- HySafe. (2009). *Deliverable D113 - Initial Guidance for Using Hydrogen in Confined Spaces -Results from InsHyde* (Nummer D113). http://www.hysafe.org/download/1710/HYSAFE_D113_version_1.1.pdf
- Ivanov, I. I., Baranov, A. M., Talipov, V. A., Mironov, S. M., Akbari, S., Kolesnik, I. V., Orlova, E. D., & Napolskii, K. S. (2021). Investigation of catalytic hydrogen sensors with platinum group catalysts. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 346, 130515. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130515>
- Jallais, S., Liquide, A., Houssin-Agbomson, D., & Vyazmina, E. (2015). *Work Package 5: Widely accepted guidelines on Fuel Cell indoor installation and use-Hyindoor-Pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems*. May 2016. <https://www.researchgate.net/publication/302692394>
- Kim, B., & Hwang, K.-I. (2024). Influence of air changes per hour on hydrogen leaks in mechanically ventilated enclosures. *Journal of Building Engineering*, 88, 109071. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109071>
- Lach, A. W., & Gaathaug, A. V. (2021). Effect of Mechanical Ventilation on Accidental Hydrogen Releases—Large-Scale Experiments. *Energies*, 14(11), 3008. <https://doi.org/10.3390/en14113008>
- Lee, J., Cho, S., Cho, H., Cho, S., Lee, I., Moon, I., & Kim, J. (2022). CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area. *Process Safety and Environmental Protection*, 161, 436–446. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.065>
- Masson, F., Martelet, Y., Preuillh, J., Houssin, D., & Watremez, X. (2023, september 20). Gas leak detection using acoustics and artificial intelligence (ID266). *International Conference on Hydrogen Safety (ICHS)*.
- Matsuura, K., Nakano, M., & Ishimoto, J. (2012). Acceleration of hydrogen forced ventilation after leakage ceases in a partially open space. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(9), 7940–7949. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.034>
- McGillivray, A., & Hare, J. (2008). *Offshore hydrocarbon releases 2001-2008 (RR672)*.
- Murphy, D. (2023). *Hydrogen Safety for Large-Scale Electrolyzer Installations Safety Features for Electrolyzer Systems*. Publications Office of the European Union. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-11/2-02-safety-murphy.pdf>
- NEN-EN-IEC 60079-10-1. (2020). *Explosieve atmosferen - Deel 10-1: Classificatie van gebieden - Explosieve gasatmosferen*. 1.
- NEN-EN-IEC 60079-13. (2017). *Explosieve atmosferen - Deel 13: Bescherming van de uitrusting - Bescherming door drukkamer “p” en mechanisch geventileerde kamer “v”*.
- NEN-EN-IEC 60079-29-2. (2015). *Explosieve atmosferen - Deel 29-2: Gas detectoren - Selectie, installatie, gebruik en onderhoud van detectoren van brandbare gassen en zuurstof*. 2.
- NEN-EN 14986. (2024). *Ontwerp van ventilatoren voor potentieel explosieve atmosferen*.

- NFPA. (2023). *Hydrogen Technologies Code (NFPA 2)*.
- NPR-ISO/TR 15916. (2023). *Basismetingen voor de veiligheid van waterstofsyste men*.
- NPR 7910-1. (2015). *NPR 7910-1+C1 (nl) Gevarenzone-indeling met betrekking tot explosiegevaar - Deel 1: Gasexplosiegevaar. 1*.
- Ortiz Cebolla, R., Weidner, E., Buttner, W., & Bonato, C. (2017). *Summary report for a hydrogen sensor workshop - Hydrogen safety sensors and their use in applications with hydrogen as an alternative fuel*.
- Palmisano, V., Weidner, E., Boon-Brett, L., Bonato, C., Harskamp, F., Moretto, P., Post, M. B., Burgess, R., Rivkin, C., & Buttner, W. J. (2015). Selectivity and resistance to poisons of commercial hydrogen sensors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(35), 11740–11747. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.120>
- Pannekoek, H. (2024). *Persoonlijke communicatie*.
- PGS 35. (2021). *Waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen*. <https://publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/pgs35/>
- PGS 36. (2023). *PGS 36 Waterstof - Richtlijn voor het veilig bedrijfsmatig stallen, onderhouden en repareren van motorvoertuigen*. <https://publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/pgs36/>
- Phanichphant, S. (2014). Semiconductor Metal Oxides as Hydrogen Gas Sensors. *Procedia Engineering*, 87, 795–802. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.677>
- Post, M. B., Buttner, W. J., & Hartmann, K. (2021, september 21). The NREL Sensor Laboratory: Status and Future Directions for Hydrogen Detection (ID176). *International Conference on Hydrogen Safety*.
- Prasad, K., Pitts, W., & Yang, J. (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(17), 9218–9231. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.001>
- Rehman, T. (2023, oktober 19). *Sensor vs. Detector - What's the Difference?* <https://www.askdifference.com/sensor-vs-detector/>
- RIVM. (2021). *Handleiding Risicoberekeningen Bevi, versie 4.3*. 1–398.
- RKI. (2021). *Where should a fixed gas detector sensor be mounted?* <https://www.rkiinstruments.com/blog/where-should-a-fixed-gas-detector-sensor-be-mounted/>
- Robinson, A., & Allason, D. (2021, september 22). Investigation into the crosssensitivity of domestic carbon monoxide alarms to hydrogen. *International Conference on Hydrogen Safety (ICHHS)*.
- Royle, M., Willoughby, D., Brueck, E., & Patel, J. (2007). *Measurement of acoustic spectra from liquid leaks (RR568)*.
- RvO. (2014). *Ventilatiesystemen in energiezuinige nieuwbouwwoningen*. https://www.rvo.nl/files/file/2014/10/Infoblad_Ventilatiesystemen_2014.pdf
- Shen, C., Xie, Z., Huang, Z., Yan, S., Sui, W., Zhou, J., Wang, Z., Han, W., & Zeng, X. (2023). Review of the Status and Prospects of Fiber Optic Hydrogen Sensing Technology. *Chemosensors*, 11(9), 473. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11090473>
- Spoelstra, M. (2020). *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/06/20201014-IFV-Veiligheidsaspecten-van-waterstof-in-een-besloten-ruimte.pdf>
- Swain, M. R., & Swain, M. N. (1996). Passive ventilation systems for the safe use of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 21(10), 823–835. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(96\)00002-X](https://doi.org/10.1016/0360-3199(96)00002-X)
- Tchouvelev, A., Buttner, W., & Angers, B. (2021, september 24). Development of Risk Mitigation Guidance for Hydrogen Sensor Placement Indoors and Outdoors. *International Conference on Hydrogen Safety*.
- Tchouvelev, A. V. (2024). *Persoonlijke communicatie*.
- Tchouvelev, A. V., Buttner, W. J., Melideo, D., Baraldi, D., & Angers, B. (2021). Development of risk mitigation guidance for sensor placement inside mechanically ventilated enclosures – Phase 1. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(23), 12439–12454. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.108>
- U.S. Department of Energy. (2007). *Safety section of the U.S. DOE HFCIT Multi-year Research Plan*.

- <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mypp/pdfs/safety.pdf>
 U.S. Department of Energy. (2024). *Multi-Year Program Plan (MYPP)*.
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/hfto-mypp-2024.pdf>
- Walsh, P., & Kelsey, A. (2017). *Fixed flammable gas detector systems on offshore installations: optimisation and assessment of effectiveness (RR1123)*.
- Wang, C., Yang, J., Li, J., Luo, C., Xu, X., & Qian, F. (2023). Solid-state electrochemical hydrogen sensors: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(80), 31377–31391. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.167>
- Witte, T. G. (2023). *Safety for hydrogen vent systems*. <https://hydrogentechworld.com/safety-for-hydrogen-vent-systems>
- Xie, H., Li, X., & Christopher, D. M. (2015). Emergency blower ventilation to disperse hydrogen leaking from a hydrogen-fueled vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(25), 8230–8238. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.146>
- Xie, Y., Liu, J., Qin, J., Xu, Z., Zhu, J., Liu, G., & Yuan, H. (2024). Numerical simulation of hydrogen leakage and diffusion in a ship engine room. *International Journal of Hydrogen Energy*, 55, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.139>
- Yunusa, Z., Hamidon, M. N., Kaiser, A., & Awang, A. (2014). Gas Sensors: A Review. *Sensors and Transducers*, 168(4), 61–75.
- Zalosh, B., Thomas, K., & Lowry, W. (2021). *Ventilation Considerations for Hydrogen Safety*.
- Zevenbergen, J. (2024). *Persoonlijke communicatie*.
- Zhao, Q., Li, Y., Cao, W., & Li, Y. (2024). Risk analysis of high-pressure hydrogen leakage in confined space with tube skid container for cylinder. *International Journal of Hydrogen Energy*, 60, 581–592. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.165>