

Dispersiekaracteristieken van waterstof

WP4 Veiligheidsaspecten en risico's

Auteur: TNO

Dit project is medegefinancierd door TKI Nieuw Gas | Topsector Energie
uit de PPS-toeslag onder referentienummer TKI2019 WVIP



Aanleiding

WVIP WP 4 werkt aan kennisvragen voor het borgen van waterstofveiligheid en heeft als doelstelling:

1. Het inventariseren van alle mogelijke veiligheidsrisico's die gepaard gaan met de productie, opslag, transport en gebruik van waterstof.
2. Welke maatregelen zijn noodzakelijk om waterstof als veilige en betrouwbare energiedrager grootschalig te kunnen introduceren en daarmee de publieke acceptatie te vergroten.

Dit document is bedoeld voor alle partijen die bezig waren, momenteel bezig zijn, dan wel in de nabije toekomst betrokken zullen zijn bij de ontwikkeling van de waterstofinfrastructuur en specifiek voor partijen die zich bezig houden met de toepassing van waterstof als brandstof voor mobiliteit over de weg. Dit document geeft handvatten om de vragen en antwoorden die er over dit onderwerp zijn centraal te ontsluiten met het doel de waterstofveiligheid te borgen.

Dit document beantwoordt een van de kennisvragen zoals die zijn geïnventariseerd door de deelnemers van WP4 in 2020. Voor meer informatie over en de totstandkoming van de kennisvragen zie <https://nlhydrogen.nl/wp4-inventarisatie-van-kennisvragen>.

Het doel van het behandelen van de kennisvraag is om een beeld te scheppen van de dispersiekaracteristieken van waterstof in de openlucht en in een afgesloten ruimte. Ten opzichte van veel andere gasvormige stoffen heeft waterstof een lagere dichtheid dan lucht, wat consequenties kan hebben voor het veiligheidsprotocol.

Introductie

Waterstof is lichter dan lucht waardoor het opstijgt. Daarnaast heeft waterstof een hoge diffusiecoëfficiënt en dit leidt er toe dat waterstof zich makkelijk in zijwaartse richting kan verspreiden. In de open lucht is dit gunstig want daardoor verdunt een waterstofwolk redelijk snel, maar in een (deel) afgesloten ruimte kunnen hoge waterstofconcentraties bereikt worden. Bij ontsteking kan dit sneller tot een explosie leiden dan in de open lucht. De verspreiding van waterstof binnen een (deels) afgesloten ruimte kan zodoende tot andere veiligheidsscenario's leiden in vergelijking met de conventionele brandstoffen, zoals benzine en diesel. Dit geldt met name voor bijvoorbeeld parkeergarages en tunnels. Het is daarmee van belang om het dispersiegedrag van waterstof in dergelijke deels afgesloten ruimtes inzichtelijk te hebben, waardoor ook eventuele mitigerende maatregelen genomen kunnen worden om potentiële consequenties van een onverhoopt lek te minimaliseren.

Kennisvraag

In licht van bovenstaande, is de volgende kennisvraag geformuleerd:

Wat zijn de dispersiekaracteristieken van waterstof in open veld en in een (deels) afgesloten ruimte als functie van tijd en plaats en onder invloed van de grootte van het lek en de aanwezigheid van (actieve/passieve) ventilatie?

Uitwerking van de kennisvraag

De dispersie van waterstof is van vele factoren afhankelijk, waaronder uitstroomgrootte, -snelheid,

-locatie en -richting, het drukverschil en de meteorologische condities. In geval van een (deels) afgesloten ruimte waarin de uitstroming plaatsvindt, zijn de afmetingen van die ruimte en de aanwezigheid van obstakels en openingen van belang. Gezien het verschil in gevaaraspect, is er begrijpelijkerwijs meer experimentele en numerieke informatie aanwezig voor (deels) afgesloten ruimten dan voor openlucht scenario's.

(Deels) afgesloten ruimte

In geval van een lage uitstroomsnelheid in een afgesloten ruimte, zal het waterstof opstijgen naar het plafond en daar één of meer lagen (zogenaamde stratificatie) met verschillende waterstofconcentraties vormen en zal na verloop van tijd beginnen te diffunderen. In geval van een hoge uitstroomsnelheid zal het waterstof homogeen mengen met de lucht boven het uitstroompunt. Om aan dit soort verschillende effecten te kunnen rekenen en een eerste inschatting te maken, kan gebruik gemaakt worden van de ratio jetlengte/(hoogte ruimte). Als deze verhouding kleiner is dan 1, is er sprake van stratificatie van waterstof onder het plafond. Als deze verhouding veel groter is dan 1, zal het waterstof homogeen opmengen in de ruimte.

Als de lengte van de uitstromende waterstofjet klein is, heeft de jet weinig impuls en zal het drijvend vermogen van waterstof snel vat krijgen op het uitstromend waterstofgas en bepalend worden voor de opmenging met lucht. Bij een kleine jet in combinatie met een hoge ruimte is de uitstroom en de stijging van waterstofgas naar het plafond minder turbulent. Waterstof zal rustiger naar het plafond stijgen en daar lagen vormen. Dit proces gaat sneller dan de verspreiding in zijwaartse richting door diffusie. Hoe langer de uitstroom onder deze condities duurt, hoe dikker de waterstoflagen zullen worden, terwijl de concentratie in die lagen ruwweg constant blijft.

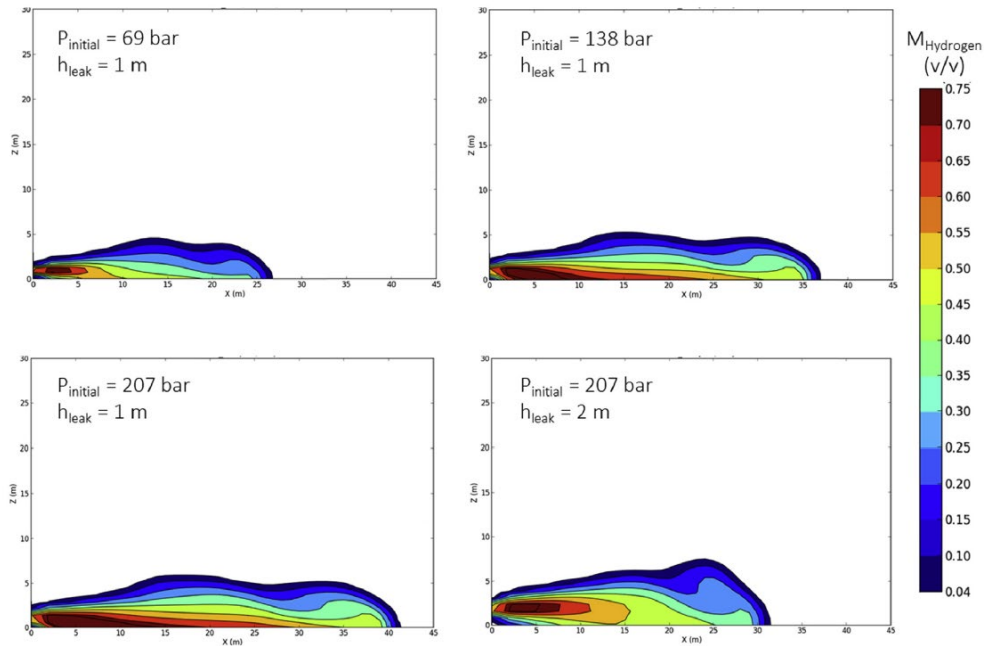
Naarmate de lengte van de uitstromende jet groter wordt en daarmee het uitstroomdebiet, zal de uitstromende waterstofjet turbulenter zijn. Dit zorgt voor een betere menging met lucht waardoor het concentratieprofiel van waterstof in de gehele ruimte na verloop van tijd homogener wordt en niet gelaagd. Omdat de verspreiding van waterstof in deze situatie sterk afhankelijk is van het uitstroomdebiet, maakt de exacte locatie van de uitstroomopening minder uit.

Als er obstakels zijn tussen de uitstroomopening en het plafond, zal een turbulent uitstromende jet een deel van zijn energie verliezen, terwijl het om het obstakel vloeit. Hierdoor wordt de lengte van de jet kleiner en daarmee ook de de ratio. Waterstof kan zich minder goed mengen met lucht waardoor het zal gaan stratificeren, maar de invloed van obstakels is minder groot dan de invloed van het uitstroomdebiet. Bij rustig uitstromend gas daarentegen (laminare stroming) zorgen obstakels voor meer turbulentie waardoor waterstof beter gemengd wordt en de waterstoflaag qua concentratie meer uniform verdeeld is.

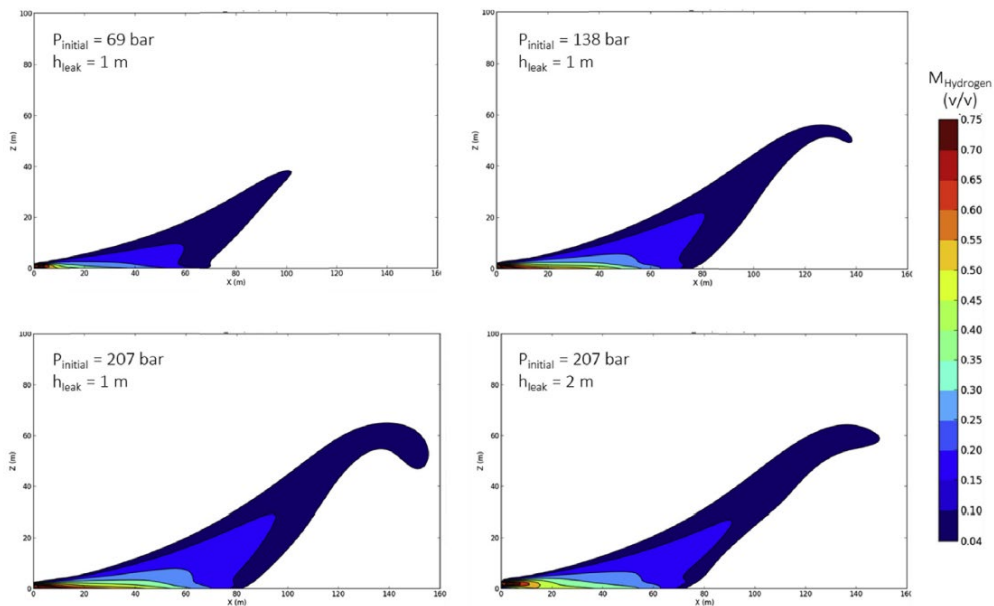
In een geventileerde ruimte, zal waterstof zich beter mengen met lucht en zal de omvang van de brandbare waterstofwolk afnemen (enkele dode volumes daargelaten). Hoe meer en beter de ventilatie, des te beter de opmenging van de waterstof.

Openlucht

Als waterstof in de openlucht uit een opening stroomt, zou dit moeten leiden tot stratificatie aangezien de hoogte van de ruimte oneindig is waardoor de ratio naar nul gaat. Die redenering gaat alleen op bij absolute windstilte en gedurende de eerste seconden na de uitstroming is er sprake van een op stratificatie-lijkend effect, zie Figuren 1 en 2.



Figuur 1. Concentratieprofiel (volumepercent) van waterstof 1 seconde na begin uitstroming als functie van drukverschil en hoogte van uitstroom ten opzichte van het grondoppervlak (h_{leak}) [1]. Windsnelheid is 0 m/s. Op de x-as en y-as de afstand van de wolk ten opzichte van lekpunt. Concentratie in volumefactie.



Figuur 2. Concentratieprofiel (volumepercent) van waterstof 20 seconden na begin uitstroming als functie van drukverschil en hoogte van uitstroom ten opzichte van het grondoppervlak (h_{leak}) [1]. Windsnelheid is 0 m/s. Op de x-as en y-as de afstand van de wolk ten opzichte van lekpunt. Concentratie in volumefactie.

In de praktijk zal een situatie van absolute windstilte niet voorkomen. Door de wind zal waterstof sneller worden opgemengd met de omringende lucht en zullen de profielen zoals geschetst in bovenstaande figuren anders zijn. Het effect van ‘stratificatie’ net na het begin van de uitstroom (geldend voor horizontale uitstroming) zal verminderen tot verdwijnen en er zullen lagere waterstofconcentraties worden gemeten.

Bij turbulente uitstroming heeft de impuls van de waterstofjet in de eerste seconden na de uitstroming een grote invloed op de verspreiding van waterstof dan het stijgend vermogen. De impuls van de uitstromende jet neemt af naarmate de afstand tot de uitstroombestemming groter wordt, waardoor het stijgend vermogen van waterstof meer invloed krijgt op het uitstromend gas.

Een aspect dat genoemd moet worden met het oog op waterstofdispersie, is het Coandă-effect ^[2]. Dit effect houdt in dat een uitstromende horizontale jet de neiging heeft om zich langer langs een oppervlak te willen bewegen. Daardoor wordt het opmengen met de lucht uit de omgeving moeilijker en blijft de waterstofconcentratie langer hoog. Dit vergroot de kans op ontsteking en is vooral bij een horizontale uitstroming vlak bij de grond van belang.

Conclusies

In een afgesloten ruimte en in geval van een kleine uitstroom (klein drukverschil en/of kleine uitstroombestemming) zal waterstof zich laagsgewijs (stratificatie) verzamelen onder het plafond. Door ventilatie zal het waterstof homogener worden opgemengd met de omringende lucht. Naarmate de uitstromende jet groter en turbulenter wordt, neemt stratificatie af en wordt waterstof homogener opgemengd. De grootte van de uitstroombestemming is direct gecorreleerd aan de lengte van de uitstromende jet. Bij een grote opening maar klein drukverschil zal de resulterende jet klein zijn en daarmee het effect van stratificatie groter worden. Ook in dit laatste geval geldt dat door ventilatie het opmengen van de gevormde waterstoflagen zal versnellen, waardoor hogere concentraties waterstof (lokaal) minder snel bereikt zullen worden. Ook de aanwezigheid van obstakels helpt bij het sneller opmengen van het waterstof en daarmee het tegengaan van het stratificatieproces.

In de openlucht zal door de wind de opmenging van waterstof met de omringende lucht sneller plaatsvinden dan in een afgesloten ruimte. Bij kleine lekkages is de kans op de vorming van een brandbare wolk klein. Naarmate het drukverschil groter wordt en bij horizontale uitstroming, zal de wolk over een langere lengte over de grond een hogere concentratie hebben en daarmee zal de kans op ontsteking groter worden.

Referenties

1. Edelia, E. M., Winkler, R., Sengupta, D., El-Halwagi, M. M., & Mannan, M. S. (2018). A computational fluid dynamics evaluation of unconfined hydrogen explosions in high pressure applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(33), 16411-16420.
2. Panitz, T., & Wasan, D. T. (1972). Flow attachment to solid surfaces: the Coanda effect. *AIChE Journal*, 18(1), 51-57.