

Wat zijn de faalwijzen bij het opslaan van vloeibare waterstof?

WP4 Veiligheidsaspecten en risico's

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.

Deze rapportage 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 vloeibare waterstof en de opslag hiervan. Dit rapport geeft handvatten om de vragen en antwoorden die er over dit onderwerp zijn centraal te ontsluiten met het doel de waterstofveiligheid te borgen.

Het rapport beantwoordt een van de kennisvragen zoals die zijn geïnterviewd door de deelnemers van WP4 in 2020. Voor meer informatie over en de totstandkoming van de kennisvragen zie rapportage '[WP4 Inventarisatie van kennisvragen](#)' van het WVIP project'.

Het doel van het behandelen van de kennisvraag is om een overzicht te geven van de faalwijzen van de opslag van vloeibare waterstof en de daarbij komende veiligheidsrisico's.

Introductie

Vloeibare waterstof wordt gebruikt wanneer er grotere hoeveelheden waterstof getransporteerd of opgeslagen moeten worden. De dichtheid van cryogene waterstof is ongeveer 800 keer groter dan die van gasvormig waterstof, dat houdt in dat je in de zelfde volume-eenheid 800 keer meer waterstof kunt opslaan wanneer deze vloeibaar gemaakt is. Vloeibare waterstof wordt momenteel veelal toegepast in de (chemische) industrie en in steeds hogere mate de mobiliteit.

Het doel van deze rapportage is om in beeld te krijgen welke partijen in Nederland waterstof in vloeibare vorm opslaan, of dit kleine of grote gebruikers zijn en wie welke kennis in huis heeft omtrent faalwijzen bij de opslag van vloeibare waterstof.

De hoofdvraag die beantwoordt wordt in deze rapportage is:

Wat zijn de faalwijzen bij het opslaan van vloeibare waterstof?

In de wetenschappelijke publicaties is veel te lezen over de eigenschappen en het gedrag van vloeibaar waterstof in bepaalde situaties. Europese waterstof initiatieven zoals bijv. [PRESLHY](#) en [SH₂IFT](#) richten zich op het veilig gebruik van en omgaan met waterstof, en focussen zich vooral op de aspecten vrijkomen ('release'), ontsteking ('ignition') en verbranding ('combustion').

Opslag vloeibare waterstof in Nederland

Opslag van vloeibare waterstof wordt in Nederland alleen gedaan door BRZO bedrijven. Waterstof wordt doorgaans vloeibaar gemaakt om meer waterstof per eenheid te kunnen transporteren. Het afkoelen van waterstof om van de gas naar vloeibare fase te gaan kost veel energie en toepassing van dit proces is daarom alleen logisch bij grote hoeveelheden waterstof (boven BRZO-grens).

Daarnaast wordt vloeibare waterstof ook gekozen als hoge zuiverheid een vereiste is. De sectoren waar vloeibare waterstof gebruikt wordt zijn de ruimtevaartsector, de scheepvaartindustrie, luchtvaartindustrie de wegtransportsector, de (chemische) industrie en de energiesector. Ook wordt (vloeibaar) waterstof steeds meer gebruikt in de elektronica-industrie.¹

Faalwijzen en risico's bij opslag van vloeibare waterstof

In de literatuur is al extensief onderzoek verricht naar de veiligheidsaspecten van opslag van vloeibare waterstof. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de bekende faalwijzen:

- Boil-off. Dit is het effect wat ontstaat wanneer de lage temperatuur (-253 °C) waarop vloeibare waterstof gehouden moet stijgt en de vloeistof verdampt. Dit zorgt voor een snelle gasvorming waardoor de druk in een container opbouwt en tot verhoogd risico's op een explosie leidt.²
- Wanneer een cryogene vloeistof zoals waterstof in contact komt met water, vindt er een fenomeen plaats wat RPT genoemd wordt ('Rapid Phase Transition'). Doordat vloeibare waterstof in contact komt met water verdampt het in een korte tijd waardoor het een explosie kan veroorzaken.³
- Falen van apparatuur/onderdelen: corrosie ontstaan door stress en moeheid van het materiaal, falen van sensoren, (regel- en druk)kleppen, collisie, foutieve aansluiting, onjuist ontwerp/dimensionering en mechanisch falen.⁴
- Inadequate handelingen van uitvoerend personeel, onvoldoende onderhoud en onjuist ontwerp.

In een onderzoek van Lowesmith et al. (2014) worden 39 incidenten geanalyseerd die te maken hebben met de opslag van vloeibare waterstof. Van de 39 incidenten worden de meeste veroorzaakt door inadequaat ontwerp, falen van apparatuur/onderdelen en onjuist handelen/opvolgen protocol.⁵

Op de site van H2Tools.org worden waterstof gerelateerde incidenten opgenomen zodat anderen daaruit lessen kunnen trekken. Via de zoekterm 'liquid hydrogen storage' verschijnen rapporten van tientallen incidenten die ontstaan zijn op of nabij de opslag van vloeibare waterstof.⁶

Relevante ISO-normeringen omtrent opslag en gebruik van (vloeibare) waterstof zijn met name:

- ISO 13984:1999: Liquid hydrogen — Land vehicle fuelling system interface;
- ISO 13985:2006: Liquid hydrogen — Land vehicle fuel tanks;
- ISO 16111:2018: Transportable gas storage devices;
- ISO/AWI 19884: Cylinders and tubes for stationary storage;
- ISO/TR 15916:2004: Basic considerations for the safety of hydrogen systems.⁷

Mogelijke maatregelen die genomen dienen te worden bij de opslag van vloeibare waterstof zijn overvloeiing bescherming, overdrukkleppen, breekplaten, drukbestendige kleppen. Aanvullend

¹ [Expanding Use of Hydrogen in the Electronics Industry Gasworld November 2016_tcm17-419014.pdf \(linde-gas.com\)](#)

² [Boil-off losses along the LH₂ pathway - Guillaume Petitpas, Ph.D. \(2018\)](#)

³ [Risk and Consequences of Rapid Phase Transition for Liquid Hydrogen](#)

⁴ Duan, Y., Zhao, J., Chen, J., & Bai, G. (2016). A risk matrix analysis method based on potential risk influence: A case study on cryogenic liquid hydrogen filling system. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 277-287.

⁵ [Lowesmith, B. J., Hankinson, G., & Chynoweth, S. \(2014\). Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS. *International journal of hydrogen energy*, 39\(35\), 20516-20521](#)

⁶ [Lessons Learned | Hydrogen Tools \(h2tools.org\)](#)

⁷ [ISO - ISO/TC 197 - Hydrogen technologies](#)

hierop noemen Kikukawa et al. (2008) als maatregelen ook: toepassen van schoksensoren en het monitoren van de druk in de vacuümlaag van de wand.⁸

Gevaren bij vrijkomen van vloeibaar waterstof

Bij het vrijkomen van vloeibaar waterstof kunnen er gevaren ontstaan. Een aantal van deze gevaren zijn:

- Direct contact met vloeibaar waterstof of sterk afgekoelde rookgassen leidt tot ernstige brandwonden;
- Inademing van het gevormde waterstofgas (lage temperatuur) kan ernstige problemen voor de ademhaling veroorzaken en uiteindelijk leiden tot verstikking;
- Contact met slecht geïsoleerd (wand)materiaal kan leiden tot bevrozing van de huid op het materiaal;
- Lucht die sterk afgekoeld raakt door aanraking met de installatie wordt gecondenseerd en kan druppelen, wat kan leiden tot plaatselijke verbranding op de huid;
- Bij het lekken van vloeibare waterstof verdampt deze en verandert het de samenstelling van de lucht, wat de kans op een explosie vergroot;
- Opbouw van waterstofgas in de ruimte.⁹

Conclusie

Vloeibare waterstof wordt in Nederland op enkele plaatsen opgeslagen. Dit wordt gedaan door BRZO bedrijven en zij hebben voldoende kennis in huis om hun opslag en processen veilig in te richten en zo de risico's en faalwijzen te mitigeren. Kleine gebruikers van vloeibare waterstof in Nederland zijn (nog) niet in beeld. In de toekomst kan de trend gebruik van vloeibare waterstof meer verschuiven naar andere toepassingen/sectoren, zoals de mobiliteit en elektronica-industrie. Hierdoor ontstaan er wellicht meer kleine gebruikers en afnemers van vloeibare waterstof die (nog) niet over de juiste kennis beschikken om vloeibare waterstof op een veilige manier op te slaan.

Referenties

[Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., & Molkov, V. \(2018\). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43\(12\), 6462-6475.](#)

Dagdougui, H., Sacile, R., Bersani, C., & Ouammi, A. (2018). *Hydrogen infrastructure for energy applications: production, storage, distribution and safety*. Academic Press.

Duan, Y., Zhao, J., Chen, J., & Bai, G. (2016). A risk matrix analysis method based on potential risk influence: A case study on cryogenic liquid hydrogen filling system. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 277-287.

Gye, H. R., Seo, S. K., Bach, Q. V., Ha, D., & Lee, C. J. (2019). Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International journal of hydrogen energy*, 44(2), 1288-1298.

⁸ Kikukawa, S., Mitsuhashi, H., & Miyake, A. (2009). Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations. *international journal of hydrogen energy*, 34(2), 1135-1141.

⁹ Hansen, O. R. (2020). Hydrogen infrastructure—Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 164-176.

Hansen, O. R. (2020). Hydrogen infrastructure—Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 164-176.

Kikukawa, S., Mitsuhashi, H., & Miyake, A. (2009). Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations. *international journal of hydrogen energy*, 34(2), 1135-1141.

Liu, Y., Liu, Z., Wei, J., Lan, Y., Yang, S., & Jin, T. (2021). Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 1-8.

Lowesmith, B. J., Hankinson, G., & Chynoweth, S. (2014). Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS. *International journal of hydrogen energy*, 39(35), 20516-20521.

Wijayanta, A. T., Oda, T., Purnomo, C. W., Kashiwagi, T., & Aziz, M. (2019). Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15026-15044.

[Understanding Quantum Effects Will Help Us To Export Liquid Hydrogen - #SINTEFblog](#)

[Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis - ScienceDirect](#)

[Risk and Consequences of Rapid Phase Transition for Liquid Hydrogen](#)

[Boil-off losses along the LH₂ pathway - Guillaume Petitpas, Ph.D. \(2018\)](#)

[Expanding Use of Hydrogen in the Electronics Industry Gasworld November 2016_tcm17-419014.pdf \(linde-gas.com\)](#)

[Lessons Learned | Hydrogen Tools \(h2tools.org\)](#)

[ISO - ISO/TC 197 - Hydrogen technologies](#)