Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Veiligheid van Vloeibare Waterstof

Gevaren en risico’s van LH2

Kenniscommunity LH2, Min KGG

3 september 2025

David Bolsman, RVO

Agenda

- Samenvatting
- Veiligheid van waterstof – algemene intro
  - Eigenschappen en kennis van waterstof – recap
  - Eigenschappen van vloeibare waterstof
- LH_2-veiligheid
  - Gevaren algemeen
  - Opslag & Verladen
  - Transport
- Risico's van LH2 vs. andere H2-dragers
- Maatregelen en handelingsperspectief
- Preventie
- (Bijlagen)

Bronnen:

- NIPV scenarioboeken Opslag LH2 en LH2 in Haven
- NASA (liquid) hydrogen safety
- EIGA Safety in Storage, Handling & Distribution of Liquid Hydrogen
- Clean Hydrogen Partnership Handbook on Hydrogen (chapter on LH2)
- Linde SDS on liquid hydrogen
- NPR-ISO/TR 15916:2015
- RIVM-briefrapport 2024-0032, Effecten van waterstofexplosies
- HSE rr986, Releases of unignited liquid hydrogen
- Gexcon Liquid Hydrogen safety considerations
- DNV Large volume liquid hydrogen releases
- IDEALHY Safety of Liquefaction, Storage and Transport of LH2
- HyResponder Safety of liquefied hydrogen

Met dank aan Margreet Spoelstra, NIPV; Marcel Keezer, Cryoworld; Peter van Gerwen, Gerwen Advies

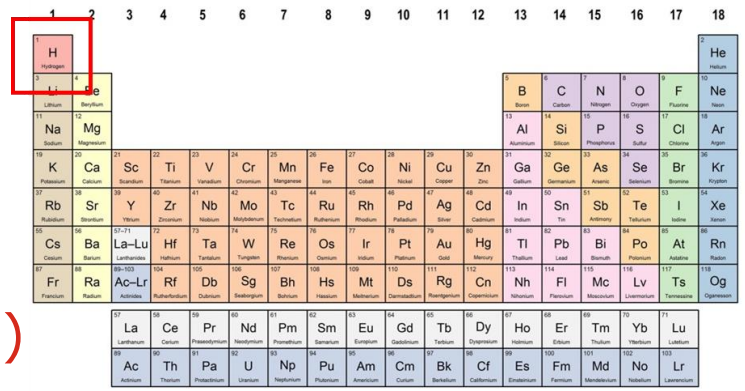
Intern gebruik

Samenvatting

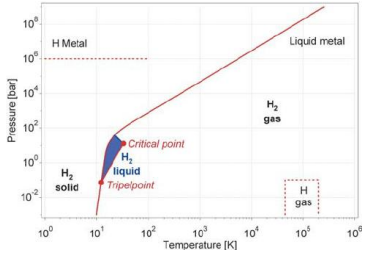
- LH2 heeft bepaalde gevaren en benodigd specifieke technische maatregelen
- Lekkage kan zeer ernstige gevolgen hebben
- De risico's (kans x effect) zijn, net als bij de meeste waterstof toepassingen, acceptabel omdat de *waarschijnlijkheid* (= kans) van grote calamiteiten gering is
- Verschillende toepassingen van LH2 kennen allemaal hun eigen risico's
- Hulpdiensten zullen, net als bij bepaalde andere waterstofdragers, specifieke maatregelen moeten voorbereiden
- In vergelijking met andere waterstofdragers, bevindt LH2 zich in de 'middenmoot': niet extreem gevaarlijk, niet de veiligste optie.
  - Bij toetsing tegen verschillende maatschappelijke belangen (MCA), komt LH2 als de meest wenselijke waterstofdrager uit de vergelijking

Intern gebruik

Eigenschappen van waterstof (recap)



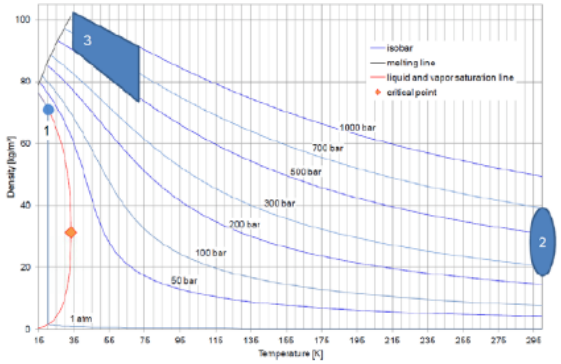
- Kleinste molecuul
  - Permeatie
  - Stroming
  - Waterstofbrosheid
- Lastig als gas te vervoeren (lage energie dichtheid)
- Licht -> Vluchtig
  - Dichtheid 83,764 g/m^3 vs. 1,198 g/m^3 voor lucht)
- Explosief (4%LEL - 75%UEL)
- Brandbaar
- Snellere verbranding dan aardgas
  - (vlamsnelheid 2,7-3,5 m/s in lucht)
  - Bij lagere concentraties (10-15%) juist langzamer
- Onzichtbare vlam
- Bij verbranding geen CO/ CO_2 mogelijk



Intern gebruik

Eigenschappen van vloeibare waterstof

- Vloeibaar bij 20,3 K (- 253°C)
- Dichtheid van 70.8 kg/m3 (een volume afname met een factor of 845 vs. gasvormige H2) (ambient conditions en 20.3 K)
- LH2 is lichter dan water en drijft dus op waterige (en dus ook olie-achtige) vloeistoffen
- Bij deze lage temperaturen worden materialen bros
- Omgeving zal bij lekkage bevriezen (bv. vloeibare of zelfs vaste lucht)
  - Brandgevaar bij gelijktijdige verdamping
  - Verdringing van zuurstof in ruimte (stikgevaar)
- Verzadigde damp blijft laag hangen (totdat verdampt)



1 - liquid @ ~20 K; 2 - pressurised gas @ ~300 K; 3 - cryogenic compressed gas

Figure 1-1. Density of hydrogen in the low temperature range as a function of pressure [Klier 2012].

Intern gebruik

LH_2 Veiligheid Gevaren

Gevaren van LH2

GHS US labeling

Hazard pictograms (GHS US)	:	GHS02 GHS04
Signal word (GHS US)	:	Danger
Hazard statements (GHS US)	:	H220 - EXTREMELY FLAMMABLE GAS H281 - CONTAINS REFRIGERATED GAS; MAY CAUSE CRYOGENIC BURNS OR INJURY OSHA-H01 - MAY DISPLACE OXYGEN AND CAUSE RAPID SUFFOCATION. CGA-HG04 - MAY FORM EXPLOSIVE MIXTURES WITH AIR CGA-HG08 - BURNS WITH INVISIBLE FLAME.
Precautionary statements (GHS US)	:	P202 - Do not handle until all safety precautions have been read and understood. P210 - Keep away from heat, hot surfaces, sparks, open flames and other ignition sources. No smoking. Heat, Open flames, Sparks P271+P403 - Use and store only outdoors or in a well-ventilated place. P282 - Wear cold insulating gloves/face shield/eye protection. cold insulating gloves, protective clothing, face shield, eye protection P377 - LEAKING GAS FIRE: Do not extinguish, unless leak can be stopped safely. P381 - Eliminate all ignition sources if safe to do so. CGA-PG05 - Use a back flow preventive device in the piping. CGA-PG24 - DO NOT change or force fit connections.

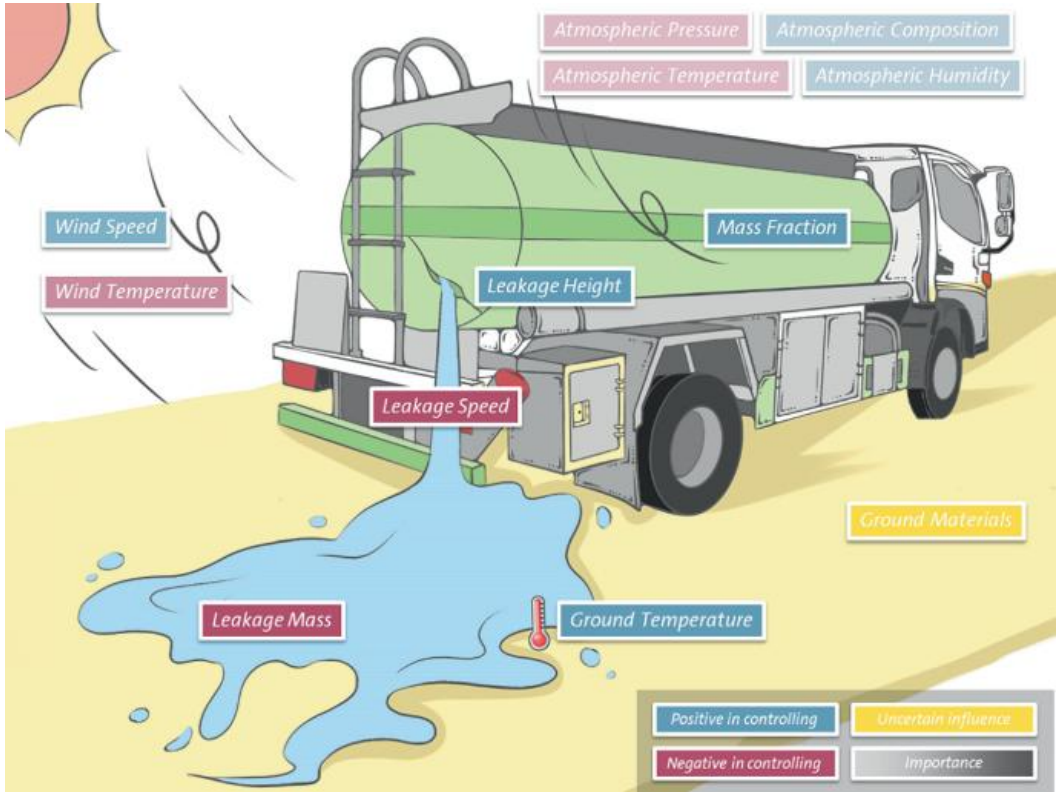
EN (English US) SDS ID: P-4603 1/9

Referentie: SDS voor LH2 van **Linde**

Intern gebruik

Lekkage van LH2 en vorming van een plas

- Lekkende LH2 zal initieel een plas vormen. Deze gaat echter heel snel verdampen.
- Indien de snelheid waarmee de vloeistof lekt groter is dan de verdampingssnelheid, zal er zich een plas vormen.
- H2 damp van een LH2 plas, is initieel zwaarder dan lucht. Maar bij 22 K is de dichtheid al gelijk aan lucht.
- De lage temperatuur maakt dat omgevingsgassen condenseren
  - Water in de lucht wordt ijs
  - Zuurstof en stikstof worden vloeibaar of stollen zelfs (vaste stof lucht)
- Door omgevingswarmte beginnen daarna alle stoffen te smelten resp. verdampen
- Mengsel kan verschillende effecten veroorzaken



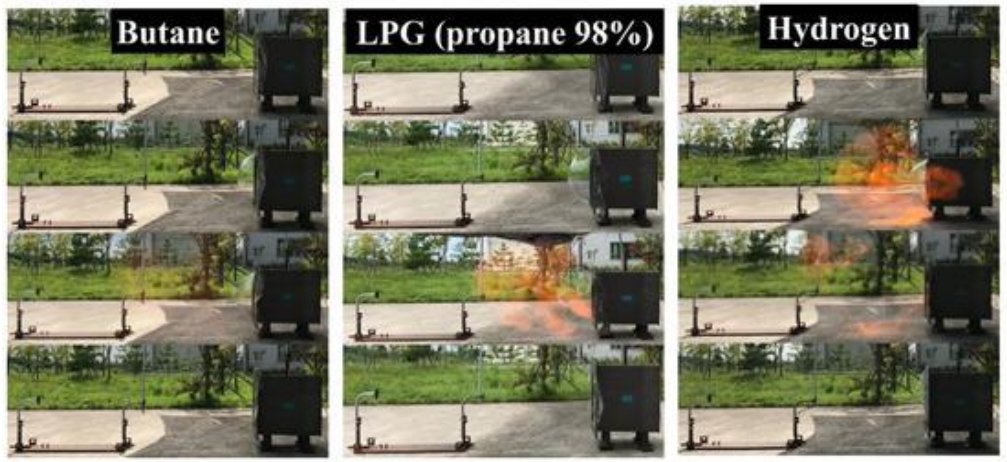
Intern gebruik

Risico van (L)H2 explosie - algemeen

(LH2 kan niet exploderen, alleen de verdampte H2 wel. Dus er wordt gekeken naar 'normale' H2 explosies.)

RIVM, Effecten van waterstofexplosies, RIVM-briefrapport 2024-0032:

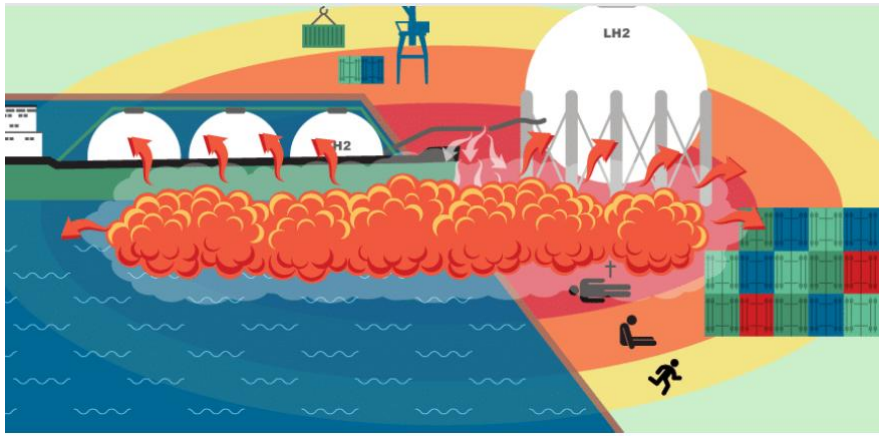
- "In vergelijking met explosies van LNG (aardgas) en LPG (propaan) zijn de effecten van een waterstofexplosie *per kilo* waterstof krachtiger.
- *Toch is een ontploffing van een LNG of LPG-opslagtank krachtiger* dan een explosie van een even grote tank waterstof. Dat komt omdat waterstof moeilijker is samen te persen. Daarom zit er in opslagtanks die even groot zijn, minder kilo waterstof dan kilo LNG of LPG."



Intern gebruik

Gevaren bij opslag van LH2

- Leidingbreuk bij lossen/laden zee-/binnenvaartschepen
- Oplopende druk door verdamping
- Boil-off
  - verlies van product
  - Brand / explosie gevaar
- Bevriezen van kleppen en afsluiters (buitenzijde)
- Intrede van lucht en/of zuurstof
  - Door volumeafname van lucht/O_2, kan er onderdruk ontstaan, wat meer lucht aantrekt van buiten
- Lekkage
  - Plasbrand
  - Fakkelbrand
  - Explosie



Intern gebruik

(Effecten van) een plasbrand bij LH2 opslag

- Er zijn slechts enkele experimenten met LH2 plasbranden gedaan. Deze lijken te duiden dat LH2 wel een constante plasbrand kan veroorzaken.
- Afhankelijk van
  - wind,
  - grootte van de plas,
  - uitstroomhoeveelheid van LH2,
  - Energieoverdracht van vlam naar vloeistof
- Een eventuele plasbrand gaat mogelijk snel over in een gaswolk brand of, bij vertraagde ontsteking, in een explosie
- Experimenten met LH2 plasbrand, vertonen soms ‘secondary explosion’

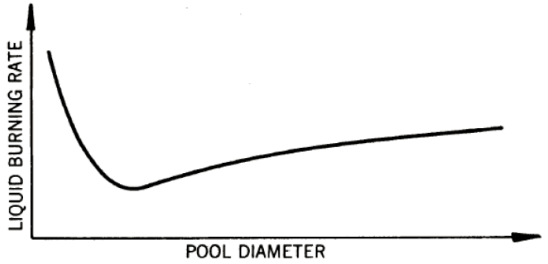


Figure 12. Qualitative liquid burning rate dependence on pool diameter

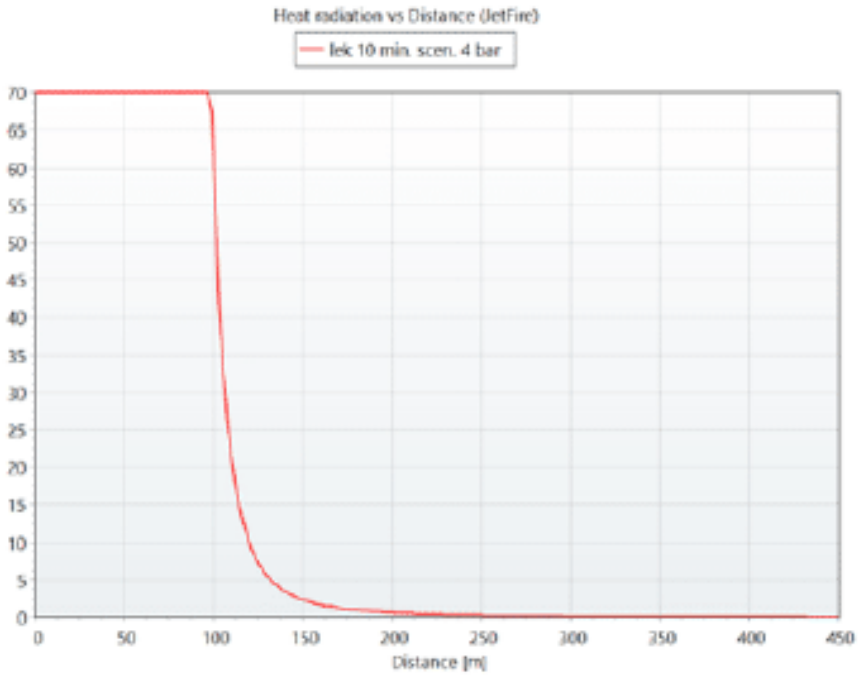
Figure 14. Ignition of the LH_2 vapor cloud during low wind conditions (no secondary explosion).

Intern gebruik

Effecten van een fakkelbrand bij LH2 opslag

Tabel 3.2 Enkele resultaten van effectberekeningen

Parameter	Waarde
Uitstromingsduur vloeistof	10 minuten
Offset fakkel	1,4 m
Lengte fakkel	92 m
Afstand bron – eind fakkel	93 m
Afstand tot 4 kW/m2	137 m
Afstand tot 10 kW/m2	120 m
Afstand tot 35 kW/m2	105 m



Figuur 3.1 Hittestraling versus afstand op 1,5 m hoogte

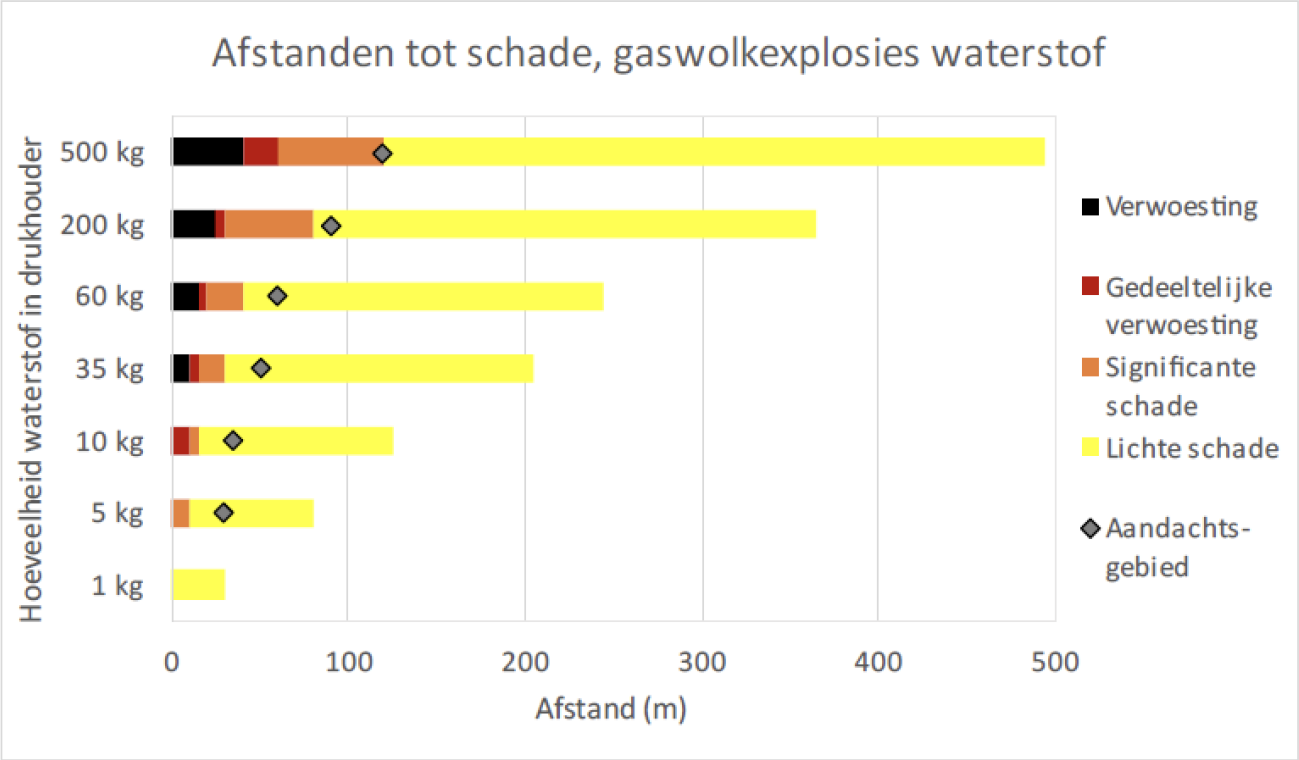
NASA experiment van LH2 brand
(t.b.v. *first stage booster* van Apollo/Saturn raket)

Intern gebruik

Effecten van explosie bij LH2 opslag

- Aangezien alleen de verdampte LH2 (dus gasvormige H2) kan exploderen, zijn de effecten gelijk aan een explosie bij ‘normale’ H2 opslag

Explosie bij experiment, waarbij LH2 tank wordt verhit met externe vlammen



Figuur 4.1 De figuur geeft aan welk soort schade kan optreden op welke afstanden van de explosie, voor verschillende hoeveelheden waterstof. Ook gegeven is de begrenzing van het explosieaandachtsgebied (overdruk = 0,1 bar). Zie Figuur 4.2 voor het gebied tussen 0 en 150 m van de ongevalslocatie.

Intern gebruik

Mogelijke oorzaken van lekkage van LH2 bij opslag

- NIPV ziet 3 scenario's:

1. Instantaan en volledig falen van een tank waardoor de gehele inhoud in één keer vrijkomt.
2. Ontstaan van een gat van zodanige grootte in de tank dat de inhoud in 10 minuten vrijkomt.
3. Afbreken van een aansluiting met uitstroming uit het ontstane gat. Als gat-grootte wordt 10 mm gehanteerd, gebaseerd op de aansluitdiameter van vrachtauto's, waarmee (over land) veelal de bevoorrading zal plaatsvinden

- (*let op: niet gekeken naar faalkans*!)

LH2 lekkage - Zichtbare damp is niet H2, maar gecondenseerde lucht

Intern gebruik

Gevaren bij (weg-)transport van LH2

- Aanrijding / ongeval
- Lekkage of slangbreuk bij laden/lossen

Daarnaast vergelijkbaar met opslag:

- Lekkage
  - Oplopende druk door verdamping
  - Boil-off
    - Brand / explosie gevaar
- Bevriezen van kleppen en koppelingen (buitenzijde)
- Intrede van lucht en/of zuurstof
  - Plasbrand
  - Fakkelbrand
  - Explosie

    (deze gevolgen zijn al beschreven)

Intern gebruik

Gevaren bij (spoor-)transport van LH2

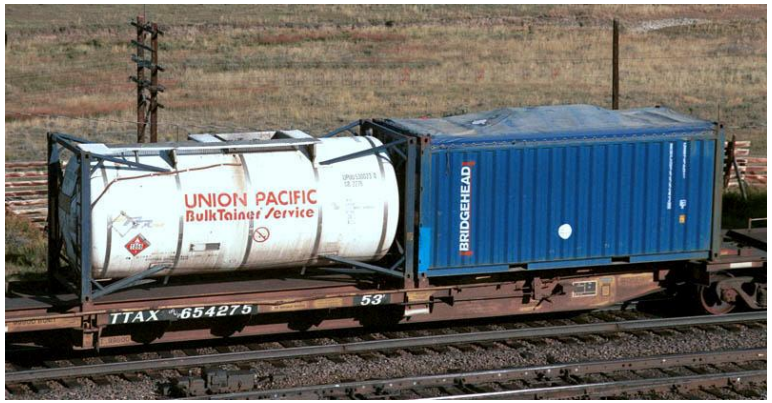
(momenteel nog niet in praktijk toegepast in Europa)

- Aanrijding / ontsporing / ongeval
- Lekkage of breuk bij laden/lossen

Daarnaast vergelijkbaar met opslag:

- Lekkage
  - Oplopende druk door verdamping
  - Boil-off
    - Brand / explosie gevaar
- Bevriezen van kleppen en koppelingen (buitenzijde)
- Intrede van lucht en/of zuurstof
  - Plasbrand
  - Fakkelbrand
  - Explosie

    (deze gevolgen zijn al beschreven)



Intern gebruik

Gevaren bij (binnenvaart-)transport van LH2

(momenteel {nog} niet toegestaan)

- Aanvaring ander schip - brug / ongeval
- Lekkage of breuk bij laden/lossen

Daarnaast vergelijkbaar met opslag:

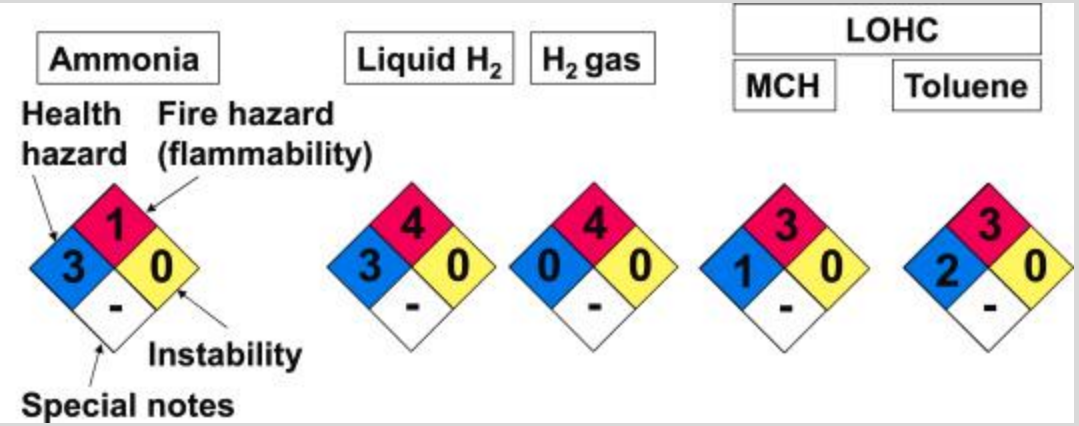
- Lekkage
  - Oplopende druk door verdamping
  - Boil-off
    - verlies van product
    - Brand / explosie gevaar

- Bevriezen van kleppen en afsluiters (buitenzijde)
- Intrede van lucht en/of zuurstof
  - (Plasbrand)
  - Fakkelbrand
  - Explosie

    (deze gevolgen zijn al beschreven)

The NASA Liquid Hydrogen Barge fleet

Intern gebruik



LH_2 Veiligheid Risico's

Risicobepaling LH2 - I

- In de MCA voor waterstofdragers, zijn voor het publieke belang Veiligheid 7 waterstofdragers met elkaar vergeleken
- Daarbij werd gekeken naar verschillende vervoersmodaliteiten, plus opslag en conversie (naar gasvormige H2)
- Veiligheid werd opgedeeld in
  - Omgevingsveiligheid
  - Transportveiligheid
  - Cyber en terrorisme veiligheid

Meest ernstige effectcategorie per calamiteit (incidentscenario)

	Meest ernstige effectcategorie per calamiteit					
Drager	Wegvervoer	Spoorvervoer	Binnenvaart	Buisleiding	Opslag	Conversie
NH_3*	gifwolk	gifwolk	gifwolk, schade boven waterlijn	gifwolk	gifwolk	gifwolk
LH_2	explosie, *bleve* (warm/koud)	explosie, *bleve* (warm/koud)	explosie	H_2-buisleiding: explosie	explosie	explosie
LOHC**	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand
MeOH	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand
LSM	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, *bleve*[1] (warm/koud)	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, *bleve* (warm/koud)	wolkbrand, (plasbrand)	CH_4-buisleiding: explosie met fakkelbrand	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, *bleve* (warm koud)	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, *bleve* (warm koud)
$NaBH_4$	explosie (bij contact met water)	explosie (bij contact met water)	explosie (bij contact met water), schade onder waterlijn	n.v.t.	explosie (bij contact met water)[2]	explosie (bij contact met water)

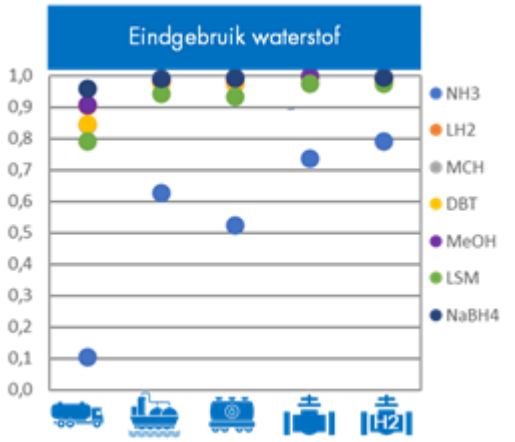
*) In de praktijk bestaat er onderscheid tussen NH_3 die vloeibaar is onder druk (warm) en die vloeibaar is door koeling (koud). De impact bij gekoeld vloeibaar is lager omdat de gifwolk zich minder snel verspreidt. Aan de andere kant zorgt het uitdampen van een plas ammoniak wel voor een langdurig ontstaan van gassen.

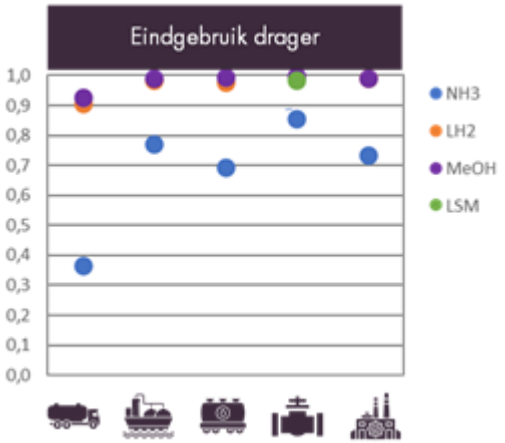
**) Bij de beoordeling in de expertsessies is geen onderscheid gemaakt tussen DBT en MCH. Beide stoffen zijn brandbaar, maar hebben geen groot effectgebied. De aanwezige hoeveelheid waterstof bepaalt vooral het aandachtsgebied en het groepsrisico. Voortschrijdend inzicht is dat er wel een verschil is tussen beide LOHC's: de hogere viscositeit

Intern gebruik

Risicobepaling LH2 - II

- De resultaten liggen dichtbij elkaar, met alleen ammoniak als duidelijke uitschieter naar beneden
- LH2 scoort redelijk in de middenmoot. Het is niet de veiligste drager
- Vergelijkbaar met LOHC's
- Maar op transportveiligheid over de weg, scoor LH2 significant beter (vergelijkbaar met LNG), dankzij geringe(re) vervoersbewegingen





	Eindgebruik waterstof								Eindgebruik drager			
	NH_3	LH_2	MCH	DBT	MeOH	LSM	$NaBH_4$		NH_3	LH_2	MeOH	LSM
	0,10	0,91	0,85	0,85	0,91	0,79	0,96		0,37	0,91	0,93	
	0,63	0,98	0,98	0,98	0,99	0,94	0,99		0,77	0,98	0,99	
	0,53	0,98	0,98	0,98	0,99	0,94	1,00		0,69	0,98	0,99	
	0,74		1,00	1,00	1,00	0,98			0,86		1,00	0,98
	0,79	0,99	0,99	1,00	1,00	0,98	1,00		0,73	0,99	0,99	

Scores Veilig ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Intern gebruik

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

LH_2 Veiligheid Maatregelen en handelingsperspectief

Preventie - Veilige opslag, transport en gebruik van vloeibare waterstof

- Het waarborgen van de veilige opslag, het transport en het gebruik van vloeibare waterstof is cruciaal voor het succes ervan als energiedrager. Belangrijke overwegingen zijn onder andere:
  - Geschiktheid van het materiaal
  - Goede isolatie
  - Drukontlasting
  - Ontlastkleppen en –ventielen
  - Bewakingssystemen
  - Standaard werkprocedures
  - Noodprocedure
  - Gas- en lekdetectie
  - Beheer van ontstekingsbronnen
  - Ventilatie en opsluiting

(Gexcon: Liquid Hydrogen safety considerations; zie bijlage voor details)

Intern gebruik

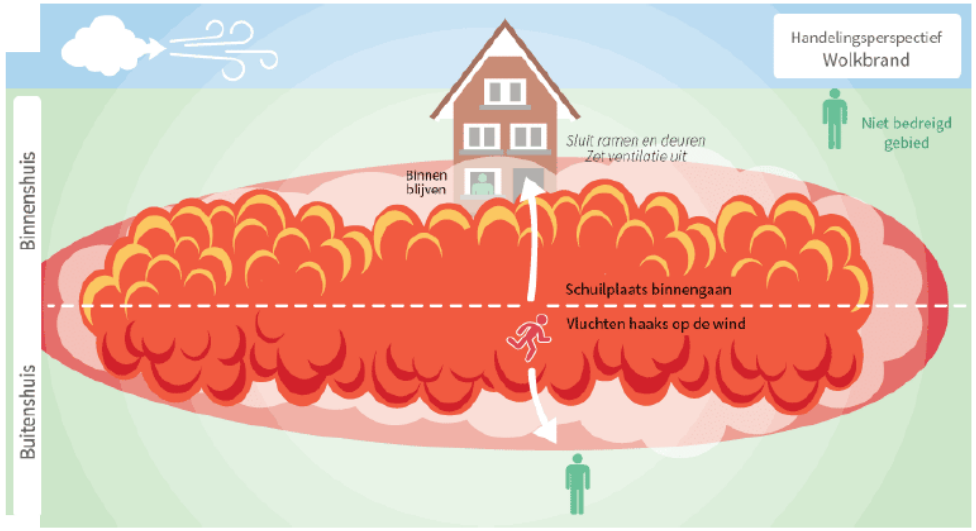
Bestrijding LH2 brand

- NIET BLUSSEN !!
  - Koude van LH2 kan/zal water doen bevriezen
  - Bij evt. doven van de vlammen, ontstaat explosief mengsel dat uit zichzelf kan ontploffen
- Ontruimen en op afstand brengen van alle aanwezigen
- Gevolgbranden (met zorg) bestrijden
- Niet brandende opslagcilinders /-tanks koelen
- Ventileren als mogelijk
- Let op: Bij vloeibaar (of vast) geworden lucht, zal stikstof eerder verdampen dan zuurstof, waardoor mogelijk zuurstof percentage kan fluctueren

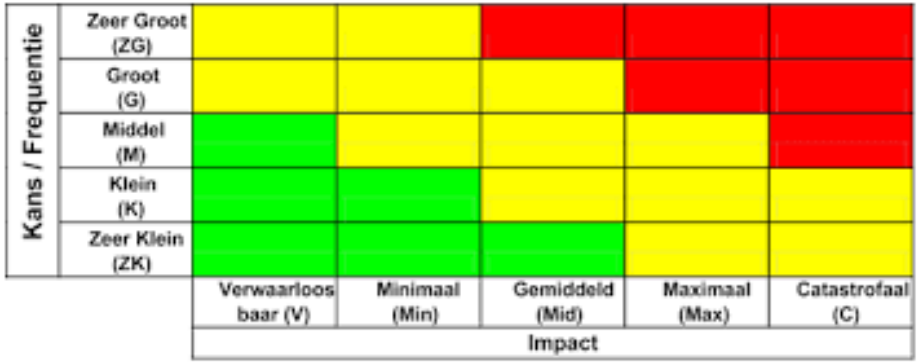
Intern gebruik

(mogelijk) Handelingsperspectief

- Afhankelijk van de situatie en de inrichting van de omgeving kan het handelingsperspectief verschillen. Snel reageren is bevorderlijk.
  - Voor personen binnen is het handelingsperspectief binnen blijven en schuilen achter een muur. Het sluiten van ramen en deuren kan soms (dicht bij de bron) helpen (ramen en deuren wijd openzetten is zeer onverstandig).
  - Voor personen buiten is het handelingsperspectief (haaks op de wind)vluchten tot (ruim) buiten de zichtbare wolk.
  - Mochten er schuilmogelijkheden zijn, dan is een schuilplaats binnengaan een goed handelingsperspectief.



Intern gebruik



Veiligheid van LH2 - conclusie

- LH2 heeft bepaalde gevaren en benodigd specifieke technische maatregelen
- Lekkage kan zeer ernstige gevolgen hebben
- De risico's (kans x effect) zijn, net als bij de meeste waterstof toepassingen, acceptabel omdat de *waarschijnlijkheid* (= kans) van grote calamiteiten gering is
- Belangrijkste maatregelen om kans klein te houden:
  - Goede isolatie
  - Koeling
  - Boil-off management
  - Integere installatie
  - Goede procedures
  - en veiligheidscultuur

Intern gebruik

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

HYDROGEN
REFRIGERATED
LIQUID

Vragen?

waterstof@rvo.nl

David Bolsman

Intern gebruik

HYDROGEN
REFRIGERATED
LIQUID

Bijlagen

Verschillende LH2 eigenschapen

Intern gebruik

Table 1 Properties of hydrogen and some comparable substances

(Values taken from a number of sources)

	Valid at		Hydrogen[1]	Methane	Propane	Heptane[3]
Boiling point	1.013 bara	K	20.4	111.6	231.1	371.5
Critical temperature		K	33.19	119.6	396.8	540.4
Critical pressure		bara	13.15	46.0	42.4	27.5
Density of liquid	Boiling point	kg/m³	70.8	422.5	580.7	680.4
Heat of vaporisation	Boiling point	kJ/kg	445.6	510.4	427.8	317.0
Density of gas	Boiling point	kg/m³	1.338	1.818	2.419	3.29
Density of gas	1.013 bara 0°C	kg/m³	0.090	0.717	2.011	4.46
Specific heat, C_p	1.013 bara 0°C	kJ/kg K	14.19	2.19	1.56	1.70[6]
Specific heat, C_v	1.013 bara 0°C	kJ/kg K	10.06	1.67	1.35	N/A
Thermal conductivity	1.013 bara 0°C	W/m K	0.1682	0.0305	N/A	0.0188[6]
Diffusion coefficient (in air)	1.013 bara 20°C	cm²/S	0.69	0.22	0.12	0.05
Limits of flammability[2]	1.013 bara 20°C	Vol.-%	4.0-75.0	5.0-15.4	2.1-9.5	1.11-6.7
Auto ignition temperature[2]	1.013 bara	°C	560	595	470	215
Minimum ignition energy[2]	1.013 bara 20°C	mJ	0.019	0.28	0.26	0.22
Theoretical temperature of flame[2]	1.013 bara	°C	2045	1875	2040	2200

1. Normal hydrogen (75% ortho and 25% para)
2. Combustion with air
3. As a representative for gasoline
4. At 0°C
5. Vapour at 25 °C
6. Vapour at 100°C

Conversion: 1bar = 10^5 Pa

Intern gebruik

Fysische eigenschappen van H2

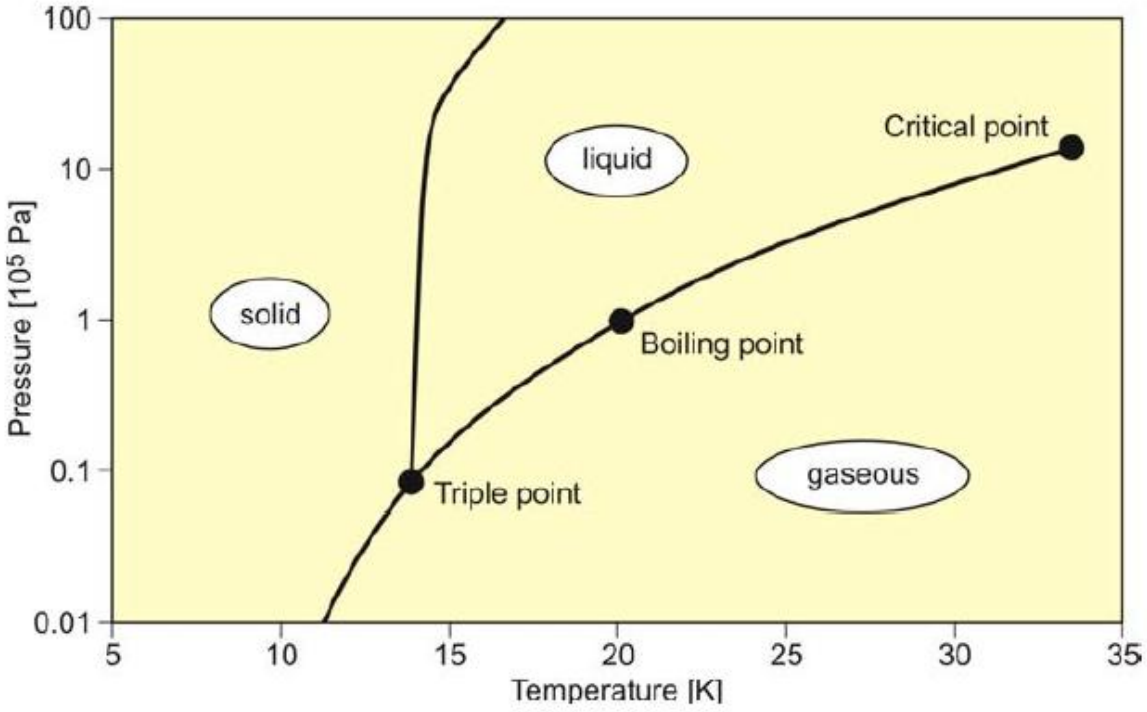


Figure 1-2. Phase diagram of hydrogen.

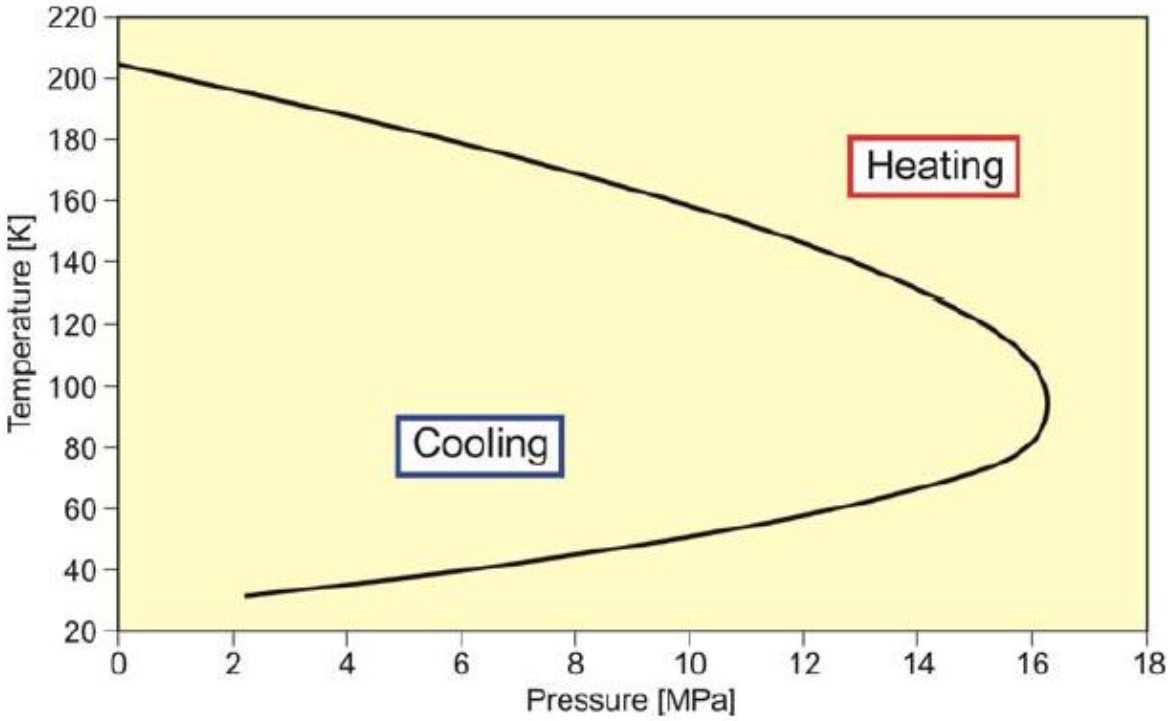


Figure 1-4. Inversion temperature of hydrogen.

Intern gebruik

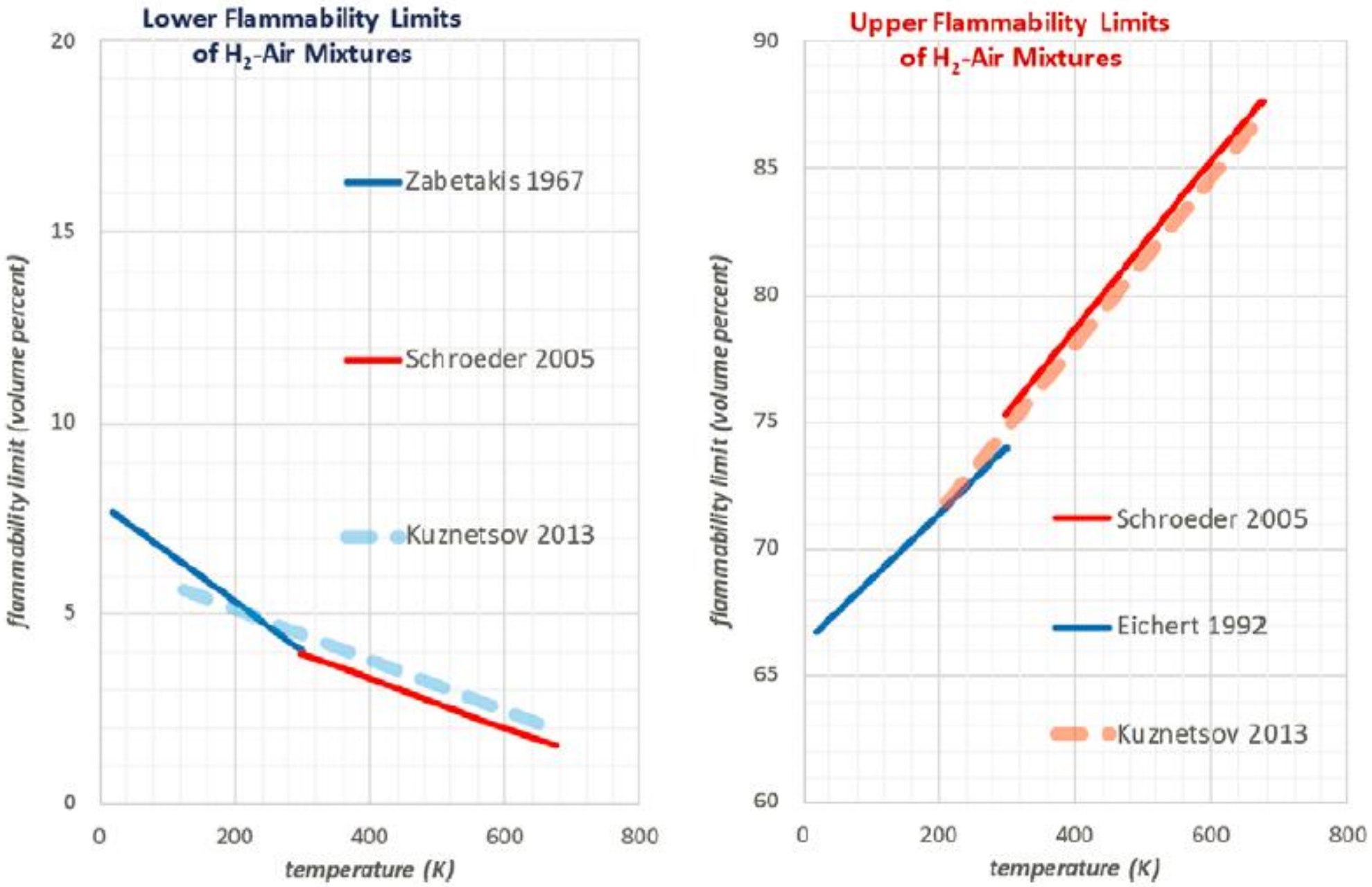


Figure 1-5. Flammability limits in hydrogen-air mixtures, LFL (left) and UFL (right).

Intern gebruik

Berekening effecten NIPV

- Dit zijn de parameters waar NIPV mee rekent voor een leidingbreuk tijdens laden/lossen van LH2

NIPV

Parameters effectberekening

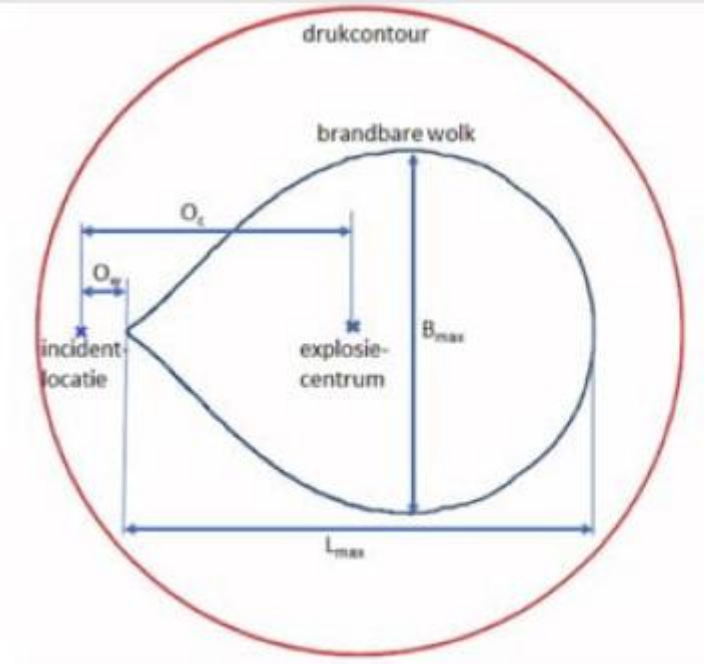
Onderstaande parameters zijn gebruikt tijdens de effectberekeningen (ontleend aan (DNV 2021) en contact met een pompleverancier).

Parameter	Waarde
Stof	Vloeibaar waterstof (LH2)
Uitstroomsnelheid	1000 m³/hr = 19,7 kg/s (1/3e van het totale pompdebiet door 3 slangen)
Uitstroomomgeving	Uitstroming op het haventerrein
Slangdiameter	200 mm
Uitstroomtijd	600 s (dan stopt Emergecy Shutdown System automatisch de uitstroom)
Omgevingstemperatuur	9 °C
Werktemperatuur	-253 °C
Perc. gaswolk ingesloten	12,5 %
Explosiecurve	10
Type omgeving	Industriegebied (ruwheidslengte: 1 m)
Weerklasse	F1,5, D5

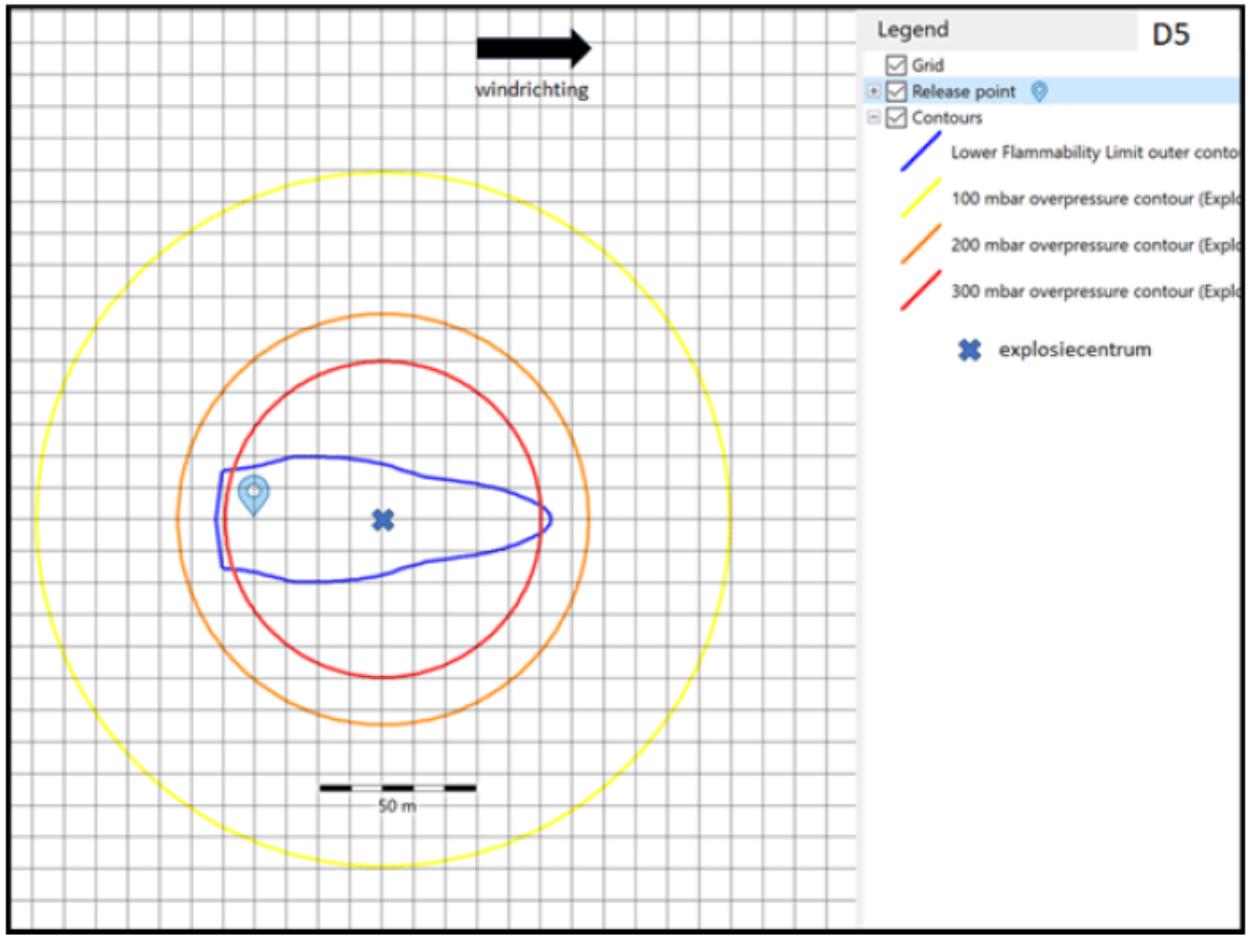
Berekeningen zijn uitgevoerd met EFFECTS versie 12.3. De berekeningen tonen aan dat al de vrijkomende vloeibare waterstof bij contact met de ondergrond of het water meteen zal verdampen en een (brandbare) wolk zal vormen. De effecten van (ontsteking) van deze wolk zijn hieronder uitgewerkt.

Intern gebruik

Explosie bij LH2



Figuur 1: Explosieve wolk en drukcontour, schematisch



Figuur 2: Explosieve wolk en overdrukcontouren D5

Intern gebruik

Resultaten NIPV

- Resultaten bij breuk leiding
- (Gebruikmakend van EFFECTS versie 12.3)

Resultaten weerklasse D5

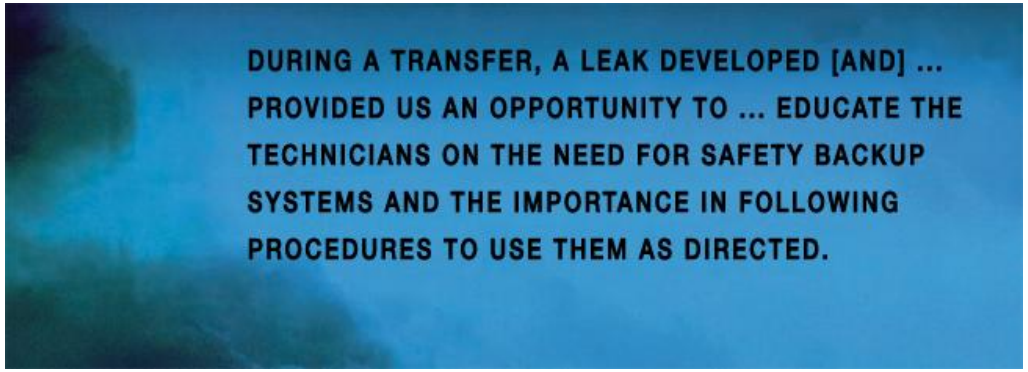
In Tabel 1 zijn de resultaten weergegeven bij weerklasse D5. Eenieder die zich binnen de brandbare wolk bevindt (de “druppelvormige” contour in Figuur 1 of de blauwe contour in Figuur 2), zal komen te overlijden. Daarbuiten zullen als gevolg van hitte geen slachtoffers vallen. Het ingesloten gedeelte van de gaswolk (12,5 %) zal bij ontsteking overdruk genereren. De schade wordt bepaald door de grootte van de overdruk (zie Tabel 2).

Parameter	Waarde
Maximale lengte brandbare wolk in richting van de wind (Lmax)	106 m
Maximale breedte brandbare wolk (Bmax)	39 m
Offset explosieve wolk bij maximaal oppervlak explosieve wolk (Ow)	-12 m
Offset centrum explosieve wolk bij maximaal oppervlak explosieve wolk (Oc)	41 m

Intern gebruik

Lessen van NASA

- Lees hier over vroege ervaringen en technische lessen en oplossingen van NASA, voor LH2 in de jaren ‘60 van de 20e eeuw:
- https://appel.nasa.gov/2011/02/02/explosive-lessons-in-hydrogen-safety/



Intern gebruik

HSE (UK) - Releases of unignited liquid hydrogen

8. MAIN FINDINGS

- The release of liquid hydrogen in contact with a concrete surface can give rise to pooling of liquid once the substrate is sufficiently cooled.
- Release of liquid hydrogen in close proximity to a concrete surface can result in subcooling due to vapourisation.
- The release of liquid hydrogen at a rate consistent with the failure of a 1 inch transfer line produces a flammable mixture at least nine metres downwind of the release point.
- The release of hydrogen at its atmospheric boiling point onto a concrete surface produces a solid deposit of oxygen and nitrogen once the substrate is sufficiently cooled.
- The solid deposit of 'oxygen/nitrogen/air' appears to trap liquid hydrogen within its matrix producing a potentially hazardous mixture.
- A release of 60 litres per minute of liquid hydrogen into free air

https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20241208025909/https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr986.htm

Intern gebruik

Veilige opslag, transport en gebruik van vloeibare waterstof - Gexcon

- Het waarborgen van de veilige opslag, het transport en het gebruik van vloeibare waterstof is cruciaal voor het succes ervan als energiedrager. Belangrijke overwegingen zijn onder andere:
- Geschiktheid van het materiaal: Tanks, vaten en apparatuur moeten geschikt zijn voor cryogene temperaturen en bestand zijn tegen broosheid en thermische schommelingen.
- Goede isolatie: Essentieel om cryogene temperaturen te handhaven en waterstofverdamping te voorkomen.
- Drukontlasting: Noodzakelijk om overdruk door vloeistofverdamping of processtoringen te voorkomen.
- Ontlastkleppen en -ventielen: Moeten ontworpen zijn voor omgevingen met vloeibare waterstof om verstoppingen en functionaliteitsproblemen door stolling van de lucht te voorkomen.
- Bewakingssystemen: Druk- en temperatuurbewaking is essentieel om hogedruk- of vloeistofverdampingsscenario's te detecteren.
- Standaardwerkprocedures: Goed opgeleid personeel en goed gedefinieerde procedures verminderen de kans op onbedoelde lozing.
- Noodprocedures: Getraind personeel en protocollen voor scenario's met vrijgave, brand en explosie zijn essentieel.
- Gas- en lekdetectie: Gecombineerd met automatische controles, zoals isolatie- en afsluitkleppen, kan potentiële lekkages worden beperkt.
- Beheer van ontstekingsbronnen: Identificeer en verwijder potentiële ontstekingsbronnen of zorg ervoor dat ze geschikt zijn voor gevaarlijke gebieden.
- Ventilatie en opsluiting: Het verminderen van congestie en opsluiting verbetert de ventilatie, bevordert de verdunning van de lekkage en vermindert de ernst van de explosie. Vermijd verticale opsluiting om een efficiënte verspreiding van de lekkages mogelijk te maken.

https://www.gexcon.com/blog/liquid-hydrogen-safety-considerations/

Intern gebruik

Vrijkomen van grote hoeveelheden vloeibare waterstof: belangrijkste resultaten en uitkomsten van modelleringsoefeningen (DNV)

- Om veiligheidsgerelateerde problemen te identificeren en te kwantificeren die mogelijk moeten worden opgelost, kreeg DNV van het Noorse Defence Research Establishment en de Public Roads Administration de opdracht een reeks experimenten uit te voeren om het gedrag van grote hoeveelheden LH2 in de atmosfeer en in een afgesloten maar geventileerde ruimte te onderzoeken.
- De bouw en exploitatie van de experimentele faciliteiten in het Research and Development Centre van DNV in Cumbria, Verenigd Koninkrijk, leverde een onderzoeksprogramma op met betrekking tot lekkageverschijnselen in de buitenlucht en in besloten ruimtes.

https://www.hazardexonthenet.net/article/186450/Large-volume-liquid-hydrogen-releases--key-results-and-outcome-of-modelling-exercises.aspx

Intern gebruik