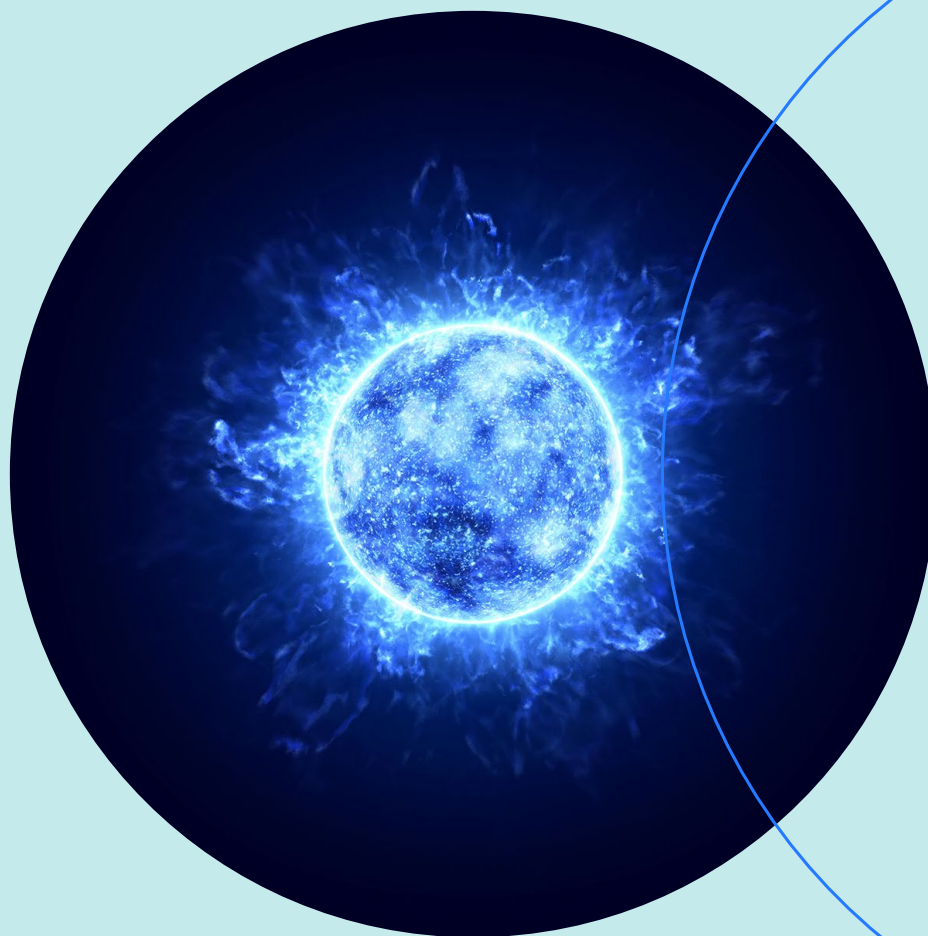


# Ontstekingskansen, directe en vertraagde ontsteking

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 in het onderhavige document is om een duidelijk beeld te geven van het ontstekingsfenomeen van waterstof en de kans dat ontsteking plaatsvindt.

## Introductie

In veel analyses wordt standaard aangenomen dat de ontstekingskans van waterstof 100% is. Dit is mede ingegeven door de lage ontstekingsenergie van waterstof, met name rond het stoichiometrische punt (net genoeg zuurstof om al het waterstof te verbranden) die tot de laagste van alle bekende gassen gerekend wordt. Bij concentraties van waterstof verder verwijderd van het stoichiometrische punt en dichterbij de vlamgrenzen (onderste en bovenste vlamgrens – 4-75 v/v%) stijgt de benodigde ontstekingsenergie aanzienlijk, zoals dat voor alle gassen van toepassing is. Het feit dat de ontstekingsenergie oploopt naarmate de concentratie waterstof verder verwijderd is van het stoichiometrische punt, wordt niet in alle analyses eenduidig onderkend. De gedachte dat een waterstofwolk met een willekeurige concentratie 100% zeker zal ontsteken, kan daarmee leiden tot onrealistische uitgangspunten en beveiligingsmaatregelen.

## Kennisvraag

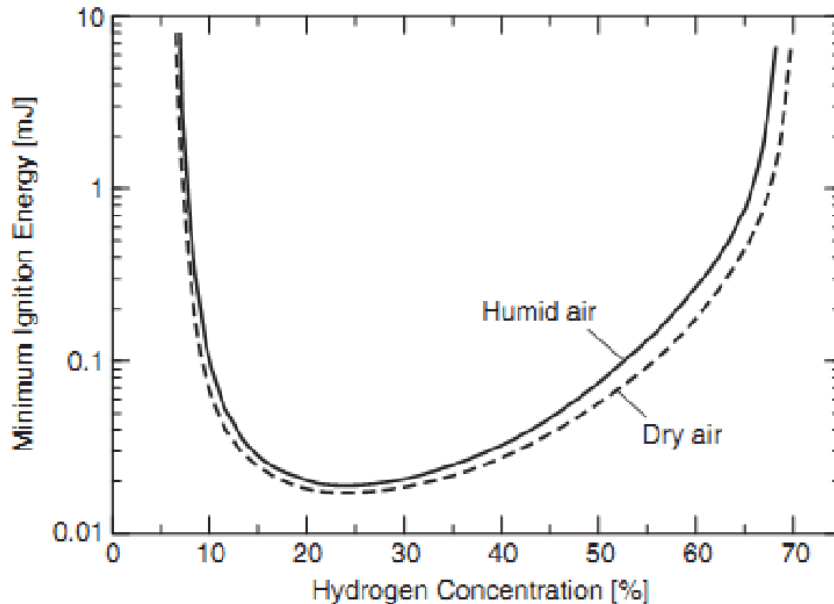
In licht van bovenstaande, zijn de volgende kennisvragen geformuleerd:

### **Wat zijn de ontstekingskansen?**

1. Wat is de kans op directe en vertraagde ontsteking?
2. Onder welke condities gelden de ontstekingskansen?
3. Kan wrijving langs de wanden van leidingen leiden tot ontsteking?
4. In hoeverre heeft de fysische toestand van het product (gas of vloeibaar) invloed op de ontstekingskansen of op vertraagde ontsteking?
5. In hoeverre hebben de procescondities (temperatuur, druk) invloed op de ontstekingskansen of op vertraagde ontsteking?
6. In hoeverre hebben operationele aspecten (stromingssnelheid, concentratie, ruwheid wand) invloed op de ontstekingskansen of op vertraagde ontsteking?
7. Kan elektromagnetische straling leiden tot ontsteking?

## Uitwerking van de kennisvraag

Om de kans op ontsteking te kunnen kwantificeren, is het van belang het ontstekingsgedrag van waterstof/luchtmengsels te begrijpen. De ontstekingsenergie van waterstof in lucht is weergegeven in Figuur 1 [1, 2]. Rond het stoichiometrische punt (30% waterstof in lucht) bedraagt de zogenaamde minimale ontstekingsenergie 0,02 mJ. Ter vergelijking, de minimale ontstekingsenergie van aardgas (methaan) is 0,3 mJ.



**Figuur 1.** Ontstekingsenergie van waterstof in lucht als functie van de concentratie waterstof [1, 2].

Gezien de lage ontstekingsenergie is het vaak de verwachting dat dit daarmee geldt voor ieder willekeurig waterstof/lucht mengsel.

### 1.1. Kans op directe en vertraagde ontsteking?

Om de ontstekingswaarschijnlijkheid van waterstof/luchtmengsels te kunnen definiëren, dient de waarschijnlijkheid dat er een ontvlambare atmosfeer ontstaat te worden vastgesteld en vervolgens moet de waarschijnlijkheid van ontsteking van die ontvlambare atmosfeer worden bepaald. Dit is van vele parameters afhankelijk, waardoor de modelmatige aanpak van de ontstekingskans een complexe oefening kan worden. Desalniettemin is er een aantal berekeningsmethoden voorgesteld.

Voor het bepalen van de ontstekingskans gaat Moosemiller [3] uit van de som van de kans op zelfontbranding en de kans op statische ontlading. Daarbij neemt Moosemiller [3] aan dat de kans dat een waterstof/luchtmengsel vrijkomt in een ruimte met een temperatuur boven de zelfontbrandingstemperatuur van dat mengsel, nul is. Daarmee reduceert de directe ontstekingskans voor waterstof/luchtmengsels ten gevolge van electrostatische vonken tot:

$$P_d = 0,0024 * \frac{P^{\frac{1}{3}}}{MIE^{\frac{2}{3}}}$$

Waar  $P_d$  de directe ontstekingskans is,  $P$  de druk in MPa en MIE de minimale ontstekingsenergie in mJ.

Voor de vertraagde ontstekingskans van een waterstof/luchtmengsel is de grootte van de brandbare wolk en de locatie van de wolk ten opzichte van mogelijke ontstekingsbronnen van belang. Hiertoe heeft Moosemiller [3] de volgende relaties ontwikkeld:

$$P_v = 1 - \left[ \frac{0,7}{(F_{MIE} * F_{debiet} * F_{duur} * F_{lokatie})} \right] \text{ voor } F_{MIE} * F_{debiet} * F_{duur} > 1$$

$$P_v = 0,3 * F_{MIE} * F_{debiet} * F_{duur} * F_{lokatie} \text{ voor } F_{MIE} * F_{debiet} * F_{duur} < 1$$

Tchouvelev et al. [5] en Rodsaetre en Holmefjord [6] hebben een waarschijnlijkheid op basis van leksnelheid en de initiële druk voorgesteld, zie tabel 1. Er dient hierbij opgemerkt te worden dat er bij het vaststellen van de waarschijnlijkheid geen rekening is gehouden met gasaccumulatie in een (deels) gesloten ruimte en/of de aanwezigheid van obstakels.

Tchouvelev et al. [5] hebben hun analyse gebaseerd op het plaatsen van een waterstoftankstation in de nabijheid van de bebouwde omgeving. Voor de risicoanalyses zijn verschillende scenario's doorgerekend waarbij waterstof kon vrijkomen gedurende de levensduur van een dergelijk tankstation. Voor de ontstekingswaarschijnlijkheid is uitgegaan van de historische gegevens in de DNV database en dit is – net zoals Moosemiller [3] – de som van de kans op zelfontbranding en de kans op statische ontlading. Er dient hierbij vermeld te worden dat de DNV database is gebaseerd op data van offshore platforms en daarmee op de ontstekingskansen van koolwaterstof. Dit is niet zonder meer één-op-één vertaalbaar naar een onshore omgeving en waterstof. Omdat waterstof in lucht brandbaar is over een groot concentratiebereik (zie Figuur 1), lijkt het voor de hand liggend dat de kans op een vertraagde ontsteking hoger is dan voor bijvoorbeeld methaan. Echter, door de verhoogde dispersie van waterstof ten opzichte van methaan wordt dit deels teniet gedaan. Vooral bij kleine lekken is daarmee de kans op ontsteking klein (zie Tabel 1). Volgens Tchouvelev et al. [5] is bij een steeds groter wordend lek, de kans groter dat een deel van die wolk een concentratie heeft die groter is dan 16%. Tot en met dit percentage is de benodigde ontstekingsenergie vergelijkbaar met die van methaan.

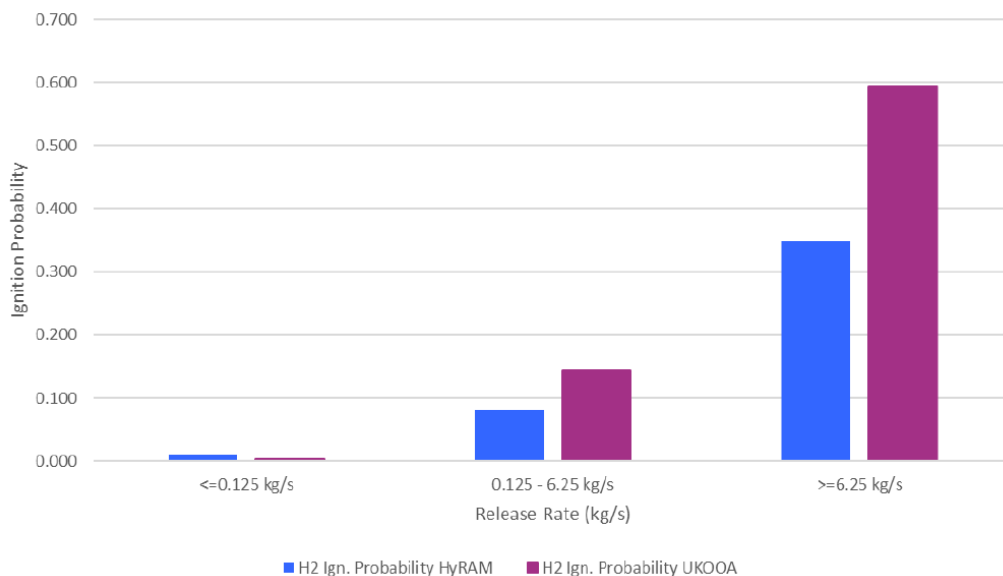
**Tabel 1.** Ontstekingswaarschijnlijkheid op basis van leksnelheid [5, 6]

Leksnelheid [kg/s]	Tchouvelev [5]			Rodsaetre [6]
	Directe ontsteking	Vertraagde ontsteking	Totale kans ontsteking	Directe ontsteking
0,01 – 0,1				0,001
< 0,125	0,008	0,004	0,012	
0,1 – 1				0,001 0,002 P > 100
0,125 – 6,25	0,053	0,027	0,08	
> 6,25	0,23	0,12	0,35	
1 – 10				0,01 0,02 P>100
> 10				0,10 – 0,12

De totale ontstekingskans is de som van de gemiddelde kansen voor onmiddellijke en uitgestelde ontsteking. De HyRam softwaretool [7] heeft de waarden van Tchouvelev et al. [5] geïmplementeerd.

Verder is de waarde van de totale ontstekingskans door de NFPA (National Fire Protection Agency) als acceptabel beschouwd [8]. De waarden van Rodsaetre en Holmefjord [6] zijn alleen gebaseerd op zelfontbranding van de brandbare waterstof/luchtmengsel en zijn daarmee lager dan die van Tchouvelev et al. [5].

Guzzetta en Richardson [9] geven juist aan dat de waarden waar HyRam [7] mee rekt wellicht aan de (te) lage kant zijn, waardoor het risico wordt onderschat. Gebaseerd op data en modellen van de UK Offshore Operators Association (UKOOA) hebben Guzzetta en Richardson [9] de ontstekingskansen berekend en vergeleken met de data van HyRam [7].



**Figuur 2.** Ontstekingskansen volgens modellen en data van de UK Offshore Operators Association (UKOOA), vergeleken met die van HyRam [9].

Wen et al. [10] hebben een analyse uitgevoerd naar de consequenties van ontsteking op basis van de Hydrogen Incidents and Accidents Database (HAID) 2.0. Bij 56% van de incidenten was er sprake van een explosie, bij 28% een brand en in 13% van de gevallen was er geen ontsteking (naast 3% bijna-ongelukken). Echter, op basis van deze data kunnen geen verstrekkende conclusies worden getrokken over de ontstekingskansen, omdat de database daartoe te eenzijdig is. Om een ontstekingskans te kunnen vaststellen, moeten ook alle bijna-ongelukken, niet-ongelukken en kleine lekkages worden meegenomen.

In de nabije toekomst zal er een DNV rapport worden gepubliceerd waarin expliciet is gekeken naar de ontstekingskansen van waterstof. Hierbij is op basis van een uitgebreid incidenten casuïstiek een vergelijking gemaakt met de ontstekingskansen die door het HYEX en HYRAM model voorspeld worden. De conclusie is dat deze modellen de ontstekingskansen bij lage uitstroomdebieten onderschatten.

## 1.2. Onder welke condities gelden de ontstekingskansen?

Het merendeel van de informatie zoals beschikbaar in de DNV database gaat uit van het vrijkomen van waterstof in de atmosfeer, ofwel atmosferische druk en temperatuur ten tijde van de lekkage.

## 1.3. Kan wrijving langs de wanden van de leidingen leiden tot ontsteking?

Er is geen literatuur gevonden waarin de kans op ontsteking van een waterstof/luchtmengsel ten gevolge van wrijving langs de wanden van een pijpleiding is onderzocht.

#### 1.4. In hoeverre hebben de fysische toestand van het product (gas of vloeibaar) invloed op de ontstekingskans of op vertraagde ontsteking?

Uitgaande van een lekkage in de atmosfeer, zal het gasvormige waterstof zich opmengen met lucht en steeds verder verdunnen. In geval van vloeibaar waterstof, zal er – zolang de vloeistof aanwezig is – een continue toevoer van waterstof zijn. Daarmee bestaat er een kans dat de wolk groter zal zijn dan in geval van een lek met gasvormig waterstof en daarmee is ook de kans dat de wolk zich bij een ontstekingsbron kan bevinden groter.

#### 1.5. In hoeverre hebben de procescondities (temperatuur, druk) invloed op de ontstekingskans of op vertraagde ontsteking?

Niet alleen voor waterstof, maar voor alle brandbare mengsels geldt de stelregel [11] dat de ontstekingsenergie verlaagd wordt bij een hogere druk en temperatuur.

#### 1.6. In hoeverre hebben operationele aspecten (stromingsnelheid, concentratie) invloed op de ontstekingskans of op vertraagde ontsteking?

Het effect van concentratie op de ontstekingsenergie is weergegeven in Figuur 1. Rondom het stoichiometrische punt is de benodigde energie het laagst en daarmee wordt de kans dat er een ontstekingsbron van deze sterkte zich in de wolk kan bevinden groter. Zoals genoemd in paragraaf 1.1 is de kans dat in de praktijk een wolk wordt gevormd met stoichiometrische concentratie laag.

Bij een hoge uitstromingsnelheid door een lek, kunnen er schokgolven worden gevormd. Indien het waterstofgas onverhoopt vanaf het lek door een leiding stroomt en tegelijk met lucht kan opmengen (bijvoorbeeld afzuiginstallatie), kunnen de schokgolven voor een compressie-effect leiden die de zelfontbrandingstemperatuur van het mengsel overschrijdt.

#### 1.7. Kan elektromagnetische straling leiden tot ontsteking?

Elektromagnetische straling is één van de 13 potentiële ontstekingsbronnen die een explosie kan veroorzaken [12]. In de praktijk komt dit weinig voor.

### Conclusies

Op basis van historische data is een voorzichtige schatting te geven van de mogelijke ontstekingskans van een waterstof/luchtmengsel. De ontstekingskans is een functie van een groot aantal parameters, waarbij de grootte van de wolk, de concentratie waterstof, de uitstroomsnelheid en de mogelijke opsluiting van de wolk de belangrijkste parameters zijn. Op basis van de historische gegevens kan gesteld worden dat de aanname dat een willekeurig waterstof/luchtmengsel 100% zeker zal ontsteken aan de conservatieve kant is.

### Aanbevelingen

Een bredere studie naar de kans op ontsteking van waterstof/luchtmengsels. Er is een database beschikbaar van DNV. Om deze statistisch nog betrouwbaarder te maken, alsmede om als input te fungeren voor modellen, is meer informatie nodig. Met de energietransitie zal de verwachte instroom van informatie gestaag toenemen.

## Referenties

1. Brunett, A. J. (2013). *The assessment of low probability containment failure modes using dynamic PRA*. PhD Dissertation, The Ohio State University.
2. Brunett, A., Denning, R., & Aldemir, T. (2014). A Reassessment of Low Probability Containment Failure Modes and Phenomena in a Long-Term Station Blackout. *Nuclear Technology*, 186(2), 198-215.
3. Moosemiller, M. (2011). Development of algorithms for predicting ignition probabilities and explosion frequencies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(3), 259-265.
4. Spoelstra, M.B. (2020). Safety Aspects relating to the use of hydrogen in confined spaces, Instituut Fysieke Veiligheid (IFV) rapport.
5. Tchouvelev, A., Hay, R., & Benard, P. (2007). Comparative risk estimation of compressed hydrogen and CNG refuelling options. In *Proceedings of National Hydrogen Association Conference* (pp. 19-22).
6. Rodsaetre, L. K., & Holmefjord, K. O. (2007). An ignition probability model for hydrogen risk analysis. *Det Norske Veritas, HYSAFE Deliverable*, 71.
7. [Hydrogen Risk Assessment Models \(HyRAM\) | Hydrogen Tools \(h2tools.org\)](https://h2tools.org)
8. LaChance, J. L., Houf, W. G., Fluer, L., & Middleton, B. (2009). *Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards* (No. SAND2009-0874). Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States).
9. Guzzetta-King, J.A. and Richardson, S. (2023). Safety calculations for emerging technologies, International Conference of Hydrogen Safety, Quebec City, Canada, 19-21 September, 2023.
10. Wen, J. X., Marono, M., Moretto, P., Reinecke, E. A., Sathiah, P., Studer, E., ... & Melideo, D. (2022). Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(38), 17082-17096.
11. Eckhoff, R. K. (2016). *Explosion hazards in the process industries*. Gulf Professional Publishing.
12. NEN-EN, 1127-1. Plaatsen waar explosiegevaar kan heersen - Explosiepreventie en -bescherming - Deel 1: Grondbeginselen en methodologie, 2019.