



**Onderzoek Risico's, effecten
en handelingsperspectief bij
incidenten met
waterstofdragers**

Antea Group

Understanding today.
Improving tomorrow.

projectnummer 0502980.100
definitief revisie 4.0
13 februari 2026

Onderzoek Risico's, effecten en handelingsperspectief bij incidenten met waterstofdragers

projectnummer 0502980.100
definitief revisie 4.0
13 februari 2026

Auteur(s)

Adviesgroep SAVE

Opdrachtgever

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Postbus 20906
2500 EX Den Haag

Colofon

Projectgroep

Antea Group
NIPV

Tekstbijdragen

- Gezamenlijke Brandweer Rotterdam
- H2K

datum
13 februari 2026

beschrijving
Definitief

vrijgave
MB

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Dit rapport	4
1.3	Scope	5
1.4	Aanpak	5
1.5	Leeswijzer	6
2.	Uitgangspunten en gehanteerde methodiek	7
3.	Algemene kenmerken vervoersmodaliteiten	10
3.1	Inleiding	10
3.2	Verlading zeeschepen	10
3.3	Binnenvaart	11
3.4	Spoorvervoer	11
3.5	Wegvervoer	12
3.6	Buisleiding	13
4.	Kenmerken en incidenten per waterstofdrager	14
4.1	Waterstof	14
4.1.1	Waterstof (GH ₂), gasvormig, onder (hoge) druk	15
4.1.2	Waterstof (LH ₂), gekoeld vloeibaar gemaakt	18
4.2	Ammoniak	20
4.2.1	Warm ammoniak	21
4.2.2	Koud ammoniak	24
4.3	Methanol	26
4.4	Liquid Synthetic Methane (LSM)	29
4.5	Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's)	33
4.6	Boorhydrides (natrium- en kaliumboorhydrides)	37
5.	Handelingsperspectief brandweer	41
6.	Analyse	43
6.1	Algemeen	43
6.2	Vergelijking en scores modaliteiten	43
6.3	Vergelijking en scores transport waterstofdragers	44
6.4	Toets Kabinetsvisie waterstofdragers aan bevindingen	45
7.	Conclusies	47
8.	Aanbevelingen	48
	Bijlage 1 Bronnenlijst	51
	Bijlage 2 Deelnemers workshops, begeleidingsgroep, klankbordgroep	55
	Bijlage 3 Presentatie Workshop 1 & 2 - werkwijze uitwerking in de workshops	57
	Bijlage 4 Tabel eigenschappen en gevaren van waterstofdragers	60

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

De energievoorziening van Nederland moet in 2050 helemaal duurzaam zijn. De grondstoffen- en energietransitie behelst de omschakeling van fossiele brandstoffen naar nieuwe energiedragers om duurzame, betrouwbare en beschikbare energie in de komende decennia mogelijk te maken. De belangrijkste nieuwe energiedragers zijn waterstof en stoffen als ammoniak die waterstof als het ware met zich meedragen (waterstofdrager).

De Nederlandse beleidskennis over veiligheid, risico's, gebeurtenissen en effecten van energiedragers is voornamelijk gebaseerd op de huidige (fossiele) brandstofeconomie. Het is onduidelijk of deze inzichten geheel of volledig toepasbaar zijn op nieuwe waterstofdragers. Er is onzekerheid over de schaalgrootte van ontwikkelingen, over de (omvang van de) effecten van incidenten bij het transport en over de risico's bij overslag van grote volumes waterstofdragers in de diverse vormen van transport. De ligging van de transportroutes en de omvang van de stromen bepalen in hoge mate hoe groot de risico's zijn, welke effecten kunnen optreden en hoe effectief de bestrijding daarvan kan zijn. Daarmee raakt deze opdracht direct aan de kabinetsvisie waterstofdragers (Kamerbrief 90538788, hierna genoemd: de Kabinetsvisie waterstofdragers), waarin veilige toepassing en transport van waterstofdragers als randvoorwaarde voor de energietransitie worden genoemd.

1.2 Dit rapport

De onderzoeksvraag omvat zowel het inventariseren van de meest actuele kennis en stand van zaken met betrekking tot de risico's, effecten en handelingsperspectieven / (on)mogelijkheden voor incidentbestrijding bij incidenten en ongevallen met waterstofdragers tijdens transport, als het ontginnen van nieuwe kennis en inzichten en het identificeren van gebieden waar verdere kennisontwikkeling noodzakelijk is. Daarnaast is verzocht om op basis van de bevindingen de voorkeursvolgorde uit de Kabinetsvisie Waterstofdragers te toetsen.

Het gaat hierbij om de volgende waterstofdragers:

1. Waterstof (gH₂), gasvormig, onder (hoge) druk
2. Waterstof (LH₂), gekoeld vloeibaar gemaakt
3. Ammoniak – warm – onder druk, in samengeperste vorm
4. Ammoniak – koud, gekoeld vloeibaar gemaakt
5. Methanol
6. Liquid Synthetic Methane (LSM)
7. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's)
8. Boorhydrides (natrium- en kaliumboorhydrides)

Per waterstofdrager wordt inzicht gegeven in de eigenschappen en gevaren van de betreffende stof. Vervolgens wordt per vervoermodaliteit (buis, water, spoor, weg) inzicht gegeven in mogelijke (realistische) scenario's. De scenario's helpen om binnen korte tijd veel informatie te verzamelen op basis waarvan inzage kan worden gegeven in het handelingsperspectief voor de incidentbestrijding van de brandweer. We baseren ons hierbij op reeds beschikbare kennis, onderzoeken en scenario-uitwerkingen. Per scenario wordt op globale wijze beschreven wat er gebeurt en welke inzetmogelijkheden de brandweer heeft. Het onderzoek gaat niet in op het voorkomen van een incident, de vraag betreft uitsluitend het mogelijk effect in geval van een incident.

Per modaliteit wordt kort ingezoomd op de kenmerken en wordt een globaal overzicht gegeven van de bestaande wet- en regelgeving voor vervoer, dit betreft doorgaans wet- en regelgeving in Europees en in geval van zeevaart internationaal verband. Deze wet- en regelgeving is er met name op gericht om een incident te voorkomen. In algemene zin kan gesteld worden dat deze preventieve focus terug te vinden is in de casuïstiek: er zijn in Nederland geen transportongevallen bekend waarbij sprake is van een grootschalige uitstroming tijdens transport met effecten in de omgeving (externe veiligheid).¹

1. Bron: ILenT.

Afsluitend wordt indien mogelijk een aanzet gedaan tot het geven van een voorkeursvolgorde vanuit veiligheidsoptiek voor transport per waterstofdrager. Hierbij merken we voor de volledigheid op dat de keuze voor modaliteit doorgaans van andere factoren afhangt, zoals beschikbaarheid modaliteit, bereikbaarheid, klantwens, volumestroom, etc.

1.3 Scope

Het onderzoek raakt een groot aantal onderwerpen: de verschillende waterstofdragers met hun specifieke eigenschappen en gevaarsaspecten, de verschillende modaliteiten en de bijbehorende (veiligheids-)eisen en regelgeving aangaande mogelijkheden voor transport, de mogelijkheden voor de brandweer om een incident te bestrijden en uiteindelijk de vraag of op basis van de bevindingen van deze studie een antwoord kan worden gegeven op de vraag of de in de Kabinetsvisie waterstofdragers genoemde voorkeursvolgorde voor het transport van ammoniak voor wat betreft het veiligheidsaspect aansluit op de bevindingen uit deze rapportage. Alle voornoemde onderwerpen worden behandeld maar het valt buiten de scope om per onderwerp een diepgaande analyse en overzicht mee te nemen in dit rapport. Wel zijn bronnen opgenomen waar meer informatie in gevonden kan worden.

Het onderzoek richt zich op bulkvervoer van waterstof en potentiële waterstofdragers. Het lossen van een zeeschip valt specifiek binnen de scope van dit rapport: dit is feitelijk geen vervoersmodaliteit, maar vanuit het oogpunt van risico wil IenW dit proces graag meenemen in deze studie. Het bunkeren van schepen valt buiten de scope.

Het onderzoek richt zich op de situatie binnen Nederland (op het land), mogelijke incidenten op zee vallen buiten de scope van dit onderzoek.

Tenslotte valt de kans op het voorkomen van een incident buiten de scope. Ten behoeve van de onderzoeksvraag is wel gewerkt met een inschatting van de kans op een incident zonder in te gaan op maatregelen om de kans te reduceren.

1.4 Aanpak

Voor het onderzoek is een consortium samengesteld van vier organisaties met uitgebreide en actuele kennis: Antea Group, het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), H2K en de Gezamenlijke Brandweer Rotterdam Rijnmond (GB). Antea Group en het NIPV verzorgden het onderzoek en de rapportage, aangevuld met specifieke kennis en ervaring van H2K en GB.

- **Antea Group** is een ingenieurs- en adviesbureau op het gebied van onder andere milieu, veiligheid, energietransitie, infrastructuur, stedenbouw en water. Het Expertisecentrum Ammoniak & Waterstof binnen Antea Group geeft advies, inzichten en begeleiding aan bedrijven en overheden over waterstof en ammoniak.
- Het **NIPV** is een publiek kennisinstituut voor crisisbeheersing en brandweezorg. De kerntaken zijn onder andere het doen van onderzoek, het ontwikkelen en geven van landelijke les- en leerstof en het organiseren van kennisuitwisseling. Het lectoraat Energie- en Transportveiligheid heeft de kennis in huis om de risico's van waterstof(dragers) te duiden, de effecten ervan te berekenen, en de incidentbestrijding hiervan te doorgronden.
- **H2K** is specialist in het verzorgen van brandweeropleidingen, het geven van praktijktrainingen en het adviseren en ondersteunen van bedrijven in de hoog risico-industrie. Advies en trainingen richten zich veelal op het grensvlak tussen de theoretische veiligheid en het praktisch vakmanschap. H2K geeft al bijna 20 jaar trainingen over de bestrijding van ammoniakincidenten en vloeistofbranden en de inzet van blusschuim bij incidenten met gevaarlijke stoffen.
- De **GB** verzorgt de brandbestrijding en hulpverlening voor zo'n zestig bedrijven (waaronder een ammoniakterminal) in het haven- en industriegebied van Rotterdam en voor de Gemeente Rotterdam. In dit gebied zal zich de komende jaren de opslag, verlading, transport en kraken van ammoniak concentreren. Als er zich een incident voordoet met ammoniak, dan is de kans groot dat dat in het Rotterdamse plaatsvindt. De GB heeft belang bij kennis en inzicht in het bestrijden van ammoniakincidenten, maar kan ook mensen leveren voor het beoefenen van de inzettechnieken.

Voor deze studie is gebruik gemaakt van beschikbare literatuur, documenten en eerdere onderzoeken. De opgedane kennis is verwerkt in dit rapport. Bijlage 1 geeft een overzicht van de onderzoeken die door het consortium als relevant en betrouwbaar zijn beschouwd.

De informatie gevonden in de literatuur is de basis geweest voor het vervolg van het onderzoek. Per gevaarlijk effect (brand, explosie, toxisch) zijn op basis van de uit de literatuur verkregen informatie workshops georganiseerd om met vakinhoudelijke specialisten van het consortium aangevuld met vakinhoudelijke specialisten van bedrijven mogelijke incidentscenario's door te nemen en op basis van parate kennis en ervaring de handelingsperspectieven van de brandweer bij die scenario's te verkennen. De eerste workshop (op 25 september 2025) was gefocust op waterstofdragers met brand- en explosiegevaar en de tweede workshop op waterstofdragers met toxisch gevaar – voornamelijk ammoniak (op 8 oktober 2025).

Bij de tweede workshop waren de volgende partijen ook aanwezig om hun kennis en ervaring in te brengen:

- Ebert Hera (voorheen Sitech) (levert de bedrijfsbrandweer op het terrein van Chemelot);
- OCI Nitrogen (jarenlange ervaring met de stof ammoniak);
- Yara Sluiskil (als producent van kunstmest jarenlange ervaring met de stof ammoniak).

De workshops zijn uitgevoerd aan de hand van vooraf opgestelde scenario's. Deze scenario's vormden de basis voor de discussie en kennisdeling, waarbij de handelingsperspectieven van de brandweer zijn verkend. De uitkomsten van de workshops zijn gebruikt voor het opstellen van het rapport. Zie ook paragraaf 2.

Naast de workshops is er ook een klankbordgroep georganiseerd om waar nodig aanvullingen te geven tijdens de projectuitvoering, om informatie aan te leveren en een reactie te geven op tussen- en eindresultaten. Met enkele leden van de klankbordgroep heeft aanvullende een gesprek plaatsgevonden op specifieke kennis. Daarnaast vonden besprekingen plaats met de begeleidingsgroep, bestaande uit vertegenwoordigers van de ministeries I&W, J&V en KGG.

De betrokkenen van het consortium, de klankbordgroep en de begeleidingsgroep zijn opgenomen in bijlage 2. De opzet en ruwe resultaten van de workshops staan beschreven in de PowerPointpresentatie opgenomen in bijlage 3. Met rode tekst is aangegeven wat tijdens de workshops is besproken en wat de samenvatting is van de discussies en het delen van de kennis.

1.5 Leeswijzer

In **hoofdstuk 2** van dit rapport zijn de uitgangspunten en onderbouwing van de scenario's beschreven. In **hoofdstuk 3** en **hoofdstuk 4** is ingegaan op de algemene kenmerken van vervoersmodaliteiten respectievelijk op de kenmerken per waterstofdrager. In **hoofdstuk 5** zijn de uitgangspunten ten behoeve van deze studie voor het handelingsperspectief van de hulpverlening (brandweer) opgenomen, waarna in **Hoofdstuk 6** de analyse van de bevindingen volgt. **Hoofdstuk 7** bevat een overzicht van de conclusies waarna tenslotte in **hoofdstuk 7** een opsomming van aanbevelingen voor vervolgonderzoek zijn genoemd.

2. Uitgangspunten en gehanteerde methodiek

Er zijn talloze mogelijke incidentscenario's denkbaar, gezien de acht typen waterstofdragers en vijf vervoersmodaliteiten. Het doel van het onderzoek is echter om een eerste overzicht te geven van de beschikbare kennis op dit onderwerp. Om binnen korte tijd een zo volledig mogelijk eerste overzicht te verkrijgen is de hierna beschreven aanpak gevolgd waarmee in korte tijd een eerste inzage wordt verkregen van de algemene kennis en inzichten over de te onderzoeken waterstofdragers, de effecten van incidenten en de mogelijkheden voor bestrijding.

Als eerste is binnen het consortium bekende en door de opdrachtgever aangereikte literatuur gebruikt om een eerste inzicht te hebben in de te onderzoeken materie. Dit betreft ca 80 relevante publicaties die via bestaande kennis, referenties uit de kabinetsvisie en input van KG/BG zijn geïdentificeerd, zie bijlage 1. De literatuur is dus niet uitputtend geanalyseerd, maar betreft wel de informatiebronnen die als grondslag voor deze studie hebben gediend.

Als volgende stap zijn een aantal scenario's geselecteerd op basis waarvan in korte tijd zoveel mogelijk informatie is verkregen ten behoeve van het beantwoorden van de onderzoeksvraag. De scenario's hebben vervolgens als basis gediend voor de inhoudelijke workshops met het consortium.

Voor de keuze van scenario's is een aanpak gehanteerd in lijn met de selectie van installatiescenario's door Seveso-bedrijven in het kader van de Veiligheidsrapportage. Ook bij de selectie van installatiescenario's gaat het niet om het uitwerken van alle mogelijke scenario's die kunnen voorkomen, maar om een representatief beeld te krijgen van alle mogelijke oorzaken en het type maatregelen die een bedrijf op deze specifieke oorzaak heeft getroffen.

Op eenzelfde wijze is dit ten behoeve van deze studie gedaan voor de verschillende stoffen en de variabelen die zijn te onderscheiden voor wat betreft locatie, effect, ondergrond en omgeving. Zie de onderstaande Tabel 2.1, waarin met ingekleurde blokjes de gekozen mogelijkheden per variabele is aangegeven.

Dit heeft geleid tot een twaalfstal te onderscheiden scenario's, zie de nummers 1 t/m 12 in onderstaande tabel. Hiervan gaan vijf over een brand, drie over een explosie en vier over een toxische wolk. De brand scenario's kunnen gaan over een fakkel-, plas- of wolkbrand.

Tabel 2.1 Representatieve scenario's per waterstofdrager met bijbehorende locatie, effect, ondergrond en omgeving. In kleur is aangegeven om welke vervoersmodaliteit het gaat: verlading (zwart), spoor (rood), weg (groen), water (blauw) en buis (geel)

		Locatie		Effect			Ondergrond		Omgeving		
		Verlading	Transport	Brand	Explosie	Toxische wolk	Grond	Water	Open	Industrieel	Bewoond
1	GH ₂	■	■		■		■				■
2		■	■	Fakkel			■		■		
3	LH ₂	■	■		■		■				■
4		■	■	Fakkel			■		■		
5	NH ₃ (koud)	■	■			■	■	■			■
6		■	■			■	■			■	
7	NH ₃ (warm)	■	■			■	■				■
8		■	■			■	■				■
9	Methanol	■	■	Plas			■				■
10	LSM	■	■	Wolk			■		■		
11	LOHC's	■	■	Plas			■	■			■
12	Boorhydrides	■	■		■		■	■			■

De volgende vervoersmodaliteiten zijn beschouwd:

- Vervoersgebonden activiteiten zoals laden/lossen (lossen zeeschip²)
- Binnenvaart
- Spoorvervoer
- Wegvervoer
- Buisleiding

Per vervoersmodaliteit zijn verschillende scenario's denkbaar, zoals lekkage tijdens overslagactiviteiten of tijdens transport. Uitgangspunt is dat omhellingen en vervoersmodaliteiten voldoen aan geldende wet- en regelgeving waardoor de kans op een groot incident verwaarloosbaar is. Grote incidenten met een zeer kleine kans van optreden, zoals instantaan falen, vallen daarom buiten de scope. We hanteren realistische scenario's waarin preventieve en repressieve voorzieningen zijn meegenomen. De gekozen scenario's gaan uit van een continue uitstroom via een lek, omdat dit een representatief beeld geeft van situaties waarin de brandweer daadwerkelijk handelingsperspectief heeft.

We sluiten hierbij aan bij de zogenoemde geloofwaardige scenario's vanuit de selectiemethodiek voor bedrijfsbrandweerscenario's vanuit het Besluit Veiligheidsregio's. Dit zijn ook scenario's die reëel en typerend zijn en waar rekening wordt gehouden met aangebrachte preventieve en repressieve voorzieningen om een scenario te voorkomen dan wel te beheersen

We kijken dus naar realistische scenario's waarbij zoals gezegd rekening is gehouden met preventieve en repressieve voorzieningen.

Niet alle in **Tabel 2.1** genoemde twaalf de scenario's zijn in detail besproken in de workshops. Er is gekozen om zes scenario's in detail uit te werken en te bespreken met de specialisten tijdens de workshops. Hierbij zijn de scenario's verdeeld over de modaliteiten en verschillende omstandigheden zoals uitstroom op land of op water (bij laden en lossen van schepen en binnenvaart) en de omgeving waarin het scenario zich voordoet (open gebied, industrieel of bewoond gebied):

- Scenario 1 – een explosie van GH₂ tijdens verladen in bewoond gebied
- Scenario 2 – een fakkelbrand GH₂ vanuit een buisleiding in open gebied
- Scenario 5 – Lekkage van koud ammoniak uit een binnenvaartschip nabij bewoond gebied
- Scenario 6 – Lekkage van koud ammoniak tijdens lossen van een zeeschip in havengebied
- Scenario 7 - Lekkage van warm ammoniak bij spoorvervoer nabij bewoond gebied
- Scenario 9 – een plasbrand methanol bij spoorvervoer nabij bewoond gebied

Door gebruik te maken van een aantal 'wat als' vragen tijdens het bespreken van de scenario's was het mogelijk om een zo volledig mogelijk beeld te krijgen van alle gevraagde stoffen en vervoersmodaliteiten. Bijvoorbeeld, 'wat als' het gaat om een andere stof, 'wat als' de uitstroom zou zijn in water in plaats van op het land of 'wat als' een incident zou plaatsvinden in open gebied in plaats van in bewoond gebied. Vraag daarbij was of dit zou leiden tot wijzigingen in de uitwerking van het scenario zoals al gedaan voor wat betreft mogelijke effecten en de inzet van de brandweer. De zaken die anders zouden zijn, zijn benoemd.

Door deze aanpak is zo efficiënt mogelijk binnen de gestelde tijd een zo volledig mogelijk beeld worden gegeven van de verschillende modaliteiten, stoffen en incidentscenario's. Dit heeft als basis gediend voor dit onderzoek.

De scenario's fungeerden dus uitsluitend als middel om per waterstofdrager en vervoersmodaliteit algemene inzichten vast te leggen. Dat wil zeggen, dat voor een gedetailleerde beantwoording op de vraag tot hoever het effect reikt, omvang effect en welke specifieke bestrijdingsaanpak er een separate vervolgstudie nodig is waarin in detail naar zeer specifieke scenario's wordt gekeken.

Deze selectie vormt de basis voor de verdere analyse en wordt in meer detail beschreven in bijlage 3.

Een overzicht van de transportmogelijkheden per waterstofdrager is weergegeven in **Tabel 2.2**.

2. Het lossen van een zeeschip is feitelijk geen vervoersmodaliteit, maar vanuit het oogpunt van risico wil lenW dit proces graag meenemen in deze studie.

Tabel 2.2 Transportmogelijkheden per waterstofdrager. De kleur geeft aan of het transport is toegestaan (groen), niet is toegestaan (rood), niet is toegestaan maar mogelijk in toekomst wel (oranje) of komt in de praktijk niet voor (zwart)

	Lossen zeeschip	Binnenvaart	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
GH ₂					
LH ₂					
Koud ammoniak					
Warm ammoniak					*
LSM ³					
Methanol					
LOHC's					
Boorhydrides		**	**	**	

* Let op: transport van warm ammoniak door een buisleiding is wel toegestaan, maar komt in Nederland buiten industrielocaties nog niet voor. In dit rapport wordt dit meegenomen als wel toegestaan (groen)

** Boorhydrides mogen worden vervoerd, maar dit vindt niet in bulk plaats maar verpakt in bijvoorbeeld waterdichte big bags, of verpakt in containers. Omdat boorhydrides dan geheel buiten de scope zouden vallen, is ervoor gekozen hier wel een scenario voor op te stellen, ondanks het feit dat er dus geen bulktransport plaatsvindt.

Dat op dit moment een bepaalde stof niet wordt vervoerd (zwart) of niet is toegestaan (rood) hoeft niet te betekenen dat dit vanwege veiligheidsredenen niet mag. Het kan ook zijn dat het praktisch of economisch niet haalbaar is een bepaald vervoer te hanteren, of dat er geen regelgeving voor vervoer is vastgesteld omdat er geen aanvraag voor een bepaald type vervoer is gedaan.

In Bijlage 3 is de volledige informatie opgenomen zoals gebruikt tijdens de workshop. Hierin wordt toegelicht hoe tijdens workshops specifieke scenario's zijn besproken om algemene beschrijvingen op te stellen. Door zes scenario's en verdiepende vragen in detail door te nemen, is een zo volledig mogelijk beeld ontstaan van stoffen, modaliteiten, incidentscenario's typen en het handelingsperspectief van de brandweer. Waar nodig is de kennis aangevuld met literatuur bronnen (bijlage 1), interviews en input van de klankbordgroep. De uitkomst van de scenarioanalyse is in de volgende hoofdstukken geïntegreerd in de beschouwingen per stof en in de vergelijkende analyses.

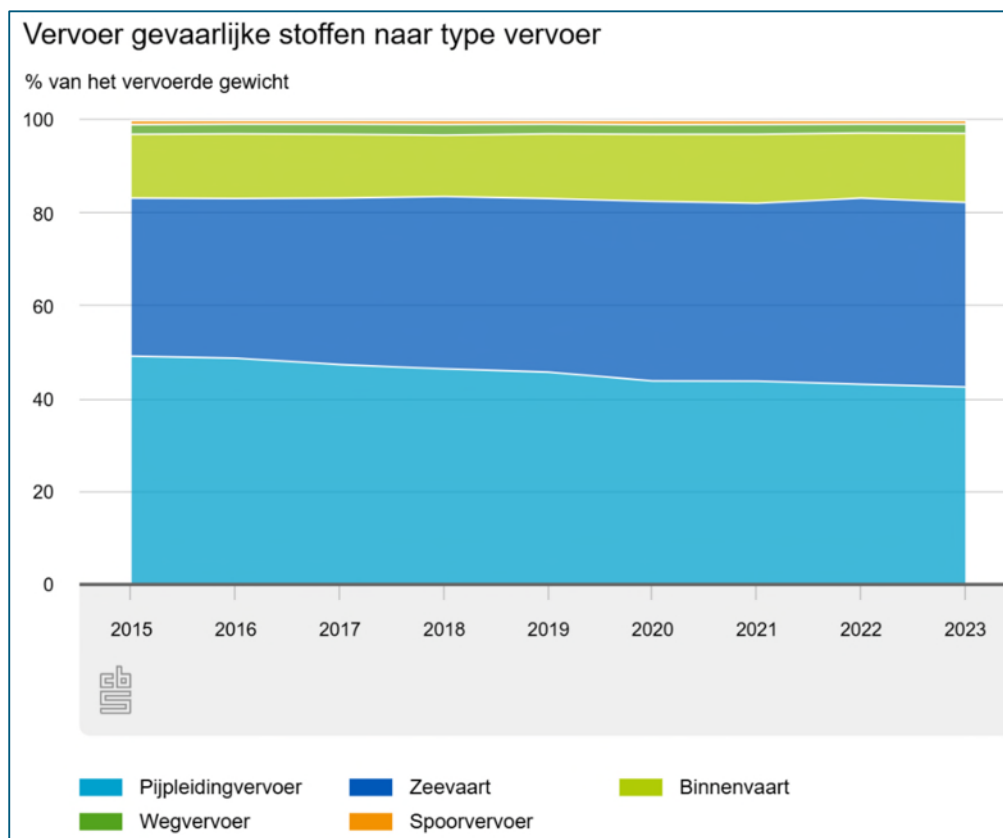
3. LSM is qua stof gelijk aan LNG, waarbij LSM op duurzame wijze is geproduceerd en LNG fossiel aardgas betreft. Transport van LNG vindt wel plaats, om die reden is gekozen voor de kleurcodering groen.

3. Algemene kenmerken vervoersmodaliteiten

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we algemene kenmerken van de verschillende vervoersmodaliteiten⁴.

In **Figuur 3.1** is de verhouding van de vervoerde hoeveelheid gevaarlijke stoffen per modaliteit in 2023 weergegeven. Momenteel wordt in opdracht van I&W een actualisatie van de verwachte volumestromen vervoer gevaarlijke stoffen als gevolg van de energietransitie uitgevoerd. Overigens is de verwachting dat weliswaar met de energietransitie nieuwe/andere stromen zullen ontstaan, maar dat de verhouding per modaliteit in grote lijnen gelijk blijven aan deze verdeling.



Figuur 3.1 Aandeel gevaarlijke stoffen per modaliteit (CBS, 2023)

3.2 Verlading zeeschepen

Binnen de zeevaart is het verladen van zeeschepen naar opslagterminals één van de meest risicovolle activiteiten. Dit komt omdat hier relatief veel (menselijke) handelingen uitgevoerd worden zoals het aan- en afkoppelen van laadarmen en laadslangen. Deze verbindingen kunnen gaan lekken of anderszins falen. Hoewel de kansen op deze scenario's groter zijn dan bijvoorbeeld het falen van een opslagtank, zijn de effecten veel kleiner. De hoeveelheid gevaarlijke stof die uitstroomt, is maximaal de hoeveelheid die vrij kan komen uit de laadarm: zodra een lekkage gedetecteerd wordt, sluit het systeem automatisch af. Dit geldt voor elk type verlading, van (zee)schip, binnenvaartschip, trein tot vrachtwagen.

Op- en overslagterminals huisvesten grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen en vallen daarom altijd onder de Seveso III-richtlijn. De Seveso III-richtlijn is de hoeksteen van industriële veiligheid in Europa en helpt risico's van zware ongevallen te beheersen, beschermt mens en milieu en bevordert transparantie. Bedrijven die grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen hanteren, moeten zich aan deze richtlijn houden om juridische sancties en ernstige gevolgen van incidenten te voorkomen.

4. Antea Group, Veiligheidsstandaarden in de ammoniakketen, 0495387.100, 26 augustus 2025.

Het bedrijf heeft een taak bij het voorkomen en bestrijden van incidenten tijdens het proces. Hiervoor is reeds wet- en regelgeving van toepassing wat met een Omgevingsvergunning milieu en/of aanwijsbeschikking bedrijfsbrandweer kan worden geborgd. Dit kan per bedrijf verschillen. Om die reden is dit verder in deze studie niet uitgewerkt. Het kan echter waardevolle inzichten geven om een studie te doen naar de overeenkomsten en de verschillen zoals incidentbestrijding is vormgegeven bij bedrijven.

3.3 Binnenvaart

Het transport van gevaarlijke stoffen per binnenvaartschip (barge) is een efficiënte en relatief kosteneffectieve manier om grote hoeveelheden product door rivieren en kanalen te vervoeren. Binnenvaartschepen hebben een groot laadvermogen, wat betekent dat ze in staat zijn aanzienlijke hoeveelheden product in één keer te vervoeren. In Nederland wordt jaarlijks circa 95 miljoen ton gevaarlijke stoffen via binnenvaart vervoerd, wat neerkomt op ongeveer 15% van alle transport van gevaarlijke stoffen.⁵

De regels voor de binnenvaart zijn vastgelegd in het verdrag voor vervoer van gevaarlijke stoffen over binnenwateren, het ADN.⁶ Het ADN schrijft voor dat binnenvaartschepen voor het vervoer van gevaarlijke stoffen tankschepen gecompartmenteerd moeten zijn om lekkages te beperken. Afhankelijk van de te vervoeren stoffen moeten ze dubbelwandig zijn uitgevoerd om lekkage uit de tanks te voorkomen of te beperken bij aanvaringen en grondingen.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de algemene kenmerken van binnenvaartschepen voor het vervoer van gevaarlijke stoffen.

Tabel 3.1 Algemene kenmerken binnenvaartschepen voor transport gevaarlijke stoffen⁷

Type schip	Typische capaciteit	Voorbeeldstoffen	Veiligheidskenmerken	ADR/ADN classificatie
Chemietank-schip	2.000 – 4.000 ton (max. 6.000 ton)	Zuren, basen, oplosmiddelen, methanol	Dubbele wand, inert gas systeem, explosieveilig	Klasse 3, 8
Minerale olietanker	3.000 – 6.000 ton	Benzine, diesel, stookolie	Dubbele wand, inert gas, dampretour	Klasse 3
Gas-/LPG-tanker	1.000 – 3.000 ton	Propaan, butaan, ammoniak	Druk- of koeltanks, veiligheidsventielen, gasdetectie	Klasse 2
Speciale chemietanker	500 – 2.000 ton	Zeer toxische of temperatuurgevoelige stoffen	Dubbele wand, inert gas, temperatuurcontrole	Klasse 6.1, 8

Bij het verladen van binnenvaartschepen zal een mogelijk incident plaatsvinden binnen het bedrijf waar het verladen gebeurt. Hierbij zal het noodplan van het bedrijf in werking worden gesteld en zal de overheidsbrandweer de inzet plegen volgens uitgewerkte incident- en aanvalsplannen.

Het transport van gevaarlijke stoffen via binnenvaartschepen kan langs stedelijk gebied plaatsvinden, dit is afhankelijk van de vaarwegroute.

3.4 Spoorvervoer

Gevaarlijke stoffen kunnen ook via spoorvervoer naar het achterland worden vervoerd. Vervoer per spoor is flexibel en wordt over het algemeen gezien als een veilige manier van transport. Het wordt vooral toegepast voor transport over middellange afstanden. De regels voor spoorvervoer zijn vastgelegd in het reglement voor het internationaal spoorwegvervoer van gevaarlijke goederen, het RID.⁸

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de algemene kenmerken van spoorketelwagens voor gevaarlijke stoffen transport.

5. CBS.

6. Accord européen relatif au transport des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures.

7. Voor meer gedetailleerde informatie zie ADN 2023 | Publicatie | Rijksoverheid.nl

8. Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses.

Tabel 3.2 Algemene kenmerken spoorketelwagens voor gevaarlijke stoffen transport⁹

Type wagon	Typische capaciteit	Voorbeeldstoffen	Veiligheidskenmerken	ADR/RID-classificatie
Spoorketelwagon (brandbare vloeistoffen)	60 – 120 m ³ (≈50 – 90 ton)	Benzine, diesel, ethanol	Overdrukventielen, bodembescherming	Klasse 3
Spoorketelwagon (gassen onder druk)	40 – 100 m ³ (≈40 – 70 ton)	LPG, ammoniak, propaan	Drukbestendige tank, veiligheidsventielen, hittebescherming	Klasse 2
Spoorketelwagon (toxische vloeistoffen)	50 – 80 m ³ (≈50 – 65 ton)	Fenol, chloorhoudende stoffen	Chemisch compatibel met vervoerde stof, periodieke inspecties, max vullingsgraad, overdrukbeveiliging	Klasse 6.1, 8
Container op wagon (tankcontainer) / portable tank (bij multimodal Vervoer)	20 – 30 m ³ per container	Diverse chemicaliën, zuren	Framebevestiging, ADR/RID-gecertificeerde tankcontainers, aparte keuringen voor frame portable tanks (Multiple Element Gas container (MEGC) en Intermediate Bulk Container (IBC))	Afhankelijk van stofklasse
Poeder/ granulaatwagons	50 – 70 m ³	Kunststofgranulaat, cement met additieven	Druklossing, explosiebeveiliging	Klasse 4.1

Bij laad- en losactiviteiten zal een mogelijk incident plaatsvinden binnen een bedrijf waar het laden en lossen gebeurt. Hierbij zal het noodplan van het bedrijf in werking worden gesteld en zal de overheidsbrandweer of bedrijfsbrandweer de inzet plegen volgens uitgewerkte incident- en aanvalsplannen.

Het transport van gevaarlijke stoffen via het spoor loopt doorgaans ook door binnenstedelijk gebied, behalve de Havenspoorlijn en de Betuweroute.

3.5 Wegvervoer

Vanwege de grote volumestroom aan gevaarlijke stoffen vanuit opslagterminals naar het achterland, zal transport over de weg niet de meest geschikte manier van transport zijn. Toch zal er altijd transport van gevaarlijke stoffen over de weg plaatsvinden, bijvoorbeeld voor bedrijven die geen toegang hebben tot andere modaliteiten of voor bedrijven met een kleine vraag.

Tabel 3.3 geeft een overzicht van de algemene kenmerken van tankwagens voor gevaarlijke stoffen transport.

Tabel 3.3 Algemene kenmerken tankwagens voor gevaarlijke stoffen transport¹⁰

Type voertuig	Typische capaciteit	Voorbeeldstoffen	Veiligheidskenmerken	ADR/RID-classificatie
Tankwagen (brandbare vloeistoffen)	30.000 – 40.000 liter (≈25 – 32 ton)	Benzine, diesel, ethanol	Overdrukventielen, aardingsvoorziening, explosiebeveiliging	Klasse 3
Tankwagen (gassen onder druk)	20.000 – 25.000 liter (≈18 – 20 ton)	LPG, ammoniak, propaan	Drukbestendige tank, veiligheidsventielen, hittebescherming	Klasse 2
Tankwagen (toxische/corrosieve stoffen)	20.000 – 30.000 liter (≈20 – 25 ton)	Zwavelzuur, natronloog, fenol	Corrosiebestendige materialen	Klasse 6.1, 8
Tankcontainer op oplegger	20.000 – 26.000 liter per container	Diverse chemicaliën, oplosmiddelen	ADR-gecertificeerde tankcontainer, framebevestiging, afsluiters	Afhankelijk van stofklasse
Bulkcontainer (poeders/granulaten)	30 – 40 m ³ (≈20 – 25 ton)	Kunststofgranulaat, cement met additieven	Druklossing, explosiebeveiliging, antistatische voorzieningen	Klasse 4.1

Bij laad- en losactiviteiten zal een mogelijk incident plaatsvinden binnen een bedrijf waar het laden en lossen gebeurt. Hierbij zal het noodplan van het bedrijf in werking worden gesteld en zal de overheidsbrandweer of bedrijfsbrandweer de inzet plegen volgens uitgewerkte incident- en aanvalsplannen.

Het transport van gevaarlijke stoffen via de weg loopt doorgaans niet door binnenstedelijk gebied.

9. Voor meer gedetailleerde informatie zie RID.

10. Voor meer gedetailleerde informatie zie ADR.

3.6 Buisleiding

Een buisleiding bevindt zich in de grond en kan grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen vervoeren. Bij dit type transport is er in vergelijking met andere modaliteiten weinig sprake van menselijk handelen. Vanuit de Structuurvisie Buisleidingen zijn tracés gereserveerd voor nieuwe buisleidingen van nationaal belang. Deze tracés vermijden zo veel als mogelijk dorpen en steden. Dit alles maakt dat de overheid de voorkeur geeft aan transport van gevaarlijke stoffen via buisleidingen.¹¹ Het aanleggen van een buisleiding vergt jaren en is pas rendabel bij een constante grote stroom van één product.

Tabel 3.4 geeft een overzicht van de algemene kenmerken van buisleidingtransport voor gevaarlijke stoffen.

Tabel 3.4 Algemene kenmerken buisleidingen voor gevaarlijke stoffen transport

Type buisleiding	Typische capaciteit	Voorbeeldstoffen	Veiligheidskenmerken	ADR/RID classificatie
Hogedruk aardgasleiding	Tot 10 – 20 miljoen m ³ /dag (≈55 mln ton/jaar NL)	Aardgas	Stalen leiding, kathodische bescherming, afsluiters, drubbewaking, lekdetectie	Klasse 2 (gassen)
Olief-/brandbare vloeistofleiding	5 – 15 miljoen ton/jaar	Ruwe olie, benzine, diesel	Dubbelwandige secties bij kwetsbare locaties, pompstations, noodafsluiters	Klasse 3
Chemische productleiding	1 – 5 miljoen ton/jaar	Ammoniak, propeen, vinylchloride	Inert gas systeem, drubbewaking, corrosiebescherming, veiligheidsbeheerssysteem	Klasse 2, 6.1, 8
CO ₂ -leiding (CCS)	1 – 3 miljoen ton/jaar	Kooldioxide	Hogedrukleiding, lekdetectie, noodstopvoorzieningen	Klasse 2.2

Momenteel vinden diverse studies plaats die gericht zijn op het transport van ammoniak via een buisleiding. We noemen in dit kader het onderzoek in opdracht van IenW over de veiligheidskaders waar een buisleiding voor ammoniak aan zou moeten voldoen.¹² Ook wordt het aardgasleidingnetwerk geschikt gemaakt voor transport van waterstof. Voor het transport van waterstof door aardgasleidingen zijn voorschriften en voorwaarden opgesteld¹³.

11. Kabinetsvisie waterstofdragers.

12. Antea Group, 26 augustus 2025, kenmerk 0495387.100.

13. Tebodin, 2019. Onderzoek technische aspecten van waterstof - in bestaande buisleidingen t.b.v. de energietransitie.

4. Kenmerken en incidenten per waterstofdrager

Dit hoofdstuk bevat per waterstofdrager een paragraaf. Het gaat om de volgende waterstofdragers:

1. Waterstof - GH₂: gasvormig, onder (hoge) druk
 Waterstof - LH₂: gekoeld vloeibaar gemaakt
2. Ammoniak – warm: onder druk, in samengeperste vorm
 Ammoniak - koud, gekoeld vloeibaar gemaakt
3. Methanol
4. Liquid Synthetic Methane (LSM)
5. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's)
6. Boorhydrides (natrium- en kaliumboorhydrides)




Per waterstofdrager worden de eigenschappen en gevaren weergegeven in een tabel¹⁴. Deze informatie is gebaseerd op de in voetnoot genoemde bronnen. Daarnaast worden mogelijke incidentscenario's beschreven, inclusief de effecten en bestrijdingsmogelijkheden. Deze scenario's zijn gebaseerd op de genoemde bronnen en aangevuld met de parate kennis van experts uit het consortium, leden van de klankbordgroep en het expert judgement van het consortium. Tot slot wordt ingegaan op de verschillen tussen de vervoersmodaliteiten.

4.1 Waterstof

Eigenschappen

Waterstof is een kleurloos en reukloos gas dat lichter is dan lucht. Het is een zeer licht ontvlambaar gas en brandt met een onzichtbare vlam. In combinatie met lucht is waterstof explosief in de range van 4% tot 77% (volume in lucht). Puur waterstof wordt getransporteerd door het onder hoge druk samen te persen (GH₂) of door het sterk af te koelen tot vloeistof (LH₂) (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Eigenschappen en kenmerken van waterstof

Waterstof gasvormig, onder hoge druk (GH ₂) en gekoeld vloeibaar gemaakt (LH ₂)	
CAS-nummer: 1333-74-0	<chem>H-H</chem>
UN-nummer: 1049, 1966	
Eigenschappen ^{15,16}	Gevaren ^{15,17,18}
Kookpunt: -253°C	GEVI-code 23: brandbaar gas 223: sterk gekoeld vloeibaar gemaakt gas, brandbaar
Smeltpunt: -259°C	
Vlampunt: brandbaar gas	ZZS: Nee
Zelfontbrandingstemperatuur: 560°C	
Explosiegrenzen in lucht: 4 – 77 volume %	H220: Zeer licht ontvlambaar gas
Minimale ontstekingsenergie: 0,011 mJ	
Dampspanning: 1.649.200 mbar bij 20°C	ADR/RID/ADN indeling 2.1: brandbare gassen 
Oplosbaarheid in water: 0,0016 g/L (zeer slecht)	
Relatieve dichtheid gas (lucht = 1): 0,07	
Relatieve dichtheid (water = 1): 0,07	
Etikettering  	


14. Een overzicht van de eigenschappen en gevaren van alle waterstofdragers is te vinden in bijlage 4.

15. Toxic (2021). Chemiekaarten.

16. BIG (2022). Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen.

17. RIVM (2025). Risico's van stoffen: De AGW, VRW en LBW zijn concentratiegrenzen in de lucht die de brandweer hanteert om de ernst van een incident te duiden en om te bepalen welk optreden nodig is voor hulpverleners en bevolking. De VRW staat voor voorlichtingsrichtwaarde, de AGW voor alarmeringsgrenswaarde en de LBW voor levensbedreigende waarde'.

18. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.

Waterstof gasvormig, onder hoge druk (GH ₂) en gekoeld vloeibaar gemaakt (LH ₂)	
CAS-nummer: 1333-74-0	H—H
UN-nummer: 1049, 1966	
Eigenschappen ^{15,16}	Gevaren ^{15,17,18}
Interventiewaarden¹⁷ (1 uur) VRW: n.v.t. AGW: 330 mg/m ³ LBW: 3.300 mg/m ³	 Gevarendiamant
Brandbestrijdingsmaatregelen¹⁶ Niet geschikte blusmiddelen: water (water kan wel gebruikt worden om steekvlam te beheersen). Schuim. Blusinstructies: indien geen gevaar voor/in de omgeving: laten uitbranden. Indien gevaarlijke stoffen in de nabijheid: blussen overwegen. Alleen blussen als men gastoevoer/lek nadien kan afsluiten. Tanks/vaten koelen met verneveld water en/of in veiligheid brengen. Bij kans op fysische explosie: blussen/koelen vanuit dekking. Lading niet verplaatsen indien aan hitte blootgesteld. Na afkoeling: blijvende kans op fysische explosie.	

4.1.1 Waterstof (GH₂), gasvormig, onder (hoge) druk

Scenario's

Gasvormig waterstof wordt alleen over de weg en via buisleidingen vervoerd (Tabel 4.2). Over de weg gaat het om transport in stalen of composiet cilinders, al dan niet omgeven door een omhulling (kooi of container).

De volgende drie scenario's zijn beschouwd:

- Lekkage op de weg door een aanrijding;
- Lekkage tijdens verladen;
- Lekkage door een gat in de buisleiding.

Tabel 4.2 Mogelijke scenario's met gasvormig waterstof. De kleur geeft aan of het transport is toegestaan (groen), niet toegestaan (rood) of in de praktijk niet voorkomt (zwart)

Gasvormig Waterstof				
Lossen zeeschip	Binnenvaart ¹⁹	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
Lekkage aan boord schip	Lekkage aan boord schip	Lekkage tijdens verladen	Lekkage tijdens verladen	Lekkage door gat in leiding
Lekkage op steiger/kade	Lekkage op steiger/kade	Lekkage tijdens rangeren	Lekkage door aanrijding	
Lekkage op het water	Lekkage op het water	Lekkage door aanrijding / ontsporing		

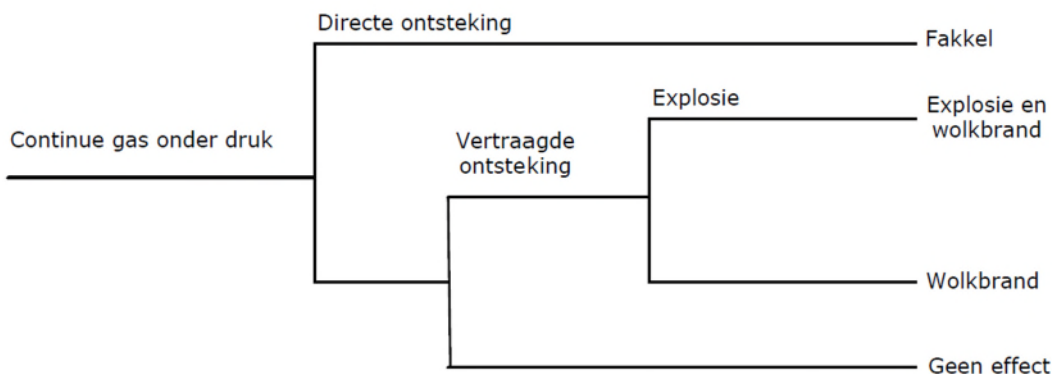
Milieueffect

Waterstof is niet giftig en vervliegt snel. Een uitstroming van gasvormige waterstof onder hoge druk heeft derhalve beperkte directe milieuschade.

19. Waterstof onder druk wordt vervoerd in de binnenvaart niet in bulk vervoerd, maar in zogenaamde tube trailers, meerdere cilinders bij elkaar in zogenaamde MEGC's.

Effecten

Bij directe ontsteking van gasvormig waterstof ontstaat een fakkelbrand. Bij vertraagde ontsteking ontstaat in de open lucht een wolkbrand en in een besloten ruimte een explosie met een wolkbrand (**Figuur 4.1**).²⁰



Figuur 4.1 Gebeurtenissenboom voor het continue vrijkomen van een brandbaar gas

De explosie die hier bedoeld wordt, is een chemische explosie waarbij waterstof explosief verbrand. Een chemische explosie moet niet verward worden met een fysische explosie, want dat is het exploderen van een cilinder door te hoge druk in de cilinder’.

Het verschil tussen een chemische en een fysische explosie wordt in tabel 4.3 nader toegelicht.

Tabel 4.3 Verschil fysische en chemische explosie

Aspect	Fysische explosie	Chemische explosie
Oorzaak	Mechanische drukontlasting (overdruk, faseovergang)	Exotherme chemische reactie (verbranding, ontleding)
Energiebron	Opslag van druk (gas, stoom, vloeistof)	Chemische bindingsenergie
Proces	Geen verandering in chemische samenstelling	Vorming van nieuwe stoffen, snelle reactie
Snelheid	Zeer snel, maar beperkt door fysische expansie	Extreem snel door kettingreacties
Kenmerken	Geen vlammen, geen rook, wel drukgolf en fragmenten	Vlammen, hitte, rook, drukgolf
Voorbeelden	BLEVE, stoomketelbreuk, gasfles die barst	TNT, dynamiet, ammoniumnitraat, gas-luchtmengsel
Risico's	Mechanische schade, rondvliegende delen	Brand, toxische gassen, zware explosies

- Een wolkbrand gaat met weinig tot geen overdrukeffecten gepaard, omdat de energie die bij de verbranding ontstaat, zich naar alle kanten kan verspreiden.²¹ Een wolkbrand van waterstof kan echter wel overkomen als een explosie, omdat de verbranding zo snel gaat. De overdrukeffecten zijn in de open lucht veel lager dan in een besloten ruimte of omgeving, maar kan groot genoeg zijn om gebouwen te doen falen.
- Er is een verschil tussen mogelijke drukopbouw in composiet en stalen cilinders: in composiet cylinders zal sprake zijn van minder druk opbouw dan in stalen cylinders in geval bij blootstelling aan warmte/brand. Dit komt omdat de liner in een composiet cylinder al bij relatief lage temperatuur (80-100 °C) gaat smelten terwijl het composiet zijn sterkte nog wel houdt²².
- In een besloten ruimte of omgeving kan de vrijgekomen energie niet alle kanten op en ontstaat er overdruk. Deze overdruk is veel groter dan bij een wolkbrand.

20. De explosie die hier bedoeld wordt, is een chemische explosie waarbij waterstof explosief verbrand. Een chemische explosie moet niet verward worden met een fysische explosie, want dat is het exploderen van een cilinder door te hoge druk in de cilinder.

21. Een wolkbrand van waterstof kan echter wel overkomen als een explosie, omdat de verbranding zo snel gaat. De overdrukeffecten zijn in de open lucht veel lager dan in een besloten ruimte of omgeving, maar kan groot genoeg zijn om gebouwen te doen falen.

22. Air Products internal products files: Type 4 Composite cylinders.

- De effectafstanden van een fakkel zijn kleiner dan die van een explosie.
- De effectafstanden van een fakkel zijn afhankelijk van de druk in het systeem en van de grootte van de uitstroomopening.
- Over het algemeen zijn de effecten van een incident met waterstof naar verwachting gelijk of kleiner met die van een incident met aardgas. Dit blijkt uit een nader onderzoek voor buisleidingen²³.
- In bebouwd gebied kan sprake zijn van besloten ruimtes tussen gebouwen. Een explosie kan daar tot schade en slachtoffers leiden door het instorten van gebouwen, door rondvliegend puin en door glasscherven. In industrieel gebied kan een explosie ook leiden tot escalatie van het incident.
- In bebouwd gebied kan een fakkelbrand leiden tot het aanstralen van nabijgelegen gebouwen die daardoor in brand kunnen raken.

Bestrijding algemeen

Fakkel

Een fakkelbrand kan niet door de brandweer bestreden worden, anders dan het stoppen van de toevoer en het beschermen van de omgeving tegen de warmtestraling van de fakkel. Ook zal de brandweer eventuele secundaire branden bestrijden. Bij een fakkel uit een cilinder zal de brandweer wachten tot de cilinder leeg is, terwijl bij een fakkel uit een buisleiding de brandweer moet wachten totdat de leidingexploitant de leiding heeft ingeblokkeerd en de toevoer van waterstof heeft gestopt. Dit kan uren duren.

Een fakkelbrand van waterstof is moeilijk te zien, maar deze kan met een warmtebeeldcamera zichtbaar worden gemaakt. Als zich in de vlam brandbaar materiaal bevindt, bijvoorbeeld stof of andere brandbaar materiaal, wordt een fakkelbrand van waterstof wel zichtbaar.

Explosie

Als sprake is van een explosie, dan is deze al geweest voordat de brandweer ter plaatse komt. De inzet zal dan gericht zijn op effectbestrijding. Bij een dreigende explosie is de inzet gericht om de explosie te voorkomen, de omgeving te ontruimen en afstand te houden.

Overige punten

- > Hoeveel water nodig en genoeg is voor het koelen van de aangestraalde omgeving van een fakkelbrand is niet vastgesteld. Er worden wel standaardwaarden als vuistregel gehanteerd (bijvoorbeeld 10 l/min/m²), maar of dat voldoende is, dient nader te worden onderzocht.
- > Elke veiligheidsregio heeft zijn eigen aandachtskaarten/aanvalsplannen voor het optreden bij incidenten. Er zijn overeenkomsten maar ook verschillen, bijvoorbeeld in de te hanteren veiligheidsafstanden.
- > Als blijkt dat koelen zinvol is en er blijkt sprake van grote veiligheidsafstanden, dan kan overwogen worden om onbemand in te zetten met een blusrobot / Unmanned Ground Vehicle (UGV). Hiermee kan zonder mensen bloot te stellen toch dichterbij worden ingezet.
- > Of het incident zich afspeelt in een bebouwd of open gebied maakt weinig uit voor de aanpak van de brandweer. De aanpak is gericht op het veiligstellen van de omgeving en escalatie voorkomen. Wel kan in open gebied de bluswatervoorziening minder zijn.

Bestrijding bij modaliteiten

Wegvervoer

Over de weg wordt gasvormig waterstof vervoerd in liggende of staande cilinders, al dan niet omgeven door een container. Afhankelijk van de uitvoering van het transportstelsel en van de cilinders gaat het om tubetrailers, batterijwagens en Multiple Element Gas Containers (MEGC).²⁴ De cilinders zijn van staal of van vezelversterkt composiet.

Tijdens het vervoer of de verlading van gasvormig waterstof kan een lekkage zorgen voor een fakkelbrand (in geval van ontsteking). Stalen cilinders zijn bestand tegen hittestraling en kunnen voorzien zijn van overdrukventielen om hogedrukken in de cilinders te voorkomen. Dit is echter geen verplichting. Het is aan de gebruiker van de cilinders om dit te bepalen. Cilinders van vezelversterkt composiet zijn niet bestand tegen hittestraling. Zij kunnen barsten en exploderen. Het is aan de gebruiker om te bepalen of deze cilinders worden voorzien van een Thermal Pressure Relief Device (TPRD). Een TPRD wordt geactiveerd bij 110 °C en laat waterstof gecontroleerd afblazen. Er ontstaat dan een fakkel, maar dit effect wordt verkozen boven het

23. Risicomodelering buisleidingtransport van waterstof AVIV 22 november 2019.

24. WVIP (2023). Vervoer gasvormig en vloeibaar waterstof in ADR.

exploderen van de cilinder. Het is verstandig om in noodsituaties de uitstroom van waterstof naar boven te richten om te voorkomen dat nabijgelegen objecten worden aangestraald door de fakkel.²⁵

Als waterstofcilinders zich in een stalen container bevinden, bestaat bij lekkage van een cilinder de kans op ophoping van waterstof. Dit is ongewenst omdat bij ontsteking een explosie ontstaat. Het is aan de gebruiker van de container om te bepalen of en welke voorzieningen getroffen worden om dit scenario te voorkomen. Het kan hierbij gaan om bijvoorbeeld detectie, ventilatie en explosieluiken.

De overdruk-effecten bij het ontsteken van een waterstofwolk zijn in een besloten omgeving (bebouwd gebied) veel groter dan in een open omgeving. Door overdruk kunnen gebouwen instorten en slachtoffers geven, maar slachtoffers kunnen ook vallen door 'secundaire effecten' (bijvoorbeeld brekend glas).

Bij een fakkelbrand is de inzet gericht op het veiligstellen van de omgeving en op het koelen van gebouwen of objecten om escalatie te voorkomen. Aan de fakkelbrand zelf is niets te doen. De cilinder dient gecontroleerd leeg te lopen (uit te branden).

Bij een explosie kan de brandweer niets doen, deze is al gebeurd voordat de brandweer ter plaatse is. De brandweer kan alleen ingezet worden op effectbestrijding. Mocht er sprake zijn van een dreigende explosie, dan is het belangrijk om de cilinder te koelen. Dit kan alleen als de cilinder niet voorzien is van een TPRD.

Buisleiding

Bij een buisleiding is bronbestrijding door de brandweer niet mogelijk. De toevoer moet worden stopgezet door de exploitant van de buisleiding. Dit duurt lang aangezien de toevoer niet zomaar afgesloten kan worden, omdat de afnemer niet zomaar afgesloten kan worden. Dit kan namelijk leiden tot onveilige situaties bij de afnemer. Effectbestrijding door middel van koelen van de omgeving is mogelijk, maar alleen op enige afstand van de buisleiding.

Bij buisleidingen is het zo dat incidenten met waterstof zowel qua brandweerinzet als effectafstanden vergelijkbaar zijn met buisleidingen met aardgas.

Bij een lekkage van een buisleiding die zich onder water bevindt, wordt de snelheid waarmee waterstof uitstroomt verlaagd. In het water ontstaat een pluim van gasbubbel die steeds breder wordt naarmate het water dieper is. Bij ontsteking ontstaat aan het wateroppervlak een combinatie van een 'plasbrand' en een fakkelbrand. Een dergelijke brand kan alleen beëindigd worden door de gastoevoer te stoppen. Bronbestrijding is niet mogelijk. De kans dat waterstoflekkage onder water ontsteekt en aanhoudt is waarschijnlijk groter voor waterstof dan voor aardgas, maar dit is niet geheel zeker. .

4.1.2 Waterstof (LH₂), gekoeld vloeibaar gemaakt

Eigenschappen

Het kookpunt van waterstof is -253 °C. Bij die temperatuur kan waterstof niet ontstoken worden. Om waterstof vloeibaar te maken, moet waterstof worden gekoeld tot die temperatuur. De tanks waarin vloeibaar waterstof wordt opgeslagen, zijn goed geïsoleerd om opwarming, en daarmee drukopbouw, te beperken. Er zal echter altijd wel enige warmtetoevoer vanuit de omgeving plaatsvinden, waardoor de druk in de opslagtank oploopt. Tanks voor vloeibaar waterstof zijn dan ook uitgevoerd als druktanks.

Scenario's

Vloeibaar waterstof mag vervoerd worden via zeevaart, spoorvervoer en wegvervoer, maar transport over weg en over spoor vindt nauwelijks plaats vanwege praktische beperkingen en de geringe hoeveelheden vloeibaar waterstof die dan vervoerd kunnen worden.²⁶ Onderzocht wordt of het mogelijk is om vloeibaar waterstof in de toekomst ook via binnenvaart te vervoeren.²⁷

In geval van een incident zijn verschillende scenario's mogelijk (zie **Tabel 4.4**).

25. Persoonlijke communicatie NIPV met Jaco Reijerkerk van Ekinetix, d.d. 10 oktober 2025.

26. In de VS vindt transport van vloeibaar waterstof plaats over weg en water waarbij rekening wordt gehouden met verblijftijden van enkele dagen. Zie voorbeeld <https://www.linde-engineering.com/products-and-services/plant-components/liquefied-hydrogen-tank-solutions>.

27. Transport van vloeibaar waterstof is in de binnenvaart wel toegestaan als het vervoerd wordt in T75 UN portable tanks.

Tabel 4.4 Mogelijke scenario's met vloeibaar waterstof. De kleur geeft aan of het transport is toegestaan (groen), nu niet toegestaan maar mogelijk in toekomst wel (oranje) of in de praktijk niet voorkomt (zwart)

Vloeibaar Waterstof				
Lossen zeeschip	Binnenvaart	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
Lekkage aan boord schip	Lekkage aan boord schip	Lekkage tijdens verladen	Lekkage tijdens verladen	Lekkage door gat in leiding
Lekkage op steiger/kade	Lekkage op steiger/kade	Lekkage tijdens rangeren	Lekkage door aanrijding	
Lekkage op het water	Lekkage op het water	Lekkage door aanrijding / ontsporing		

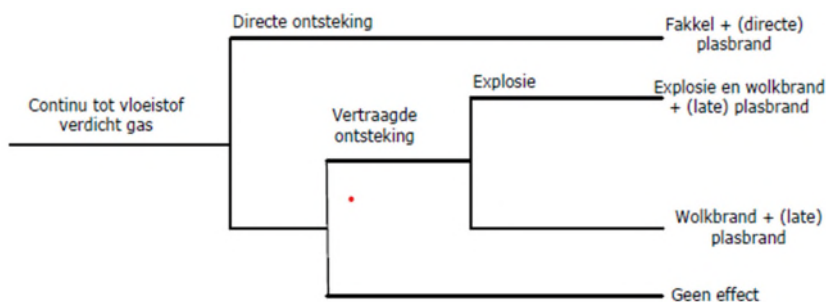
Milieueffect

Waterstof zelf is niet giftig en vervliegt snel. Bij een plotselinge verdamping kan een uitstroom leiden tot lokale afkoeling en vorstschade aan bodem en vegetatie.

Effecten

Als vloeibaar waterstof vrijkomt, ontstaat er een plas waarbij zonder ontsteking sprake is van sterke uitdamping of in geval van ontsteking ontstaat een plasbrand. De kans op ontsteking is groot: de wrijving bij vrijkomen is al voldoende energie om een ontsteking te veroorzaken²⁸. Bij ontsteking van de gaswolk ontstaat een wolkbrand gevolgd door een plasbrand (Figuur 4.2). Als de gaswolk niet ontsteekt, ontstaat er geen plasbrand en zal de plas vloeibare waterstof verdampen (koud kokende plas)²⁹.

Als vloeibaar waterstof vrijkomt in een grote (diepe) plas met water, dan vindt een explosief snelle verdamping plaats met een drukeffect. Dit heet een Rapid Phase Transition (RPT).



Figuur 4.2 Gebeurtenissenboom voor het vrijkomen van gekoeld, vloeibaar gemaakt gas³⁰

Bestrijding algemeen

In geval van een lekkage is de wolkbrand niet te bestrijden. Deze ontstaat voordat de brandweer aanwezig is op de incidentlocatie. Bestrijding van de plasbrand of de koudkokende plas is niet mogelijk, omdat toevoer van water tot een snelle opwarming van de plas leidt en tot meer verdamping van waterstof. Het is belangrijk om de plas gecontroleerd te laten uitbranden of uitdampen en de omgeving veilig te houden. Het is ook nog de vraag of de brandweer op tijd aanwezig zal zijn. Mogelijk is het scenario al voorbij voordat de brandweer ter plaatse komt. In dat geval kan de brandweer alleen effectbestrijding uitvoeren.

28. Waterstof heeft een zeer hoge ontstekingskans door lage ontstekingsenergie. Bij vloeibare waterstof (LH2) is de ontsteking op afstand iets minder direct dan bij gas, omdat het kouder is en langzamer uitstroomt, maar het kan alsnog verdampen en op afstand ontsteken (bron: RIVM).

29. Icheme.org.

30. Gexcon, 2025. Fire and explosion hazards: What to expect if there is a leak.

Bestrijding bij modaliteiten

Laden/lossen zeeschip

In dit onderzoek kijken we bij zeeschepen alleen naar verlading. Uitgangspunt hierbij is dat het schip aan een kade of steiger ligt van een bedrijf. Gezien de omvang van de hoeveelheid gevaarlijke stoffen zal dit doorgaans een Seveso-bedrijf zijn. Bij een incident zal het noodplan van het bedrijf in werking worden gesteld en zal de overheidsbrandweer de inzet plegen volgens uitgewerkte incident- en aanvalsplannen. Bij uitstroom op het water is de bereikbaarheid van de incidentlocatie lastig.

Binnenvaart

Bij een incident tijdens het varen van het binnenvaartschip is de bereikbaarheid van de incidentlocatie lastig.

Bij een incident tijdens verladen treedt het noodplan van het bedrijf in werking en zal de overheidsbrandweer de inzet plegen volgens uitgewerkte incident- en aanvalsplannen.

Spoor- en wegvervoer

In de praktijk vindt vervoer van vloeibaar waterstof over weg en over spoor nauwelijks plaats, vanwege de praktische beperkingen en de geringe hoeveelheden die vervoerd kunnen worden. De reeds genoemde effecten en bestrijdingsmogelijkheden zijn voor deze modaliteiten zoals omschreven onder Bestrijding algemeen.

4.2 Ammoniak

Eigenschappen

Ammoniak (NH_3) is bij omgevingstemperatuur een gas dat lichter is dan lucht; het kookpunt is $-33\text{ }^\circ\text{C}$. Ammoniak heeft een scherpe irriterende geur waardoor het gas snel wordt opgemerkt. De geurdrempel bedraagt 5-25 ppm. Ammoniak is giftig en goed oplosbaar in water. Bij inademing zal ammoniak inwerken op de slijmvliezen van keel en luchtwegen en sterk prikkelend werken. Bij contact met de huid kunnen blaren ontstaan (zie grafiek in **Tabel 4.6**)

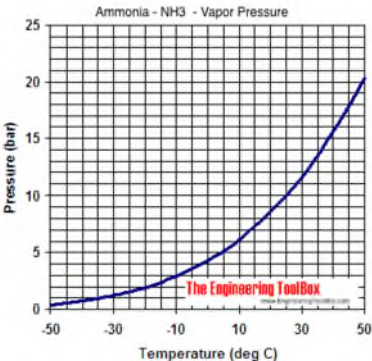



Ammoniak is ook brandbaar, maar de minimum ontstekingsenergie is dermate hoog, dat het moeilijk is om ammoniak te doen ontbranden. Daar komt bij dat een ammoniakvlam zichzelf niet in stand kan houden. Daarom wordt voor ammoniak vooral ingegaan op de toxische effecten en niet op effecten bij brand.

Ammoniak wordt als vloeistof vervoerd waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen 'warm' en 'koud' ammoniak. Koud ammoniak is gekoeld vloeibaar gemaakt bij $-33\text{ }^\circ\text{C}$. Warm ammoniak is vloeibaar gemaakt onder druk. De heersende druk is afhankelijk van de omgevingstemperatuur (zie grafiek in **Tabel 4.6**).

Milieueffect

Een uitstroming van ammoniak (NH_3) heeft aanzienlijke milieueffecten. Ammoniak is een sterk basische stof die, wanneer het in de lucht terechtkomt, kan bijdragen aan verzuring en vermesting van ecosystemen. Dit leidt tot een verstoring van de natuurlijke balans, waardoor gevoelige planten en dieren verdwijnen. In water kan ammoniak giftig zijn voor vissen en andere aquatische organismen, vooral bij hogere concentraties en hogere pH-waarden.

Tabel 4.5 Eigenschappen en gevaren van ammoniak

Ammoniak	
warm, onder druk, in samengeperste vorm en koud, gekoeld vloeibaar gemaakt	
CAS-nummer: 7664-41-7	NH₃
UN-nummer: 1005 en 9000	
Eigenschappen ^{31,32}	Gevaren ^{31,33,34}
<p>Kookpunt: -33°C Smeltpunt: -78°C Vlampunt: n.v.t. (gas) Zelfontbrandingstemperatuur: 651°C Explosiegrenzen in lucht: 16 – 25 volume % Minimale ontstekingsenergie: 680 mJ Dampspanning: 8611 mbar bij 20°C Oplosbaarheid in water: 531 g/L (goed) Relatieve dichtheid gas (lucht = 1): 0,6 Relatieve dichtheid (water = 1): 0,8</p> <p>Dampspanning grafiek³⁵:</p> 	<p>GEVI-code 268: giftig gas, bijtend</p> <p>ZZS: Nee</p> <p>H221: Ontvlambaar gas H314: Veroorzaakt ernstige brandwonden en oogletsel H331: Giftig bij inademing H400: Zeer giftig voor in het water levende organismen</p> <p>ADR/RID/ADN indeling</p> <p>2.3: giftige gassen 8: bijtende (corrosieve) stoffen</p>  <p>Etikettering</p> 
<p>Interventiewaarden³³ (1 uur) VRW: 21 mg/m³ AGW: 140 mg/m³ LBW: 780 mg/m³</p>	<p>Gevarendiamant</p> 
<p>Brandbestrijdingsmaatregelen³²</p> <p>Niet geschikte blusmiddelen: water (water kan wel gebruikt worden om steekvlam te beheersen). Schuim.</p> <p>Blusinstructies: tanks/vaten koelen met verneveld water en/of in veiligheid brengen. Bij kans op fysische explosie: blussen/koelen vanuit dekking. Lading niet verplaatsen indien aan hitte blootgesteld. Na afkoeling: blijvende kans op fysische explosie. Toxische gassen verdunnen met verneveld water. Rekening houden met giftig/bijtend neerslagwater. Rekening houden met toxisch bluswater. Bluswater beperken, zo mogelijk opvangen of indammen. Indien geen gevaar voor/in de omgeving: laten uitbranden. Indien gevaarlijke stoffen in de nabijheid: blussen overwegen. Enkel blussen als men gastoevoer/lek nadien kan afsluiten.</p>	

4.2.1 Warm ammoniak

In het kader van de energietransitie ontstaat een nieuwe ammoniakstroom met een andere klantgroep. Vooralnog lijken de initiatiefnemers uit te gaan van vervoer per binnenvaart van koude ammoniak (cryogeen, -33°C). Indien dit niet mogelijk is of de klantvraag sluit niet aan, wordt daarnaast ook naar spoorvervoer gekeken met warme ammoniak.

31. Toxic (2021). Chemiekaarten.
 32. BIG (2022). Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen.
 33. RIVM (2025). Risico's van stoffen.
 34. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.
 35. The Engineering ToolBox (2005). Ammonia – NH₃ – Thermodynamic Properties.

Scenario's

Voor het transport van warm ammoniak worden alle modaliteiten gebruikt behalve zeevaart³⁶ (Tabel 4.6).

Tabel 4.6 Mogelijke scenario's met warm ammoniak. De kleur geeft aan of het transport is toegestaan (groen) of in de praktijk niet voorkomt (zwart)

Warm Ammoniak				
Lossen zeeschip	Binnenvaart	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
Lekkage aan boord schip	Lekkage aan boord schip	Lekkage tijdens verladen	Lekkage tijdens verladen	Lekkage door gat in leiding
Lekkage op steiger/kade	Lekkage op steiger/kade	Lekkage tijdens rangeren	Lekkage door aanrijding	
Lekkage op het water	Lekkage op het water	Lekkage door aanrijding / ontsporing		

Effect³⁷

Bij lekkage van een tank of leiding met vloeibaar 'warm' ammoniak zal ammoniak bij de uitstroomopening 'flashen', omdat de temperatuur van ammoniak boven het kookpunt ligt. Tijdens het flashen verdampt een deel van de vloeibare ammoniak en vormt de 'eerste' gaswolk. Deze gaswolk is bepalend voor de effectafstanden die enkele honderden meters of zelfs kilometers groot kunnen zijn.

Afhankelijk van de omstandigheden zal een deel van het vloeibare ammoniak als kleine druppeltjes meegesleurd wordt naar buiten. Die druppels zullen deels verdampen en deels uitregenen en een plas vormen waaruit ammoniak verdampt. Dit verdampte ammoniak draagt bij aan de 'tweede' gaswolk. In de tank of leiding vindt dit proces ook plaats. Daar bevindt zich immers nog steeds vloeibaar ammoniak dat ook wil verdampen nu er een opening naar de buitenlucht is. De ammoniak die dan verdampt draagt ook bij aan de tweede gaswolk. Deze wolk is aanzienlijk kleiner dan de eerste gaswolk. Het volledig verdampen van de nog aanwezige ammoniak in deze systemen kan lang duren omdat de snelheid waarmee ammoniak verdampt, steeds kleiner wordt. Deze fase is dan ook bepalend voor de duur van het incident.

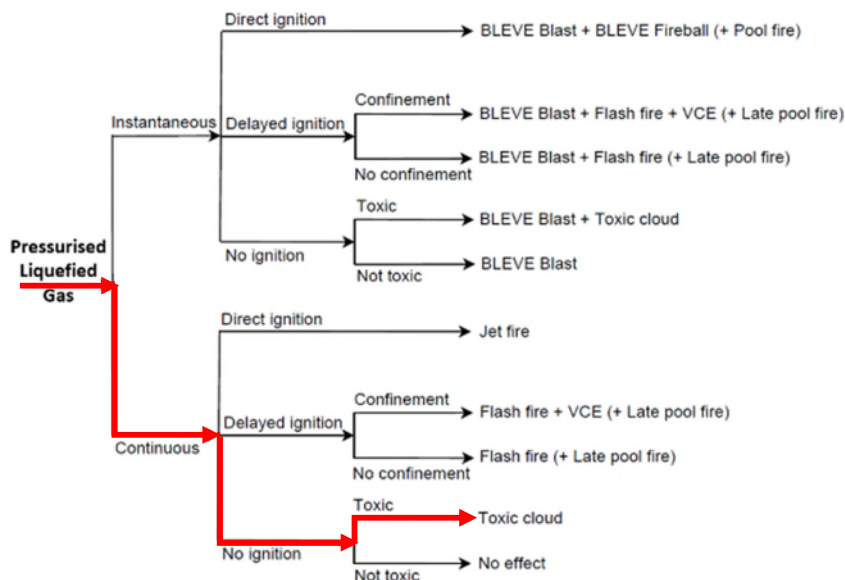
De temperatuur van de eerste gaswolk is laag omdat voor het verdampen van ammoniak energie uit de omgeving wordt gehaald. De koude ammoniak gaswolk gedraagt zich dan als een zwaar gas, omdat koude gassen zwaarder zijn dan lucht. De ammoniakwolk is in die fase zichtbaar als een witte mist, doordat waterdamp in de koude lucht condenseert. Deze mist beperkt het zicht in de omgeving. Bij een koudkokende plas of koudkokend systeem is de gaswolk niet zichtbaar, omdat er weinig ammoniak verdampt.

De bronsterkte van een incident met warm ammoniak is veel groter dan bij een soortgelijk incident met koud ammoniak, omdat warm ammoniak zich onder druk bevindt. De ammoniakwolk die dan ontstaat is veel groter dan bij koud ammoniak waardoor de effecten ook groter zijn.

In een open gebied reiken de effecten verder dan in een bewoond gebied. In vergelijking met bewoond gebied wonen in open gebied minder mensen, is de bereikbaarheid voor de brandweer minder en is de beschikbare hoeveelheid water (voor eventuele waterschermen) veelal beperkter.

36. Warm ammoniak mag wel in UN portable tanks vervoerd worden.

37. Bron: Red Squirrel Tests: Air Productsfield experiments, maart 2023; expert judgement workshops.



Figuur 4.3 Gebeurtenissenboom voor het vrijkomen van onder druk, vloeibaar gemaakt gas.³⁰ In het rood is de gebeurtenis van een toxische wolk weergegeven

Bestrijding

De brandweer kan weinig doen tegen de eerste gaswolk die ontstaat, omdat de snelheid waarmee die wolk ontstaat en zich verspreidt te groot is. De brandweer kan wel een inzet doen in het brongebied als het flashen van ammoniak voorbij is. De brandweer kan de uitstroom beperken (alleen bij een klein lek), de plasverdamping verminderen en/of de ammoniakconcentratie in de gaswolk beperken met waterschermen. In het effectgebied kan de brandweer zonodig aanwezigen evacueren. Bij de bestrijding moet de brandweer rekening houden met het draaien van de windrichting en daarmee verplaatsing van het effectgebied (benedenwinds).

Schulen in een goed afgesloten gebouw of ruimte is vooral de eerste uren de veiligste optie. Een en ander is afhankelijk van de omvang van het incident en van de afstand tot het incident. Evacuatie van mensen in het effectgebied kan nodig zijn, maar dit vraagt een zorgvuldige afweging, omdat ze van een relatief veilige binnenruimte naar buiten gaan waar ze blootgesteld worden. Evacuatie gebeurt daarom alleen als dit verantwoord kan, als er een noodzaak is en als het zonder schadelijke blootstelling aan ammoniakdampen kan plaatsvinden.

Bij een inzet moet voorkomen worden dat water in contact komt met vloeibaar ammoniak, omdat water warmer is dan het koudkokende ammoniak. Hierdoor wordt warmte toegevoerd en neemt verdamping van ammoniak sterk toe. Het inzetten van waterschermen in het effectgebied van een ammoniaklek is bedoeld om de ammoniakconcentratie in de gaswolk te verlagen. Dit moet met beleid gedaan te worden om te voorkomen dat dit water in contact komt met vloeibaar ammoniak. Voor het gebruik van waterschermen bij een groot ammoniaklek is het gewenst de kennis van experts in te zetten.

Er zijn nog geen goede handreikingen beschikbaar die de brandweer kan gebruiken bij een incident tijdens het transport van warm ammoniak. Zo is niet duidelijk welke tactieken wanneer het meest geschikt zijn en met welke middelen welk doel bereikt kan worden.

Voor de inzet is het van belang dat de hulpverlening (politie/gemeente/brandweer) omstanders voorlicht en informeert en ervoor zorgt dat omwonenden gaan schulen. Daarnaast moet zorgvuldig worden afgewogen of woningen en gebouwen in het effectgebied ontruimd moeten worden, aangezien mensen dan van een relatief veilige binnenruimte naar buiten gaan en blootgesteld kunnen worden aan de ammoniakdamp. Omdat de eerste uren³⁸ binnen doorgaans het veiligst is, moet een grootschalige evacuatie pas als laatste stap worden overwogen en alleen als de evacuatie verantwoord kan plaatsvinden.

38. Het is afhankelijk van het type incident, type stof, hoeveelheid uitstroom, toxiciteit, kwaliteit woning, etc. hoelang binnenblijven veilig is. Het vraagt nader onderzoek hier nadere uitspraken over te doen. Wel kan gesteld worden dat in alle gevallen het beste is als mensen binnen schulen in geval van een toxische wolk.

Aandachtspunt kan zijn dat mogelijk sprake kan zijn van een toename van fijnmazige distributie van ammoniak in landelijke regio's³⁹. Dit betekent dat bij een incident de kans groot is dat er geen deskundige hulpverlening in de directe nabijheid beschikbaar is voor de bestrijding.

Modaliteiten

Binnenvaart

Warm ammoniak dat via een binnenvaartschip wordt vervoerd, heeft een druk van circa 5 bar bij een temperatuur van 5°C. Als het lek zich boven de waterlijn bevindt, zal veel ammoniak meteen verdampen en een grote wolk vormen die zich in de omgeving verspreidt. De rest van de ammoniak zal koudkoken in de laadtank. Als het lek zich onder de waterlijn bevindt, kan water in de ammoniaktank stromen of ammoniak kan in het water stromen. Het is gunstig als ammoniak in het water stroomt, omdat ammoniak daarin goed oplost en de verdamping beperkt zal zijn. Het is niet gunstig als water in de laadtank komt, omdat er dan veel ammoniak verdampt waardoor de druk in de tank toeneemt.

Bij een aanvaring op het water is de bereikbaarheid voor hulpdiensten moeilijker. Daarnaast kost het 30 tot 45 minuten voordat een blusboot ter plaatse is en ingezet kan worden. De eerste grote gaswolk is waarschijnlijk dan al voorbij.

Spoorvervoer

Behalve de eerste gaswolk zal een deel van de vloeibare ammoniak in het ballastbed terechtkomen waarin het (deels) wegzakt. Een ballastbed zorgt echter ook voor warmteafgifte waardoor de vloeibare ammoniak sneller zal verdampen. Pas als het ballastbed koud geworden is, zal een stabiele situatie ontstaan waarin weinig ammoniak verdampt uit de plas in het ballastbed.

De bereikbaarheid van een ammoniaklekkage op het spoor is locatie-afhankelijk en kan vooral in de buitengebieden slecht zijn.

Wegvervoer

Van alle modaliteiten vervoert een tankwagen het minste ammoniak. Behalve de eerste gaswolk zal een deel van de vloeibare ammoniak een plas op en naast de weg vormen die groter kan zijn dan bij een ballastbed. Uit een grotere plas verdampt meer ammoniak, dit verkort wel weer de duur van het incident.

De bereikbaarheid van een ammoniaklekkage op de weg is beter dan bij de andere modaliteiten. Wel zijn eventuele omstanders in de directe omgeving aangewezen op zichzelf om zich in veiligheid te brengen.

Buisleiding

Bij ammoniak in een buisleiding gaat het over grote hoeveelheden en een lange duur van de uitstroom bij een lekkage. Hierdoor zullen ook de effecten groter en langduriger zijn dan bij andere modaliteiten. Er is nog onduidelijkheid over wat er precies gebeurt bij een ammoniak lekkage in een buisleiding.

Als het incident uren of tot dagen duurt, kan de brandweer worden ingezet om de langdurige effecten te beperken. Wat dan mogelijke (alternatieve) inzetacties zijn, moet nader worden onderzocht. Een alternatieve tactiek is bijvoorbeeld de uitstroom stoppen door afdichting van het gat. Nader onderzoek is vereist om de mogelijkheden nader uit te werken.

4.2.2 Koud ammoniak

Scenario's

Koude ammoniak wordt op dit moment alleen vervoerd via zeevaart en binnenvaart (**Tabel 4.7**). Vervoer via spoor of weg is op dit moment niet toegestaan, omdat koud ammoniak niet in het ADR en in het RID zijn opgenomen. Daarom ontbreken de veiligheidsvoorschriften en etiketteringseisen.

Vervoer via spoor of weg vindt ook niet plaats omdat een installatie om de ammoniak koud te houden technisch niet mogelijk is en het zou ook te veel energie kosten. Een mogelijkheid is wel om koud ammoniak zonder actieve koeling over korte afstanden te transporteren. Dit is alleen geschikt voor kleine hoeveelheden en komt in de praktijk nauwelijks voor, behalve bij leidingen bij Seveso-installaties, bijvoorbeeld opslagterminals.

39. Info genoemd in klankbordgroep.

Tabel 4.7 Mogelijke scenario's met koude ammoniak. De kleur geeft aan of het transport is toegestaan (groen), nu niet toegestaan maar mogelijk in toekomst wel (oranje) of in de praktijk niet voorkomt (zwart)

Koud Ammoniak				
Laden/lossen (zeeschip)	Binnenvaart	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
Lekkage aan boord schip	Lekkage aan boord schip	Lekkage tijdens verladen	Lekkage tijdens verladen	Lekkage door gat in leiding
Lekkage op steiger/kade	Lekkage op steiger/kade	Lekkage tijdens rangeren	Lekkage door aanrijding	
Lekkage op het water	Lekkage op het water	Lekkage door aanrijding / ontsporing		

Effect

Ook bij een lekkage van koud ammoniak zijn de effecten te verdelen in twee fasen. In de eerste fase zal het vloeibare ammoniak flashen, maar dit effect is minder groot dan bij warm ammoniak. Bij koud ammoniak is het temperatuurverschil met de omgeving de drijvende kracht voor verdamping, terwijl dat bij warm ammoniak het drukverschil met de omgeving is. De eerste gaswolk die ontstaat bij het vrijkomen van koud ammoniak is dan ook minder groot en reikt minder ver dan bij warm ammoniak.

Als de vrijgekomen hoeveelheid koud ammoniak groot is en de vloeistof niet direct volledig kan verdampen, kan zich op de grond een plas vloeibaar ammoniak vormen. Deze plas blijft verdampen (koudkokende plas) en voedt de gaswolk. Dit is de tweede fase van de lekkage. De energie voor de verdamping wordt uit de omgeving gehaald en de ondergrond zal bevroren. Er is geen sprake van heftige verdamping omdat de ammoniakplas al koud is. Plasverdamping is dan ook beperkt waardoor deze fase uren tot dagen kan duren, afhankelijk van de inhoud van de tank en het al dan niet stoppen van de toevoer. De effecten van deze fase naar de omgeving toe zijn dan ook veel beperkter van omvang.

Bovenstaande data is op basis van de beschikbare literatuur, kennis van het gedrag van koude ammoniak en expert judgement verkregen. Vanwege het ontbreken van casuïstiek is echter niet precies bekend wat de gevolgen zijn van een grote uitstroom van koude ammoniak op open water. Om die reden is Arise⁴⁰ (Ammonia Response in Sea Emergencies) voornemens een experiment uit te voeren over een grootschalige uitstroom. In Q2-2026 worden de eerste resultaten verwacht.

Bestrijding

Voor de bestrijding van een lekkage van koud ammoniak geldt grotendeels hetzelfde als voor warm ammoniak: de brandweer kan in de eerste fase weinig doen en heeft in de tweede fase meer mogelijkheden. De brandweer kan zich in die fase richten op het beperken van de uitstroom en het verminderen van de plasverdamping. Zonodig kunnen waterschermen worden ingezet om de toxische dampen op te mengen/neeër te slaan. Er moet bij een inzet voorkomen worden dat water in contact komt met vloeibaar ammoniak, omdat de verdamping van ammoniak dan fors toeneemt.

Ook kan ingezet worden om de omgeving veilig te stellen, dat wil zeggen omstanders voor- en inlichten en ervoor zorgen dat omwonenden gaan schuilen. Daarbij is het mogelijk om een beperkt aantal mensen in het effect gebied te redden (ontruimen). Een grootschalige evacuatie wordt pas gedaan als laatste stap waarbij duidelijk zal zijn dat dit alleen kan als de evacuatie verantwoord (zonder schadelijke blootstelling aan de ammoniakdamp) kan plaatsvinden. De eerste vier uur zit je binnen het veiligst.

Modaliteiten

Lossen zeeschip

Het verladen van een zeeschip vindt altijd plaats bij een Seveso bedrijf, een bedrijf waar met grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen wordt gewerkt. Bij dit soort bedrijven zijn voorzieningen aanwezig vanuit PGS

40. ARISE | Advancing Safe and Sustainable Ammonia Transport.

12, een richtlijn voor de veilige opslag en verladen van ammoniak. Deze voorzieningen bestaan uit koppelingen (Emergency Release Coupling, ERC) en inbloksystemen (Emergency Shut Down, ESD) die ervoor moeten zorgen dat bij een incident tijdens verladen maar kortdurend koud ammoniak uit de laadarmen stroomt. Stationaire systemen zoals waterschermen kunnen de verspreiding van de gaswolk tegenhouden.

Dit alles zorgt ervoor dat er bij een incident maar een korte uitstroom van ammoniak zal plaatsvinden. Koud ammoniak kan bij een incident tijdens verladen op de grond en in het water terecht komen. Van de ammoniak dat in het water terecht komt, zal een deel heftig verdampen, terwijl het andere deel oplost. De brandweer kan alleen een inzet doen bij de ammoniakplas die zich op de grond heeft gevormd. De uitstroom zal door de aanwezige voorzieningen heel beperkt zijn.

Binnenvaart

Voor een lekkage van koud ammoniak uit een binnenvaartschip geldt grotendeels hetzelfde als voor een lekkage van warm ammoniak uit een binnenvaartschip: er moet onderscheid gemaakt worden tussen een lekkage boven of onder de waterlijn. Bovendien geldt dat bij koud ammoniak de effecten minder zijn dan bij warm ammoniak. Dat geldt zowel voor het flashen als voor plasverdamping. Hierdoor zullen de effecten van koud ammoniak kleiner zijn dan bij warm ammoniak. Veel van de ammoniak zal oplossen in het water waardoor ammonia ontstaat. Dit leidt tot minder verdamping en tot kleinere effecten.

Ook bij koud ammoniak is de inzet van hulpdiensten op het water lastig en duurt het 30 tot 45 minuten voordat een blusboot kan worden ingezet, waardoor de eerste gaswolk waarschijnlijk al voorbij is.

Spoorvervoer

In de praktijk vindt dit vervoer over weg en over spoor van koude ammoniak niet tot nauwelijks plaats, vanwege de praktische beperkingen en de geringe hoeveelheden die dan vervoerd kunnen worden in relatie tot bijvoorbeeld binnenvaart. De reeds genoemde effecten en bestrijding mogelijkheden zijn voor deze modaliteit niet anders dan wat al in zijn algemeenheid is beschreven.

Wegvervoer



In de praktijk vindt dit vervoer over weg en over spoor van koude ammoniak niet tot nauwelijks plaats, vanwege de praktische beperkingen en de geringe hoeveelheden die dan vervoerd kunnen worden in relatie tot bijvoorbeeld binnenvaart. De reeds genoemde effecten en bestrijding mogelijkheden zijn voor deze modaliteit niet anders dan wat al in zijn algemeenheid is beschreven.

4.3 Methanol

Eigenschappen

Methanol is bij kamertemperatuur een kleurloze vloeistof met een typerende geur. Het is licht ontvlambaar met een vlammpunt van 9°C. De damp mengt zich goed met lucht en kan makkelijk explosieve mengsels vormen. Methanol is zowel giftig bij inslikken als bij contact met de huid en bij inademing. Voor deze studie zijn de externe veiligheidseffecten beschouwd, hierbij is met name de brandbare eigenschap beschouwd. Een methanolvlam is nauwelijks zichtbaar. Ook is de stralingswarmte naar de omgeving toe beperkt, zeker in vergelijking met vloeibare aardolieproducten.

Tabel 4.8 Eigenschappen en gevaren van methanol

Methanol		
CAS-nummer: 67-56-1	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_2 \end{array}$	UN-nummer: 1230
Eigenschappen ^{41,42}		Gevaren ^{41,43,44}
Kookpunt: 65°C Smeltpunt: -98°C Vlampunt: 9°C Zelfontbrandingstemperatuur: 440°C Explosiegrenzen in lucht: 5,5 – 44 volume % Minimale ontstekingsenergie: 0,14 mJ Dampspanning: 129 mbar bij 20°C Oplosbaarheid in water: volledig Relatieve dichtheid gas (lucht = 1): 1,1 Relatieve dichtheid (water = 1): 0,8	GEVI-code 336: zeer brandbare vloeistof, giftig ZZS: Nee H225: Licht ontvlambare vloeistof en damp H301: Giftig bij inslikken H311: Giftig bij contact met de huid H331: Giftig bij inademing H370: Veroorzaakt schade aan organen ADR/RID/ADN indeling 3: brandbare vloeistoffen 6.1: giftige stoffen Etikettering 	
Interventiewaarden⁴³ (1 uur) VRW: 710 mg/m3 AGW: 9.600 mg/m3 LBW: 15.000 mg/m3	Gevarendiamant 	
Brandbestrijdingsmaatregelen⁴² Geschikte blusmiddelen: Klasse B schuim (alcoholbestendig). Verneveld water indien plas niet kan uitbreiden. Gevaarlijke blusmiddelen: water; gevaar voor plasuitbreiding. Blusinstructies: tanks/vaten koelen met verneveld water en/of in veiligheid brengen. Lading niet verplaatsen indien aan hitte blootgesteld. Rekening houden met toxisch bluswater. Bluswater beperken, zo mogelijk opvangen of indammen.		

Scenario's

Methanol wordt met alle soorten modaliteiten vervoerd (Tabel 4.9). Dit geeft kans op meerdere lekscenario's bij lossen zeeschip, binnenvaart, spoorvervoer, wegvervoer en buisleiding.

Tabel 4.9 Mogelijke scenario's met methanol. De kleur geeft aan dat het transport is toegestaan (groen)

Methanol				
Lossen zeeschip	Binnenvaart	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
Lekkage aan boord schip	Lekkage aan boord schip	Lekkage tijdens verladen	Lekkage tijdens verladen	Lekkage door gat in leiding

41. Toxic (2021). Chemiekaarten.
 42. BIG (2022). Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen.
 43. RIVM (2025). Risico's van stoffen.
 44. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.

Methanol				
Lekkage op steiger/kade	Lekkage op steiger/kade	Lekkage tijdens rangeren	Lekkage door aanrijding	
Lekkage op het water	Lekkage op het water	Lekkage door aanrijding / ontsporing		

Milieueffect

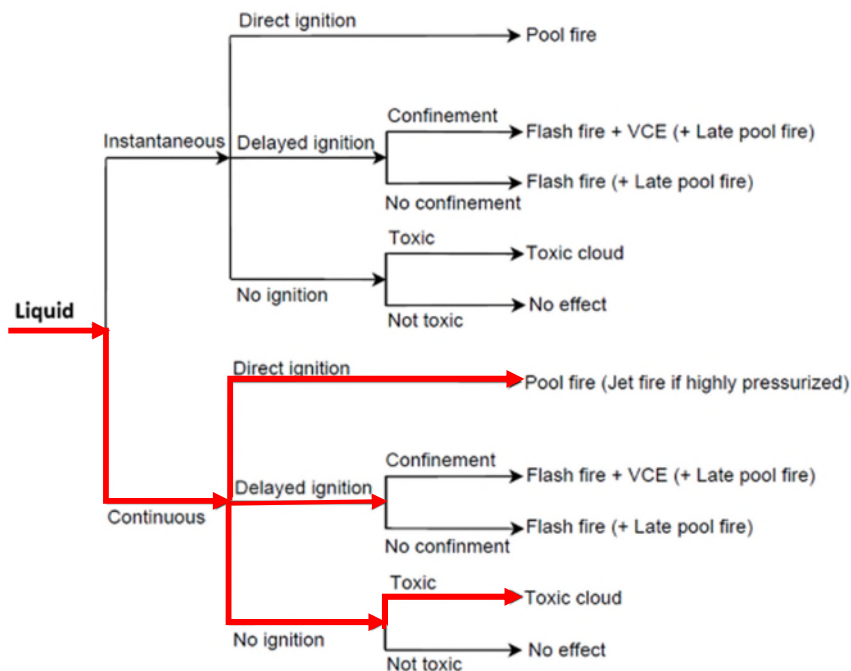
Methanol is giftig voor waterorganismen en kan bij hoge concentraties leiden tot versterking van aquatische ecosystemen. Het mengt zich gemakkelijk met water, waardoor verontreiniging van oppervlakte- en grondwater snel optreedt. In de bodem kan methanol microbiële processen beïnvloeden en zuurstofverbruik verhogen, wat tot zuurstoftekort in water kan leiden. Daarnaast is methanol vluchtig en brandbaar, waardoor ook luchtverontreiniging en explosiegevaar een rol spelen. Methanol is biologisch afbreekbaar en wordt relatief snel omgezet in CO₂ en water. Het levert derhalve geen langdurige effecten.

Effecten

Als methanol vrijkomt en ontsteekt, is er sprake van een plasbrand. Het methanol verbrandingsproces verloopt met een rookloze, niet roetende en niet zichtbare vlam. Omdat methanolvlammen relatief weinig warmte uitstralen, is de warmtestraling beperkt tot enkele meters rondom de plasbrand.

Wanneer methanol vrijkomt en niet ontsteekt, ontstaat een vloeistofplas waar methanol uit verdampt. Hoewel methanol als 'giftig' wordt geclassificeerd, ligt de letale concentratie voor inademing relatief hoog. Daardoor vormt methanol qua toxiciteit geen direct ernstig risico voor mensen en is het effect op externe veiligheid beperkt. Wel is de stof schadelijk voor het milieu.

Het vervoer van methanol vindt al jaren plaats via verschillende modaliteiten. De bijbehorende risico's, effecten en bestrijdingsmethoden zijn decennialang bekend. In bewoonde gebieden kunnen meer slachtoffers vallen dan in open of industriële gebieden. Bereikbaarheid en bluswatervoorzieningen verschillen per locatie.



Figuur 4.4 Gebeurtenissenboom voor het vrijkomen van een vloeistof⁹⁰, In het rood is de gebeurtenis van een plasbrand en toxische wolk weergegeven

Bestrijding

Methanolbranden zijn vaak onzichtbaar, waardoor warmtebeeldcamera's nodig zijn om de vlammen te kunnen waarnemen. Alcoholbestendig schuim heeft de voorkeur voor bestrijding. Of een inzet met schuim mogelijk is, hangt af van de bereikbaarheid van het incident en de beschikbaarheid van voldoende schuimvormend middel. Ook kan het lang duren voordat schuimblusvoertuigen ter plaatse zijn. Het gebruik van alleen water (dus zonder schuim) vergroot de plasbrand en leidt tot meer milieuschade. Soms is gecontroleerd uitbranden beter, zeker als er geen escalatiegevaar is.

Modaliteiten

Lossen zeeschip & binnenvaart

Als methanol bij het lossen van een zeeschip of een binnenvaartschip in het water terecht komt, zal het daarin volledig oplossen. Door het oplossen in water zal een plasbrand op het water snel worden gedoofd. Naar verwachting zal de inzet van de brandweer bij een zee- of binnenvaartschip dan ook beperkt zijn.

Spoorvervoer & wegvervoer

Bij een methanollekkage op het spoor zal een kleinere plas ontstaan dan bij een even groot incident op de weg, omdat op het spoor veel van het gelekte methanol zal wegzakken in het ballastbed. De effecten van een plasbrand en van plasverdamping zijn bij een methanollekkage op het spoor dan ook kleiner dan op de weg. De brandweer zal proberen de toevoer van methanol te stoppen en de plasbrand of plasverdamping bestrijden met alcoholbestendig schuim of te laten uitbranden. Er bestaat wel de kans dat de methanol uitstroomt naar de sloot naast het spoor, die wellicht ook gebruikt moet worden als bluswatervoorziening.

Buisleiding

Bij een lekkage van methanol uit een buisleiding kunnen grote hoeveelheden vrijkomen en kan de uitstroom lang duren. Hierdoor zullen ook de effecten van een methanollekkage groter en langduriger zijn dan bij andere modaliteiten. De uitstroom kan worden gestopt door het inblokken van de buisleiding door de exploitant. De brandweer kan proberen de plasbrand of plasverdamping te bestrijden met alcoholbestendig schuim. Of dit ook werkelijk kan, hangt af van de bereikbaarheid van het incident en van de beschikbaarheid van voldoende schuimvormend middel.




4.4 Liquid Synthetic Methane (LSM)

Eigenschappen

Liquified Synthetic Methane (LSM) is methaan dat gemaakt wordt door waterstof en kooldioxide met elkaar te laten reageren. Het methaan wordt vervolgens vloeibaar gemaakt door het te koelen naar $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gekoeld vloeibaar methaan is niet brandbaar, omdat het niet ontstoken kan worden. Als gas kan methaan echter wel ontstoken worden. Bij kamertemperatuur is methaan lichter dan lucht, kleurloos en reukloos. Methaan is ontvlambaar in het gebied van 4,4 – 17 vol.%. In een besloten omgeving kan zich een explosief gasmengsel vormen.

Waar LSM gemaakt wordt uit groene waterstof en CO_2 , wordt LNG (Liquefied Natural Gas) gemaakt door aardgas vloeibaar te maken. Dit aardgas is gewonnen uit fossiele bronnen. Zowel LSM als LNG bestaan dus uit vloeibaar methaan en gedragen zich hetzelfde, alleen hun herkomst is verschillend.

Tabel 4.10 Eigenschappen en gevaren van Liquid Synthetic Methane (LSM)

Liquid Synthetic Methane (LSM)	
CAS-nummer: 74-82-8	CH₄
	UN-nummer: 1972
Eigenschappen ^{45,46}	Gevaren ^{45,46,47,48}
Kookpunt: -161°C Smeltpunt: -182°C Vlampunt: n.v.t. (gas) Zelfontbrandingstemperatuur: 537°C Explosiegrenzen in lucht: 4,4 – 17 volume % Minimale ontstekingsenergie: 0,29 mJ Dampspanning: 333.471 mbar bij 20°C Oplosbaarheid in water: 0,02 g/L (zeer slecht) Relatieve dichtheid gas (lucht = 1): 0,6 Relatieve dichtheid (water =1): 0,4	GEVI-code 223: sterk gekoeld vloeibaar gemaakt gas, brandbaar ZZS: Nee H220: Zeer licht ontvlambaar gas H280: Bevat gas onder druk; kan ontploffen bij verwarming
	ADR/RID/ADN indeling 2.1: brandbare gassen <div style="text-align: right;"></div>
	Etikettering <div style="text-align: center;">  </div>
	Gevarendiamant⁴⁹ <div style="text-align: right;"></div>
Brandbestrijdingsmaatregelen⁴⁶ Niet geschikte blusmiddelen: water (water kan wel gebruikt worden om steekvlam te beheersen). Schuim. Blusinstructies: indien geen gevaar voor/in de omgeving: laten uitbranden. Indien gevaarlijke stoffen in de nabijheid: blussen overwegen. Enkel blussen als men gastoevoer/lek nadien kan afsluiten. Tanks/vaten koelen met verneveld water en/of in veiligheid brengen. Bij kans op fysieke explosie: blussen/koelen vanuit dekking. Lading niet verplaatsen indien aan hitte blootgesteld. Na afkoeling: blijvende kans op fysieke explosie.	

Scenario's

LSM wordt alleen vervoerd via zeevaart (**Tabel 4.11**). De scenario's die bij het lossen van zeeschip kunnen plaatsvinden gaan over een lekkage met uitstroom op het schip zelf, op de kade of op het water. Voor het vervoer van LSM gelden in Europa dezelfde modaliteiten en gevaarlijke-goederenregelgeving als voor reguliere LNG.

45. Toxic (2021). Chemiekaarten.
 46. BIG (2022). Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen.
 47. RIVM (2025). Risico's van stoffen.
 48. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.
 49. CAMEO Chemicals (2025). Methane, refrigerated liquid (cryogenic liquid).

Tabel 4.11 Mogelijke scenario's met Liquid Synthetic Methane (LSM). De kleur geeft aan of het transport is toegestaan en plaatsvindt (groen) of in de praktijk wel is toegestaan maar niet voorkomt (zwart)

Liquid synthetic methane (LSM, CH ₄)				
Lossen zeeschip	Binnenvaart	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
Lekkage aan boord schip	Lekkage aan boord schip	Lekkage tijdens verladen	Lekkage tijdens verladen	Lekkage door gat in leiding
Lekkage op steiger/kade	Lekkage op steiger/kade	Lekkage tijdens rangeren	Lekkage door aanrijding	
Lekkage op het water	Lekkage op het water	Lekkage door aanrijding / ontsporing		

Milieueffect

Bij een uitstroming heeft LSM vergelijkbare milieueffecten als aardgas, maar in vloeibare vorm kan het lokaal ernstige gevolgen hebben. Het verdampt snel en vormt een explosief gasmengsel, wat grote veiligheidsrisico's oplevert. In het milieu kan methaan, eenmaal in de atmosfeer, bijdragen aan het broeikas effect omdat het een krachtig broeikasgas is. Daarnaast kan een plotselinge verdamping leiden tot lokale afkoeling en vorstschade aan bodem en vegetatie. Hoewel LSM zelf niet giftig is voor bodem en water, zijn de indirecte effecten op klimaat en veiligheid aanzienlijk.

Effecten

LSM kan bij ontsteking een fakkelbrand, plasbrand, wolkbrand of een BLEVE geven. In een besloten omgeving bestaat kans op explosiegevaar door gasophoping (Figuur 4.5).

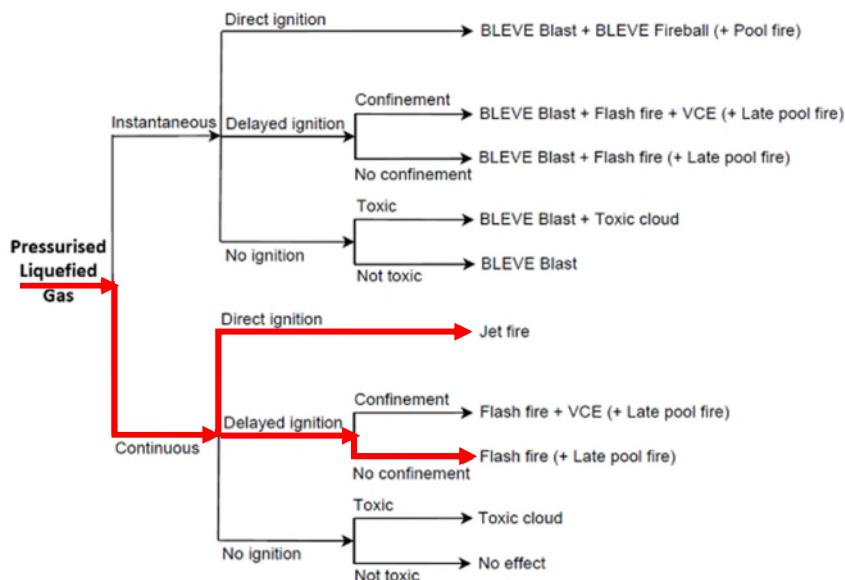
LSM verdampt zeer snel en is dan 'zichtbaar' als een witte wolk gecondenseerde waterdamp in de lucht. Zolang de temperatuur van methaan in deze wolk lager is dan - 100 °C, gedraagt het zich als een gas dat zwaarder is dan lucht.

Als er heel veel gekoeld methaan vrijkomt, zal een deel niet verdampen en vloeibaar blijven. Als dit uitstroomt op water, wordt warmte toegevoerd en zal het vloeibare methaan dermate snel verdampen, dat de verdamping de kenmerken heeft van een explosie. Dit proces wordt een Rapid Phase Transfer (RPT) genoemd.

BLEVE staat voor Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Een BLEVE ontstaat wanneer de druk in een tank plotseling wegvalt, bijvoorbeeld doordat de tank ineens openscheurt. Hierdoor zal de vloeistof meteen gaan koken (Boiling Liquid), uitzetten en verdampen (Expanding Vapour). De plotselinge uitzetting zal een overdruk (Explosion) veroorzaken in de omgeving. Wanneer het plotseling vrijgekomen gas brandbaar is en wordt ontstoken, ontstaat er een vuurball. LSM is een tot vloeistof gekoeld gas. In de praktijk kan de temperatuur in een LSM-tank echter oplopen tot waarden boven het kookpunt. LSM-tanks zijn daarom uitgevoerd als druktanks. Als de temperatuur in een tank bijvoorbeeld -150 °C is, zal de druk ca. 2,4 bar zijn. Op het moment dat een tank met LSM door brand wordt aangestraft, kan de temperatuur nog verder oplopen. Bij openbarsten van de tank kan dan een BLEVE optreden en een vuurball ontstaan.⁵⁰

Omdat verlading bij Seveso-bedrijven plaatsvindt, zijn incidenten met LSM niet in een bebouwde omgeving te verwachten. In een industriële omgeving kan een brand aanstralen op nabijgelegen objecten en gebouwen, maar bij verlading zijn dergelijke objecten en gebouwen niet te verwachten, anders dan het zeeschip en de jetty. De bereikbaarheid en aanwezigheid bluswatervoorzieningen zijn in een industrieel gebied goed.

50. NIPV (2022). [Wat is een BLEVE?](#) Brandveilig, d.d. 12 december 2022.



Figuur 4.5 Gebeurtenissenboom voor het vrijkomen van onder druk, vloeibaar gemaakt gas.³⁰ In het rood is de gebeurtenis van een fakkelbrand en een snelle wolkbrand weergegeven.

Bestrijding

Het verladen van een (zee)schip vindt altijd plaats bij Seveso-bedrijven waar het werken met grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen gangbaar is. Bij dit soort bedrijven zijn voorzieningen aanwezig vanuit PGS 33-1, een richtlijn voor de veilige opslag en verladen van vloeibaar aardgas. Deze voorzieningen bestaan uit koppelingen (Emergency Release Coupling, ERC) en inbloksystemen (Emergency Shut Down, ESD) die ervoor moeten zorgen dat bij een incident tijdens verladen maar kortdurend vloeibaar koud aardgas uit de laadarmen stroomt. Stationaire systemen zoals waterschermen kunnen de omgeving beschermen tegen warmtestraling.

Bij een incident met LSM tijdens verladen, is het te verwachten dat er vloeibaar methaan in het water terecht komt en heftig verdampt. Zolang dat aan de gang is, kan de brandweer weinig doen. De brandweer zal afstand houden en warmtebeeldcamera's gebruiken om de omvang van de wolk vast te stellen. Ook kan de brandweer de gaswolk verdunnen met waterschermen en bij brand gebouwen en objecten in de omgeving koelen om escalatie te voorkomen.⁵¹ Gegeven de genoemde aanwezige voorzieningen zal een eventuele uitstroom kort en beperkt zijn.

Bestrijding van de plasbrand of de koudkokende plas is niet mogelijk, omdat toevoer van water tot een snelle opwarming van de plas leidt en tot meer verdamping van LNG/LSM. Het is belangrijk om de plas gecontroleerd te laten uitbranden of uitdampen en de omgeving veilig te houden. Het is ook nog de vraag of de brandweer op tijd aanwezig zal zijn. Mogelijk is het scenario al voorbij voordat de brandweer ter plaatse komt. In dat geval kan de brandweer alleen effectbestrijding uitvoeren.

Bestrijding bij modaliteiten

Modaliteiten⁵²

Lossen zeeschip

LSM wordt alleen vervoerd via zeevaart. De scenario's die bij het lossen van zeeschip kunnen plaatsvinden gaan over een lekkage met uitstroom op het schip zelf, op de kade of op het water. Het verladen van een (zee)schip vindt altijd plaats bij Seveso-bedrijven. Bij dit soort bedrijven zijn voorzieningen aanwezig vanuit PGS 33-1, een richtlijn voor de veilige opslag en verladen van vloeibaar aardgas.

Binnenvaart

Bij een incident tijdens het varen van het binnenvaartschip is de bereikbaarheid van de incidentlocatie lastig.

51. Brandweer Nederland (2016). [Richtlijn bestrijding LNG-incidenten](#) – Laden en lossen.

52. De stof LSM komt nog niet (veelvuldig) voor. Wel wordt de stof LNG vervoerd, in alle type modaliteiten.

Bij een incident tijdens verladen treedt het noodplan van het bedrijf in werking en zal de overheidsbrandweer de inzet plegen volgens uitgewerkte incident- en aanvalsplannen.

Spoor- en wegvervoer

De reeds genoemde effecten en bestrijdingsmogelijkheden zijn voor deze modaliteiten zoals omschreven onder Bestrijding algemeen.

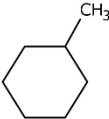



4.5 Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's)

Eigenschappen

Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) zijn vloeibare koolwaterstoffen die in staat zijn waterstof op te nemen en weer vrij te geven door middel van een chemische reactie. Er is altijd sprake van een waterstofrijke variant en een waterstofarme variant. In dit rapport worden methylcyclohexaan als waterstofrijke variant en toluen als waterstofarme variant uitgewerkt.

Methylcyclohexaan is een brandbare kleurloze vloeistof met een kenmerkende geur die onoplosbaar is in water. Het in grote hoeveelheden inademen van de damp kan slaperigheid veroorzaken. Aanraking van de vloeistof kan de huid irriteren. Toluene is net als methylcyclohexaan een brandbare kleurloze vloeistof met een kenmerkende geur. De (gevaars)eigenschappen komen voor een groot deel overeen met die van methylcyclohexaan.

Tabel 4.12 Eigenschappen en gevaren van de LOHC methylcyclohexaan

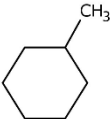
Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) Methylcyclohexaan	
	CAS-nummer: 108-87-2 UN-nummer: 2296
Eigenschappen ^{53,54}	Gevaren ^{53,55,56}
Kookpunt: 101°C Smeltpunt: -126°C Vlampunt: -4°C Zelfontbrandingstemperatuur: 250°C Explosiegrenzen in lucht: 1,1 – 6,7 volume % Minimale ontstekingsenergie: 0,27 mJ Dampspanning: 48,3 mbar bij 20°C Oplosbaarheid in water: 0,014 g/L (zeer slecht) Relatieve dichtheid gas (lucht = 1): 3,4 Relatieve dichtheid (water = 1): 0,8	GEVI-code 33: zeer brandbare vloeistof (vlampunt lager dan 23°C) ZZS: Nee H225: Licht ontvlambare vloeistof en damp H304: Kan dodelijk zijn als de stof bij inslikken in de luchtwegen terecht komt H315: Veroorzaakt huidirritatie H336: Kan slaperigheid of duizeligheid veroorzaken H411: Giftig voor in het water levende organismen, met langdurige gevolgen
	ADR/RID/ADN indeling 3: brandbare vloeistoffen 
	Etikettering 
	Gevarendiamant 

53. Toxic (2021). Chemiekaarten.

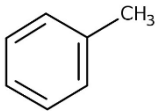



54. BIG (2022). Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen.

55. RIVM (2025). Risico's van stoffen.

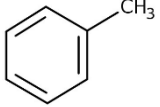
56. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.

	Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) Methylcyclohexaan	CAS-nummer: 108-87-2	UN-nummer: 2296
Eigenschappen ^{53,54}		Gevaren ^{53,55,56}	
Brandbestrijdingsmaatregelen⁵⁸ Geschikte blusmiddelen: Klasse B schuim (niet alcoholbestendig). Gevaarlijke blusmiddelen: water; gevaar voor plasuitbreiding.			
Blusinstructies: indien geen gevaar voor/in de omgeving: laten uitbranden. Indien gevaarlijke stoffen in de nabijheid: blussen overwegen. Tanks/vaten koelen met verneveld water en/of in veiligheid brengen. Blussen/koelen vanuit onbemande monitoren of vanuit dekking. Lading niet verplaatsen indien aan hitte blootgesteld. Rekening houden met milieuverontreinigend bluswater. Bluswater beperken, zo mogelijk opvangen of indammen.			

Tabel 4.13 Eigenschappen en gevaren van de LOHC toluen

	Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) Toluene	CAS-nummer: 108-88-3	UN-nummer: 1294
Eigenschappen ^{57,58}		Gevaren ^{57,59,60}	
Kookpunt: 111°C Smeltpunt: -95°C Vlampunt: 4°C Zelfontbrandingstemperatuur: 480°C Explosiegrenzen in lucht: 1 – 7,8 volume % Minimale ontstekingsenergie: 0,24 mJ Dampspanning: 29 mbar bij 20°C Oplosbaarheid in water: 0,5 g/L (zeer slecht) Relatieve dichtheid gas (lucht = 1): 3,1 Relatieve dichtheid (water = 1): 0,9	GEVI-code 33: zeer brandbare vloeistof (vlampunt lager dan 23°C) ZZS: Nee H225: Licht ontvlambare vloeistof en damp H304: Kan dodelijk zijn als de stof bij inslikken in de luchtwegen terecht komt H315: Veroorzaakt huidirritatie H336: Kan slaperigheid of duizeligheid veroorzaken H361d: Wordt ervan verdacht het ongeboren kind te schaden H373: Kan schade aan organen veroorzaken bij langdurige of herhaaldelijke blootstelling	ADR/RID/ADN indeling 3: brandbare vloeistoffen	
		Etikettering	
Interventiewaarden⁵⁹ (1 uur) VRW: 260 mg/m ³ AGW: 2.100 mg/m ³ LBW: 14.000 mg/m ³	Gevarendiamant		

57. Toxic (2021). Chemiekaarten.
 58. BIG (2022). Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen.
 59. RIVM (2025). Risico's van stoffen.
 60. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.

Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's)	
Tolueen	
CAS-nummer: 108-88-3	UN-nummer: 1294
Eigenschappen^{57,58}	Gevaren^{57,59,60}
Brandbestrijdingsmaatregelen⁵⁸	
Geschikte blusmiddelen: Klasse B schuim (niet alcoholbestendig). Gevaarlijke blusmiddelen: water; gevaar voor plasuitbreiding.	
Blusinstructies: tanks/vaten koelen met verneveld water en/of in veiligheid brengen. Lading niet verplaatsen indien aan hitte blootgesteld.	

Scenario's

LOHC's worden met alle modaliteiten vervoerd, waardoor lekscenario's bij al deze modaliteiten mogelijk zijn.

Tabel 4.14 Mogelijke scenario's met Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's). De kleur geeft aan dat het transport is toegestaan (groen)

LOHC (methylcyclohexaan – tolueen)				
Laden/lossen (zee)schip	Binnenvaart	Spoorvervoer	Wegvervoer	Buisleiding
Lekkage aan boord schip	Lekkage aan boord schip	Lekkage tijdens verladen	Lekkage tijdens verladen	Lekkage door gat in leiding
Lekkage op steiger/kade	Lekkage op steiger/kade	Lekkage tijdens rangeren	Lekkage door aanrijding	
Lekkage op het water	Lekkage op het water	Lekkage door aanrijding / ontsporing		

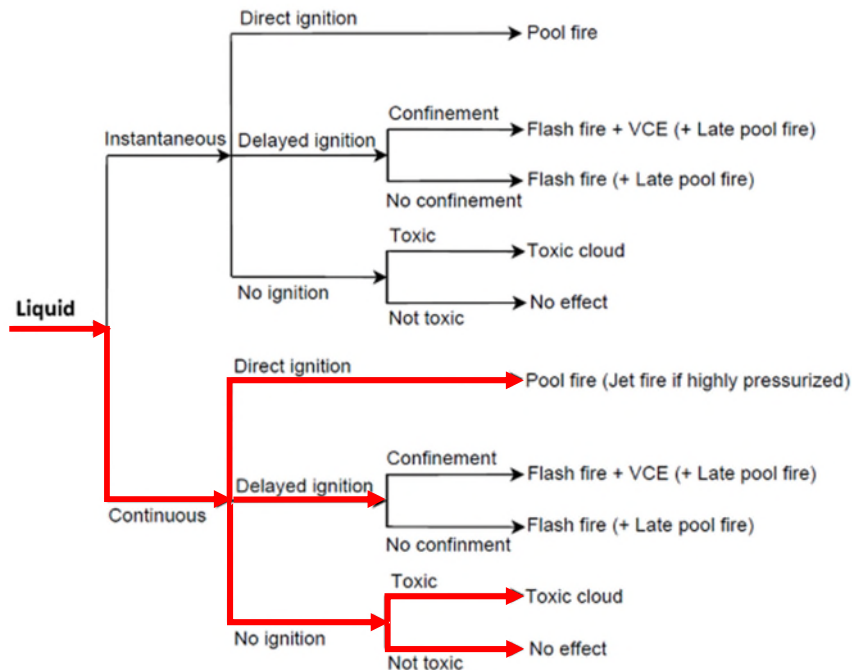
Milieueffect

Voor wat betreft de LOHC is een belangrijk aspect het potentieel lange termijn-effect bij vrijkomen in het milieu. Zo stelt het RIVM⁶¹ dat alle door het RIVM onderzochte LOHC's één of meerdere stoffen met ZZS-eigenschappen hebben. Echter, de mate waarin ZZS aanwezig zijn of gevormd worden kan verschillen. Tijdens de waterstofafgifte van de circulaire LOHC's zoals methanol en mierenzuur kan de ZZS-koolmonoxide gevormd worden. Het gevormde koolmonoxide kan wel in hetzelfde proces weer met water reageren tot de waterstofarme drager koolstofdioxide (CO₂). De reversibele aromatische LOHC-tolueen en methylcyclohexaan vormen drie ZZS-bijproducten tijdens herhaaldelijke waterstofbinding en -afgifte waarvan de ZZS benzeen het belangrijkste bijproduct is. Bij de overige reversibele (hetero)aromatische LOHC's heeft tenminste de waterstofarme drager ZZS-eigenschappen. Dit betekent dat transport en opslag van deze vloeibare waterstofdragers gepaard gaat met grote ZZS-volumes. (ZZS)⁶².

Effecten

Als LOHC's vrijkomen, zal een plas ontstaan die bij directe ontsteking een plasbrand geeft en bij vertraagde ontsteking een wolkbrand gevolgd door een plasbrand.

61. RIVM, Januari 2024: Factsheet-vermijd-zeer-zorgwekkende-stoffen-zoveel-mogelijk-in-vloeibare-waterstofdragers.pdf.
 62. RIVM, <https://www.rivm.nl/publicaties/liquid-hydrogen-carriers-overview-of-technical-aspects-and-svhc-properties>.



Figuur 4.6 Gebeurtenissenboom voor het continu vrijkomen van een vloeistof⁸⁰

Als een LOHC vrijkomt en direct ontsteekt, ontstaat er een plasbrand. De warmtestraling rondom de plasbrand kan (tientallen) meters ver reiken en in een bebouwde omgeving nabijgelegen objecten en gebouwen aanstralen. In een open en/of industrieel gebied is de kans daarop lager. Vervoer van dit soort gevaarlijke vloeistoffen is bekend en vindt al jaren plaats met verschillende modaliteiten. Ook de bijbehorende risico's, effecten en bestrijding zijn decennialang bekend.

De bereikbaarheid en aanwezige bluswater-voorzieningen zijn in een bebouwde omgeving en in een industriële omgeving beter dan in open gebied.

Bestrijding

Plasbranden van LOHC's zijn goed zichtbaar. De brandweer kan de plas gecontroleerd laten uitbranden of afdekken met schuim. De inzet van schuim kan alleen wel erg lang duren door de lange opkomsttijd van schuimblusvoertuigen. Voorkomen moet worden dat de plasbrand groter wordt als gevolg van toevoer van water. De brandweer kan gebouwen en objecten in de omgeving koelen om escalatie te voorkomen.

Modaliteiten

Laden/lossen zeeschip & binnenvaart

De meeste LOHC's zijn zeer slecht oplosbaar in water, dit geldt ook voor methylcyclohexaan en toluen. Omdat de dichtheid van LOHC's lager is dan van water, zullen LOHC's bij uitstroom op water blijven drijven. Dit zorgt voor snelle verspreiding van de plas. Als de plas brandt, kan de verspreiding tot branduitbreiding leiden. Daar staat tegenover dat door de verspreiding een plasbrand op het water korter duurt dan op land en mogelijk al opgebrand is voordat de brandweer aanwezig is.

Een plasbrand op het water in de buurt van bebouwde omgeving is alleen mogelijk bij een aanvaring van een binnenvaartschip. Dat kan aan de kade zijn of op de vaarweg. In beide situaties is de bereikbaarheid van de incidentlocatie lastig. Aanwezige blusmiddelen kunnen niet toereikend zijn, waardoor blusboten ingezet moeten worden. Een plasbrand op het water tijdens verladen van LOHC's kan alleen plaatsvinden in industrieel gebied. Daar zullen blusmiddelen toereikend zijn, tenzij ook daar blusboten nodig zijn.

Spoorvervoer & wegvervoer

Bij een lekkage van een LOHC op het spoor zal een kleinere plas ontstaan dan bij een even groot incident op de weg, omdat op het spoor veel van de gelekte vloeistof zal wegzakken in het ballastbed. De effecten van een plasbrand en van plasverdamping zijn bij een LOHC-lekkage op het spoor dan ook kleiner dan op de weg.

De brandweer zal proberen de toevoer van de lekkende vloeistof te stoppen en de plasbrand laten uitbranden of bestrijden met schuim. Er bestaat wel de kans dat de vloeistof uitstroomt naar de sloot naast het spoor, die wellicht ook gebruikt moet worden al bluswatervoorziening.

Buisleiding

Bij een lekkage van een LOHC uit een buisleiding kunnen grote hoeveelheden vrijkomen en kan de uitstroom lang duren. Hierdoor zullen ook de effecten van de lekkage groter en langduriger zijn dan bij andere modaliteiten. De uitstroom kan worden gestopt door het inblokken van de buisleiding door de exploitant. De brandweer kan de plasbrand laten uitbranden of bestrijden met schuim. Of dit laatste ook werkelijk kan, hangt af van de bereikbaarheid van het incident en van de beschikbaarheid van voldoende schuimvormend middel.

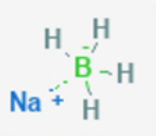



4.6 Boorhydrides (natrium- en kaliumboorhydrides)

Eigenschappen

Boorhydrides zoals natriumboorhydride (NaBH_4) en kaliumboorhydride (KBH_4) zijn vaste stoffen, vaak in poeder- of granulaatvorm. Ze zijn giftig bij inslikken en kunnen bij contact ernstige brandwonden en oogletsel veroorzaken. Boorhydrides vormen waterstof als ze in contact komen met water.

Op dit moment vinden pilots plaats om boorhydrides te gebruiken als brandstof, voornamelijk voor schepen. Hierbij reageert de boorhydride met water waarbij waterstof vrijkomt dat gebruikt wordt als brandstof voor de scheepsmotor.

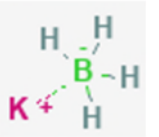

Tabel 4.15 Eigenschappen en gevaren van natriumboorhydride

Boorhydrides Natriumboorhydride	
	CAS-nummer: 16940-66-2 UN-nummer: 1426
Eigenschappen ^{63,64}	Gevaren ^{63,65,66}
Kookpunt: > 400°C Smeltpunt: > 360°C Vlampunt: n.v.t. (vaste stof) Zelfontbrandingstemperatuur: > 400°C Dampspanning: < 5,4E-7 mbar bij 25°C Oplosbaarheid in water: 550 g/L (goed) Relatieve dichtheid gas (lucht =1): 1,3 Relatieve dichtheid (water = 1): 1,07	ZZS: Ja H260: In contact met water komen ontvlambare gassen vrij die spontaan kunnen ontbranden H301: Giftig bij inslikken H314: Veroorzaakt ernstige brandwonden en oogletsel H318: Veroorzaakt ernstig oogletsel H360: Kan de vruchtbaarheid of het ongeboren kind schaden
	ADR/RID/ADN indeling 4.3: stoffen die in contact met water brandbare gassen ontwikkelen 
	Etikettering 
	Gevarendiamant 

63. Toxic (2021). Chemiekaarten.
 64. BIG (2020). Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen.
 65. RIVM (2025). Risico's van stoffen.
 66. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.

	Boorhydrides Natriumboorhydride	CAS-nummer: 16940-66-2	UN-nummer: 1426
Eigenschappen ^{63,64}		Gevaren ^{63,65,66}	
Brandbestrijdingsmaatregelen⁶⁴ Geschikte blusmiddelen: klasse B schuim (na advies specialist). Gevaarlijke blusmiddelen: water. Klasse A schuim. Blusinstructies: bij koelen/blussen: contact van product met water vermijden. Rekening houden met toxisch bluswater. Bluswater beperken, zo mogelijk opvangen of indammen.			

Tabel 4.16 Eigenschappen en gevaren van kalumboorhydride

	Boorhydrides Kalumboorhydride	CAS-nummer: 13762-51-1	UN-nummer: 1870
Eigenschappen		Gevaren ^{67,68}	
		ZZS: Geen gegevens H301: Giftig bij inslikken H314: Veroorzaakt ernstige brandwonden en oogletsel H318: Veroorzaakt ernstig oogletsel H360: Kan de vruchtbaarheid of het ongeboren kind schaden	
		ADR/RID/ADN indeling 4.3: stoffen die in contact met water brandbare gassen ontwikkelen	
		Etikettering 	

Scenario's

Boorhydrides worden op dit moment alleen vervoerd in verpakkingen van maximaal 250 kilogram en voornamelijk via wegtransport. Transport in bulk is niet toegestaan. Dit heeft onder andere als reden dat transport in andere modaliteiten en in bulk nooit is aangevraagd en hiervoor dus geen beoordeling is gedaan en geen regelgeving is vastgesteld. Voor de toepassing waarvoor het wordt gebruikt (farmaceutische industrie) zijn grotere verpakkingseenheden ook niet nodig.

Het scenario dat kan optreden, is het openscheuren van de verpakking door een aanrijding of bij verlading. Als boorhydrides dan in aanraking komen met water, ontstaat waterstof. Dit kan tot drukopbouw in de verpakking of daarbuiten leiden. In het slechtste geval hoopt waterstof zich op in een besloten ruimte en geeft bij ontsteking een explosie.

Er is weinig casuïstiek beschikbaar, alleen incidenten waarbij sprake was van vochtproblemen die hebben geleid tot drukopbouw in drums waarbij het deksel van de drum omhoog kwam. Er vinden momenteel proeven plaats

67. RIVM (2025). Risico's van stoffen.

68. ECHA CHEM (2025). ECHA Chemicals database.

om de exacte effecten van boorhydrides vast te stellen. Hierbij wordt onderzocht in hoeverre en in welke mate een brandbaar waterstofmengsel ontstaat.

Nader onderzoek is nodig om de exacte gevaarseigenschappen en de effecten van boorhydrides vast te stellen en te bepalen of en onder welke voorwaarden transport in grotere hoeveelheden en/of in andere modaliteiten toegestaan kan worden.

Tabel 4.17 Mogelijke scenario's met boorhydrides. De kleur geeft aan of het transport is toegestaan (groen), niet toegestaan (rood) of in de praktijk niet voorkomt (zwart)

Hydrides (NaBH ₄ en KBH ₄)				
Lossen zeeschip	Binnenvaart ⁶⁹	Spoorvervoer	Wegvervoer ⁷⁰	Buisleiding
			Openscheuren verpakkingen door aanrijding, vorming H ₂ door contact met water.	Lekkage door gat in leiding

Milieueffect

Van natriumboorhydride is bekend dat het een ZZS is. Voor kaliumboorhydride ontbreken de gegevens hierover. Boorhydrides, zoals natriumboorhydride, reageren snel in contact met water waarbij behalve waterstof ook boraten ontstaan, die de pH van water verhogen en giftig zijn voor aquatische organismen. Boraten breken niet gemakkelijk af, waardoor ze zich kunnen ophopen in bodem en water en langdurige ecologische schade veroorzaken, zoals verstoring van ecosystemen en toxiciteit voor vissen en ongewervelden.

Effecten

Het gevaar van boorhydrides is als de stof na vrijkomen in contact komt met water wat leidt tot een reactie waarbij waterstof ontstaat. Als er ontsteking plaatsvindt kan brand ontstaan. Het vrijkomen zal niet plaatsvinden in een besloten ruimte, dus het ophopen van een explosief mengsel zal niet plaatsvinden.

De reactie gebeurt als de stof in het water terecht komt (in een sloot of een grotere plas) of als na vrijkomen water wordt toegevoegd. Recente proeven laten zien dat dan eerst enkele minuten sprake is van een heftige reactie waarbij veel waterstof wordt gevormd, en dat daarna een evenwichtssituatie ontstaat waarbij de reactie doorgaat, maar in minder heftige vorm en dus in mindere mate waterstof wordt gevormd. Er zijn geen bewijzen dat er sprake zou zijn van een extreme temperatuurstijging door de reactie.

Als het water 'op is' dan stopt de reactie. Dit kan bijvoorbeeld zijn als de stof in een plas valt. Ook als er overmatig veel stof in een kleinere hoeveelheid water komt (een plas) dan smooit de reactie.

De vorm van de vaste stof maakt ook uit: in poedervorm vindt veel meer oplossing in water plaats, waardoor de reactie en waterstofvorming meer is dan in granulaatvorm, wat veel minder oplost in water en daarmee trager reageert.

Bestrijding

Komt bij een incident de vaste stof vrij en vindt er geen reactie plaats, omdat er geen water wordt toegevoegd aan het gelekte product, dan kan de lekkage worden ingedamd om verdere verspreiding te voorkomen. Voorkomen moet worden dat het naar een waterige omgeving terecht komt. Na het indammen kan het gecontroleerd worden opgeruimd. In de ruimte waar het gelekte product wordt ingepompt kan een stabilisator worden voorgelegd om een reactie te voorkomen (bijvoorbeeld NaOH).

Alleen in contact met water treedt er een reactie op waarbij waterstof ontstaat. Dit betekent dat de brandweer niet met water mag optreden zolang de vaste stof zichtbaar is. Bij kleine verpakkingen en in de buitenlucht is er

⁶⁹ Zowel natriumboorhydride (UN 1426) als kaliumboorhydride (UN 1870) mogen via binnenvaart worden vervoerd, maar dit vindt niet in bulk plaats maar verpakt in bijvoorbeeld waterdichte big bags, of verpakt in containers.

⁷⁰ Ook via Weg of spoor worden boorhydrides niet in bulk maar in kleinere verpakkingen vervoerd (zie ook voorgaande voetnoot). Omdat boorhydrides dan geheel buiten de scope zouden vallen, is ervoor gekozen hier wel een scenario voor op te stellen, ondanks het feit dat er dus geen bulktransport plaatsvindt.

geen probleem, dan kan de stof prima weg reageren: de hoeveelheid waterstof leidt in de buitenlucht niet tot een voor de externe veiligheid relevante hoeveelheid.

Mogelijke bestrijding strategieën zijn:

- Niets doen en de reactie laten uit reageren.
 - o Dit zal de eerste paar minuten heftiger zijn, maar daarna ontstaat een stabiele situatie waarbij de reactie doorgaat, maar er in mindere mate waterstof vrijkomt.
 - o Eventueel na aankomst brandweer ontruimen en omgeving afzetten.
- Wel ingrijpen
 - o Geen water / schuim toevoegen!
 - o Indammen van de lekkage.
 - o Goede ventilatie om waterstofophoping te voorkomen.
 - o Ontstekingsbronnen verwijderen.
 - o Opruimen in droge ruimte (evt. met stabilisator voorgelegd).

Omdat de brandweer er doorgaans niet binnen enkele minuten zal zijn, lijkt de eerste optie – niets doen - een goede optie.

Mogelijkheden om de reactie te stoppen:

- Het water verwijderen uit de reactie, als dit mogelijk is.
- Gebruik van basische stoffen als stabilisator (bijvoorbeeld NaOH) om reactie te remmen.

5. Handelingsperspectief brandweer

De onderzoeksvraag omvat zowel het inventariseren van de meest actuele kennis en stand van zaken met betrekking tot risico's, effecten en handelingsperspectieven bij incidenten en ongevallen met waterstofdragers tijdens transport, als het ontginnen van nieuwe kennis en inzichten en het identificeren van gebieden waar verdere kennisontwikkeling noodzakelijk is. In dit hoofdstuk zijn de uitgangspunten omschreven die leidend zijn geweest voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag. De uitgangspunten zijn gebaseerd op de informatie die in dit onderzoek is verzameld (genoemde literatuur aangevuld met de parate kennis van experts uit het consortium, leden van de klankbordgroep en het expert judgement van het consortium).

Het handelingsperspectief van de brandweer bij transportincidenten van brandbare waterstofdragers is vergelijkbaar met die voor andere brandbare gevaarlijke stoffen.

- Voor gasvormige waterstof is dit vergelijkbaar met aardgas, waarbij opgemerkt wordt dat bij waterstof sprake is van een hogere ontstekingskans. Afhankelijk van de condities zal waterstof sneller ontbranden. In geval van een explosie zal de brandweer inzetten op bestrijding van de gevolgeffekten. Waterstof krijgt hierdoor een iets hogere risicoscore dan de huidige brandbare energiedragers
- Voor vloeistoffen als methanol en LOHC geldt dat de bestrijding van deze stoffen identiek is aan de bestrijding van brandbare vloeistoffen zoals benzine en kerosine. Voor LOHC speelt echter de factor ZZS mee: bij de bestrijding van een incident met LOHC kan als gevolg van ZZS een grote milieuvervuiling optreden met een langdurig effect.

Voor cryogene transporten is het van belang te beoordelen of tot een inzet met water of schuim moet worden overgegaan, omdat dit tot opwarming en hiermee escalatie van een incident kan leiden.

Dit wordt ook verondersteld voor een incident met boorhydriden. Over boorhydriden is echter niet veel bekend, nader onderzoek wordt aanbevolen.

- Voor incidenten met ammoniak, cryogene stoffen en boorhydriden verdient het de voorkeur om het incident gecontroleerd te beheersen en voor inhoudelijke expertise direct contact op te nemen met experts. De lokale AGS zal in dit geval via de landelijke AGS (LIOGS) contact met het Platform Industriële Incidentbestrijding of andere specialisten moeten opnemen, en gezamenlijk afstemmen wat de beste bestrijdingsstrategie is. Het is onduidelijk of dit momenteel al goed en eenduidig geregeld is.

Taken die direct moeten worden opgepakt, zijn het afzetten van het incidentgebied en ontruimen/evacueren van de omgeving dan wel aanwezigen laten schuilen.

Bij een toxische wolk dient de inzet primair te worden gericht op mensen alarmeren en binnenshuis krijgen zodat slachtoffers worden voorkomen.

- Inzet met waterschermen (zie kader) verdient nader onderzoek: welke typen scenario's zijn te onderscheiden, welke kennis is nodig voor een juiste inzet, welke middelen zijn nodig, etc.

De inzet van waterschermen bij met name een incident met ammoniak kan in gecontroleerde omstandigheden zorgen voor het afvangen van 90% van de ammoniak. Deze effectiviteit is wel sterk afhankelijk van factoren zoals de omvang van de uitstroom, juiste middelen, de positie van het waterscherm (onderzoek NIPV)⁷¹. Hoe verder je van de bron staat, hoe minder het effect wordt. Als het waterscherm niet goed wordt ingesteld, kan een incident escaleren, bijvoorbeeld wanneer water van het waterscherm in contact komt met een koudkokende ammoniakplas. Tenslotte zal voordat het waterscherm staat, er al sprake kan zijn van een benedenwinds effectgebied in de omgeving

- Voor wat betreft de vereiste kennis: organisaties als een bedrijfsbrandweer bij een Seveso bedrijf of zoals bijvoorbeeld de Gezamenlijke Brandweer in het Rotterdams Havengebied of van Ebert Hera (voorheen Sitech) op de chemie site Chemelot zijn geoefende teams die dagelijks te maken hebben met gevaarlijke stoffen. Corebusiness bij training en opleiding van personeel is gericht op incidentbestrijding met gevaarlijke stoffen. Dit in tegenstelling tot overheidsbrandweer/vrijwillige brandweer waar een scala aan andere typen incidentbestrijding kan voorkomen (denk aan het bestrijden van brand in woningen of kantoren, inzet bij wegingidenten, e.d.). Het is de vraag of het haalbaar is om deze brandweer ook op

71. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/03/20231222-NIPV-Waterschermen-en-waterstralen.pdf>.

hetzelfde kennisniveau te krijgen als de eerdergenoemde bedrijfsbrandweren. Daarvoor dient eerst de vraag beantwoord te worden welk risico we als samenleving accepteren als restrisico.

6. Analyse

6.1 Algemeen

Als eerste merken we op dat voor het transport van gevaarlijke stoffen de keuze voor een modaliteit niet wordt bepaald aan de hand van het veiligheidsaspect. De keuze hangt van vele factoren af en wordt bepaald door de ontvanger (klant). Factoren die een rol spelen, zijn de beschikbaarheid van een modaliteit (is er een buisleiding beschikbaar en kan de klant hiermee bereikt worden), kosten, volumestroom, mogelijkheden van verladen bij klant, capaciteit van de modaliteit, etc. Veiligheid is dus niet bepalend voor de keuze, maar is wel randvoorwaardelijk voor de feitelijke uitvoering van het transport.

In haar Kabinetsvisie Waterstofdragers⁷² stelt de overheid de volgende voorkeursvolgorde uit voor met name het transport van ammoniak (een toxische stof): 1) Buisleiding; 2) Binnenvaart; 3) Spoor en 4) Weg. Omdat veiligheid op verschillende manieren wordt geïnterpreteerd, kunnen beleidsmakers tot andere voorkeursopties komen. Zo geeft Duitsland de voorkeur voor transport via binnenvaartschip of trein: daar wordt het kortdurende passeren van binnenvaartschip of trein als minder risicovol gezien dan een ondergrondse buisleiding⁷³. Daarentegen spreekt de overheid in Nederland haar voorkeur uit voor transport via buisleidingen.

Om te toetsen of de Kabinetsvisie aansluit op bevindingen uit dit onderzoek voor wat betreft het aspect Veiligheid zijn in dit hoofdstuk de modaliteiten en het handelingsperspectief van de brandweer bij de bestrijding van een incident onderling vergeleken. In paragraaf 6.2 zijn de modaliteiten aan de hand van vier factoren ten opzichte van elkaar vergeleken. De factoren waaraan getoetst is zijn: 1) **Kans op een incident**; 2) **Omvang uitstroom**; 3) **Bebouwde omgeving incident** en 4) **Bereikbaarheid hulpverlening**. Vervolgens zijn in paragraaf 6.3 de waterstofdragers ten opzichte van elkaar vergeleken op basis van de volgende twee factoren: **Invloedsgebied van de specifieke stof** en **Veronderstelde bekendheid bestrijding bij brandweer**. Dit is gedaan op basis van expert judgement aan de hand van de bevindingen van deze studie. In paragraaf 6.4 tenslotte is de keuze uit de Kabinetsvisie getoetst aan de resultaten van de analyses uit 6.2 en 6.3.

In dit hoofdstuk is het proces laden/lossen niet meegenomen: voor de import van waterstofdragers vanuit overzeese gebieden is laden/lossen via zeeschepen noodzakelijk, en onafhankelijk van de keuze met welke modaliteit de waterstofdrager verder naar het achterland wordt getransporteerd.

6.2 Vergelijking en scores modaliteiten

Omdat in dit onderzoek uitsluitend gekeken wordt naar het aspect veiligheid, is aan de hand van de bevindingen uit deze studie gekeken welke factoren bij een uitstroom van een gevaarlijke stof een rol spelen. Voor de beschouwing zijn de volgende factoren getoetst:

- **Kans op een incident**: alhoewel de kans en het voorkomen van een incident buiten de scope van het onderzoek valt, is kans naar de mening van de onderzoekers wel een relevante factor en daarom meegenomen. De score is gebaseerd op de ongevallenstatistieken: weg kent de hoogste ongevalskans, gevolgd door spoor (enkele gevallen met uitstroom bekend in buurlanden), daarna buisleiding en tenslotte binnenvaart als laatste daar hier geen incidenten met uitstroom bekend zijn.⁷⁴
- **Omvang uitstroom**: de omvang van de uitstroom is afgeleid van de mogelijke transportvolumes per vervoerseenheid per modaliteit. Wegtransport heeft in alle gevallen de kleinste volumes per transporteenheid, buisleiding kent de grootste volumes.
- **Bebouwde omgeving incident** (vindt transport plaats door of langs bebouwde omgeving of niet). Hierbij is gekeken in welke mate een modaliteit in de nabijheid van bebouwd gebied komt. Hierbij krijgt spoor de hoogste score omdat spoor (behalve de Betuweroute) altijd door woonkernen loopt. Buisleidingen en wegen krijgen de laagste score omdat deze niet door of langs binnenstedelijk gebied lopen. Binnenvaart loopt in enkele gevallen door of dicht langs binnenstedelijk gebied.
- **Bereikbaarheid hulpverlening**: de bereikbaarheid bij een transportmodaliteit bij de bestrijding van een incident op een transportroute. Hierbij is gesteld dat een incident op de weg het beste bereikbaar is, en in geval van buisleiding en binnenvaart het minst goed bereikbaar is.

72. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2025/09/25/stand-van-zaken-kabinetsvisie-waterstofdragers>.

73. <https://www.ikem.de/studie-ammoniaktransport/>.

74. Info: KBN.

Zoals eerder gesteld is de wet- en regelgeving erop gericht om een incident tijdens transport te voorkomen. In Nederland zijn geen ongevallen tijdens transport bekend waarbij het effect tot buiten de infrastructuur plaatsvindt. Er zijn de afgelopen jaren wel incidenten geweest met uitstroom voor de modaliteiten weg, spoor en buisleiding. De scores moeten derhalve in **relatieve zin** worden gezien: het gaat erom hoe een modaliteit ten opzichte van andere modaliteiten scoort kijkende naar de potentiële uitstroom van een gevaarlijke stof.

De volgende relatieve scores zijn bij de beoordeling gehanteerd:

Laagste relatieve risicoscore
Lage relatieve risicoscore
Gemiddelde relatieve risicoscore
Hoogste relatieve risicoscore

De scores zijn gedaan op basis van expert judgement door de onderzoekers op basis van parate kennis van de modaliteiten, de informatie uit de workshops met experts (zie bijlage 3) en de casuïstiek.

Tabel 6.1 Scores verschillende modaliteiten⁷⁵

Modaliteit	Kans incident	Omvang uitstroom	Bebouwde omgeving incident	Bereikbaarheid hulpverlening (brandweer)
Buisleiding				
Binnenvaart				
Spoor				
Weg				

Beschouwing

Welke modaliteit qua veiligheid de voorkeur heeft, hangt af van de criteria die worden gekozen:

- Als de **kans op een incident met waterstofdragers zo klein mogelijk** moet zijn, heeft transport via binnenvaart de voorkeur, deze score is gebaseerd op het feit dat er geen incidenten met uitstroom van een binnenvaartschip bekend zijn. Bij een aanvaring zijn de beveiligingen dermate dat kans op een uitstroom zal plaatsvinden. Buisleiding heeft gezien de volumes afgezet tegen het aantal incidenten de volgende beste optie, gevolgd door spoor en als laatste weg.
- Als de **omvang van de uitstroom zo klein mogelijk** moet zijn, heeft transport via weg gevolgd door spoor de voorkeur omdat de inhoud (en hiermee de totale maximale hoeveelheid vrijkomend product bij een incident) kleiner zijn dan bij binnenvaart en buisleidingen.⁷⁶ Buisleidingen kunnen tot de grootste potentiële uitstroom leiden. We merken hierbij op dat binnenvaart, vanwege de grote volumes, hierna de grootste potentiële score krijgt echter gezien de getroffen beveiligingen is het zeer onwaarschijnlijk dat dit in de praktijk zal vrijkomen.
- Als **effecten niet of beter gezegd zo minimaal mogelijk plaats mogen vinden in binnenstedelijk gebied**, heeft transport via buisleiding en weg de voorkeur omdat deze doorgaans niet door binnenstedelijk gebied lopen. Dit behoeft een nuancering: in alle gevallen kan sprake zijn van uitstroom in bebouwde omgeving: wegen en buisleidingen lopen weliswaar niet door binnenstedelijk gebied, maar wel in de ring rond een stad (bij weg) of langs een stad of dorp (buisleiding).
- Als de **bereikbaarheid voor de brandweer bij de bestrijding van een incident** zo optimaal mogelijk moet zijn, verdient de modaliteit weg de voorkeur, boven de modaliteiten buisleiding en binnenvaart.

6.3 Vergelijking en scores transport waterstofdragers

In deze paragraaf zijn de waterstofdragers ten opzichte van elkaar vergeleken op basis van de volgende twee factoren: Invloedsgebied van de specifieke stof en Veronderstelde bekendheid bestrijding bij brandweer. Ter vergelijking is een tweetal bestaande energiedragers (benzine en aardgas) aan het overzicht toegevoegd, zodat de resultaten vergeleken kunnen worden met de huidige situatie.

75. Per waterstofdrager kunnen er nuances zijn, maar in grote lijnen komt dit overeen met het gemiddelde.

76. Hierbij merken we op dat de werkelijke uitstroomhoeveelheid afhankelijk is van factoren zoals gatgrootte en systeemdruk. De effectafstand van een ketelwagon kan onder bepaalde omstandigheden bijvoorbeeld groter zijn dan van een kleine lekkage van een buisleiding onder de grond).

De volgende relatieve scores zijn bij de beoordeling gehanteerd:

Laagste relatieve risicoscore
Lage relatieve risicoscore
Gemiddelde relatieve risicoscore
Hoogste relatieve risicoscore

Hoe lichter dus de kleur, hoe kleiner het invloedsgebied danwel de veronderstelde bekendheid.

Tabel 6.2 Scores verschillende energiedragers op effectgebied en bekendheid bestrijding hulpverlening

Waterstofdrager	Invloedsgebied van de specifieke stof onafhankelijk van uitstroom	Veronderstelde bekendheid bestrijding bij overheidshulpdienst
Gasvormig waterstof (GH ₂)		
Vloeibaar waterstof (LH ₂)		
Ammoniak: NH ₃ (koud)		
Ammoniak: NH ₃ (warm)		
Methanol		
Liquid synthetic methane (LSM, qua stoffeigenschap gelijk aan LNG)		
LOHC's		
Boorhydrides		
Benzine		
Aardgas		

Beschouwing

Op basis van de tabellen kan het volgende worden afgeleid:

- > Invloedsgebieden van waterstofdragers zoals methanol, LOHC, boorhydrides zijn in orde grootte vergelijkbaar met de huidige energiedrager benzine (brandbare vloeistof).
- > Invloedsgebieden van waterstofdragers zoals LSM en waterstof zijn in orde grootte vergelijkbaar met de huidige energiedragers LNG en aardgas (brandbaar, kans op explosie).
- > Voor de huidige energiedragers wordt op basis van deze eerste beschouwing de bestrijding als bekend verondersteld, waarbij opgemerkt wordt dat na een explosie (zoals bijvoorbeeld bij aardgas in woningen) bestrijding alleen op de gevolgen plaatsvindt (denk aan nablussen). Dit geldt hiermee ook voor de nieuwe energiedragers LSM (=LNG), methanol en waterstof. Nader onderzoek wordt wel aanbevolen om deze aanname te toetsen.
- > Voor boorhydrides en LOHC zijn onvoldoende gegevens bekend voor de bestrijding en mogelijk escalerende gevolgen bij te veel c.q. onjuist watergebruik bij de bestrijding.
- > Alhoewel ammoniak geen nieuwe stof is, is uit de ontvangen opmerkingen gebleken dat er nog veel onzekerheden zijn en veel onbekend is voor een eerste bestrijding. Gezien de mogelijke toename van transporten is een nadere studie vereist.

6.4 Toets Kabinetsvisie waterstofdragers aan bevindingen

Onderdeel van de Onderzoeksvraag was het toetsen van de preferente volgorde zoals genoemd in de Kabinetsvisie. Hierin wordt als preferente volgorde voor de transportmodaliteiten genoemd: 1. Buisleidingen, 2. Binnenvaart, 3. Spoor en 4. Weg. Hierbij wordt gesteld dat er nuanceringen gelden op basis van de aard van de stof, toepassing, hoeveelheden en toegankelijkheid / haalbaarheid per modaliteit. Er wordt erkend dat er een mix van vervoersmodaliteiten zal blijven bestaan, immers zeehavens kunnen hun doorvoerfunctie alleen vervullen als er ook goede achterlandverbindingen zijn.

Op basis van de tabellen 6.1 en 6.2 en de daaropvolgende beschouwingen is de preferente volgorde uit de Kabinetsvisie getoetst.

Op basis van tabel 6.1 sluiten de modaliteitsvoorkeuren uit de Kabinetsvisie aan op basis van de keuze voor een lage kans in combinatie met het zoveel mogelijk vermijden van binnenstedelijk gebied. Transport via Binnenvaart levert hierbij een groter voordeel op vanwege de lagere kansinschatting vergeleken met Buisleiding en het feit dat er zo veel beveiligingen zijn getroffen dat een grote uitstroom zeer onwaarschijnlijk is. Daar staat tegenover dat binnenvaartroutes langs binnenstedelijk gebied kunnen lopen (bijvoorbeeld Rotterdam, Dordrecht). Als derde optie spoor is vanuit de factor kans gezien eveneens een logische derde keuze, waarbij de factor Vermijden binnenstedelijk gebied in de Kabinetsvisie is benoemd door de Betuweroute als voorkeursroute te benoemen.

Tot slot merken we op dat een belangrijk voordeel van binnenvaart ten opzichte van buisleidingen is dat de locatie van een incident direct bekend is. Bij buisleidingen moet de locatie eerst worden gedetecteerd en vervolgens opgespoord, wat leidt tot een langere duur van het effect.

Op basis van deze analyse blijkt dat de kabinetsvisie niet gebaseerd is op het handelingsperspectief van de brandweer. Als nu gekeken wordt naar Tabel 6.2 dan zou namelijk een andere keuze gemaakt kunnen worden. De grote effecten en de slechte bereikbaarheid van een ammoniakincident in combinatie met minder veronderstelde bekendheid van de brandweer, leidt tot een andere voorkeursvolgorde voor modaliteit. Het is echter begrijpelijk dat de factor kans meer bepalend is voor de voorkeursvolgorde dan bereikbaarheid: het voorkomen van een incident is in alle gevallen een betere keuze dan een keuze gericht op het bestrijden van een incident.

De Kabinetsvisie stelt dat de volgorde voor alle waterstofdragers geldt. De vraag is of dit terecht is. De visie lijkt vooral gebaseerd te zijn op het transport van ammoniak. Indien bijvoorbeeld de keuze op basis van Boorhydrides gedaan zou zijn, zou een andere volgorde ontstaan. Boorhydrides hebben namelijk een klein effectgebied, transport via de weg levert een goede bereikbaarheid voor de brandweer, in combinatie met de onbekendheid met deze stof maakt namelijk een slechte bereikbaarheid de bestrijding nog lastiger. De voorkeursvolgorde weg of spoor zou in dit geval verdedigbaar zijn. Een andere modaliteit voor een waterstofdrager is zeker te onderbouwen (en dus afwijkend van volgorde kabinetsvisie) kijkend vanuit onze analyse.

7. Conclusies

De onderzoeksvraag omvat zowel het inventariseren van de meest actuele kennis en stand van zaken met betrekking tot de risico's, effecten en handelingsperspectieven / (on)mogelijkheden voor incidentbestrijding bij incidenten en ongevallen met waterstofdragers tijdens transport, als het ontginnen van nieuwe kennis en inzichten en het identificeren van gebieden waar verdere kennisontwikkeling noodzakelijk is.

Daarnaast is verzocht om op basis van de bevindingen de voorkeursvolgorde uit de Kabinetsvisie Waterstofdragers te toetsen.

De studie is uitgevoerd op basis van literatuuronderzoek, informatie van het onderzoeksconsortium, de klankbordgroep en de begeleidingsgroep, aangevuld met expert judgement van de onderzoekers.

De bevindingen hebben geleid tot de volgende conclusies:

1. De voorkeursvolgorde in de Kabinetsvisie (1. buisleiding, 2. binnenvaart, 3. spoor, 4. weg) sluit aan op de bevindingen uit deze studie, waarbij de voorkeursvolgorde is gekozen op basis van de lage kans op een incident in combinatie met de factor omgeving.
2. De modaliteitsvoorkeuren uit de Kabinetsvisie richten zich vooral op het transport van ammoniak. Voor andere waterstofdragers kan een andere keuze gerechtvaardigd zijn.
3. De keuze voor de transportmodaliteit van gevaarlijke stoffen wordt bepaald door factoren zoals bereikbaarheid van de klant, afstand, kosten en logistieke efficiëntie. Veiligheid is weliswaar belangrijk, maar is niet bepalend voor de keuze van modaliteit.
4. Voor de in dit onderzoek beschouwde waterstofdragers zijn geen nieuwe scenario's of effecten te verwachten, omdat deze - en vergelijkbare - gevaarlijke stoffen al worden vervoerd en de bijbehorende effecten en eigenschappen bekend zijn. De bestaande regelgeving biedt daarmee voldoende kader voor de veiligheidsaspecten van deze waterstofdragers.
5. Alhoewel het effect van de waterstofdrager Boorhydriden bekend is (zie voorgaande conclusie) vindt transport in bulk momenteel niet plaats voor deze stoffen. Er is in deze gevallen sprake van een kennisleemte over het gedrag van deze stoffen in bulk.
6. Er ontbreekt een duidelijke keuze over welk restrisico we als samenleving accepteren. Dit is nodig om keuzes te maken over de bestrijding van incidenten.
7. Er is gedegen kennis beschikbaar over de bestrijding bij specialisten van bedrijven / bedrijfsbrandweren waar al tientallen jaren met waterstofdragers wordt gewerkt.
8. De overheidsbrandweer is minder geoefend en ervaren in het bestrijden van met name grotere incidenten waarbij gevaarlijke stoffen vrijkomen: er is minder parate kennis beschikbaar.
9. Waterschermen worden als zeer effectief beschouwd mits deze nabij de bron op juiste wijze worden ingezet. Het is echter niet realistisch langs alle transportroutes (voorzieningen voor) waterschermen te installeren.
10. De kans op catastrofaal falen is zeer klein, maar in die uitzonderlijke gevallen is effectieve incidentbestrijding niet mogelijk en schieten middelen en menskracht tekort. Dit restrisico moet worden geaccepteerd en verschilt niet wezenlijk van de huidige situatie in Nederland.
11. Schuilen binnenshuis is in geval van met name een toxische wolk in alle gevallen de juiste optie. De mate en tijdsduur van veiligheid hangt echter af van vele factoren: omvang van het incident, welk type stof, windrichting, kwaliteit behuizing / objecten, etc.

8. Aanbevelingen

Op basis van de bevindingen en conclusies van deze studie worden de volgende aanbevelingen geformuleerd. De prioritering van uitvoering van de aanbevelingen ligt bij de overheid, maar de volgorde van onderstaande aanbevelingen kan als leidraad voor prioritering gehanteerd worden:

1. Maak een expliciete maatschappelijke afweging over het te accepteren restrisico voor incidenten met een geringe kans van optreden.
2. Breng in kaart op welke wijze de bij specialisten aanwezige kennis over de bestrijding van incidenten met gevaarlijke stoffen structureel kan worden ontsloten, zodat hier in het geval van een groot incident direct een beroep op kan worden gedaan. Maak daarbij gebruik van en sluit aan bij bestaande structuren zoals het Platform Industriële Incidentbestrijding (PII) die het mogelijk maken deze kennis snel beschikbaar te krijgen tijdens een incident.
3. Zorg ervoor dat de ontsloten specialistische kennis leidend is bij de operationele besluitvorming en inzet tijdens een groot incident met gevaarlijke stoffen.
4. Werk een beperkt aantal representatieve scenario's uit om inzicht te krijgen in de mogelijkheden, beperkingen en bijbehorende kosten van incidentbestrijding. Breng daarbij, uitgaande van het vastgestelde en geaccepteerde restrisico, in beeld welke middelen, parate kennis en opleidings- en trainingsvereisten noodzakelijk zijn.
5. Onderzoek in welke situaties de inzet van waterschermen toegevoegde waarde heeft en waar niet. Met de resultaten van dit onderzoek kunnen inzetcriteria en prioritering van middelen op basis van het vastgestelde restrisico worden geselecteerd.
6. Het verdient aanbeveling om incidentscenario's met ammoniak en de bestrijding daarbij in de praktijk te testen, of aan te sluiten bij testen in het buitenland (bijvoorbeeld ARISE - Advancing Safe and Sustainable Ammonia Transport).
7. Ontwikkel een eenduidig handelingsperspectief voor de bevolking bij incidenten met ammoniak, gericht op communicatie met personen in het effectgebied. Werk daarbij uit welke informatie en instructies als no-regret-advies kunnen worden gegeven en hoe deze informatie snel en consequent kan worden gecommuniceerd tijdens een incident.
8. Doe onderzoek naar de omstandigheden waaronder binnenshuis schuilen veilig en effectief is bij incidenten met ammoniak, zodat hierover bij alarmering een kort, eenduidig en onderbouwd advies kan worden gegeven.
9. Aangezien zowel boorhydriden als LOHC's relatief nieuwe en weinig onderzochte groepen stoffen betreffen, wordt aanbevolen nader verdiepend onderzoek uit te voeren naar deze stoffen. Als een LOHC een mogelijke ZZS-stof is, moet aandacht worden besteed aan mogelijke risico's die aan de ZZS verbonden zijn.
10. Onderzoek hoe de incidentbestrijding bij Seveso-bedrijven is ingericht rondom het proces van laden en lossen van zeeschepen. Aangezien deze processen per bedrijf kunnen verschillen, kan een vergelijkende studie naar overeenkomsten en verschillen waardevolle inzichten opleveren. Deze inzichten kunnen mogelijk worden gebruikt bij het opstellen en aanscherpen van adviezen voor incidentbestrijding bij laden/lossen bij niet-Seveso bedrijven.
11. Onderzoek een communicatiestrategie voor de bevolking. Evenals de huidige bestaande risico's bij energiedragers (aardgas explosies, branden, toxische stoffen) zullen deze ook in de toekomst bestaan, waarbij de schaalgrootte voor met name toxische stoffen en nieuwe stoffen zoals LOHC en boorhydriden mogelijk gaan toenemen. Communiceer aan de bevolking wat te doen bij een incident, maar ook dat het niet mogelijk is alle risico's volledig af te dekken.

12. Het transport van energiedragers strekt zich uit over grotere afstanden dan uitsluitend binnen Nederland. Daarom is internationale afstemming essentieel voor een samenhangende en effectieve benadering. Aanbevolen wordt om afstemming te zoeken met de direct aangrenzende buurlanden (België/Frankrijk en Duitsland) over de inzet en mogelijkheden van verschillende transportmodaliteiten per waterstofdrager.
13. Waterschermen worden als zeer effectief beschouwd mits deze nabij de bron op juiste wijze worden ingezet. Het is echter niet realistisch om langs alle transportroutes gevaarlijke stoffen de mogelijkheid voor een waterscherm te realiseren.
14. Het NIPV heeft diverse studies op het gebied van bestrijding van ammoniakincidenten uitgevoerd⁷⁷. Hieruit blijkt eveneens dat er behoefte is nader te onderzoeken wat nu de mogelijkheden zijn. Ook hiervoor geldt dat eerst een keuze zal moeten worden gemaakt over welk restrisico we als samenleving accepteren, en welke kosten we als samenleving willen besteden aan dergelijke incidenten met een kleine kans van voorkomen.

77. 20251105-nipv-lessen-uit-de-bestrijding-van-ammoniakincidenten.pdf.

Bijlage 1 Bronnenlijst

Bijlage 1 Bronnenlijst

Auteur	Jaartal	Titel	Link
Ammonia Energy Association	2025	First ammonia bunker pilot completed in Rotterdam	https://ammoniaenergy.org/articles/first-ammonia-bunker-pilot-completed-in-rotterdam/
Antea Group	2023	Consequentieonderzoek externe veiligheid – waterstofbuisleidingen	https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijks-overheid/documenten/rapporten/2023/02/10/consequentieonderzoek-externe-veiligheid/Consequentieonderzoek+waterstofbuisleiding.pdf
Antea Group	2025	VOTOB Curriculum voor personeel op ammoniak terminals	
Antea Group	2025	VOTOB-veiligheidsstandaarden in de ammoniakketen	
ARISE	2024	Joint industrial partnership for controlled ammonia release at sea – project presentation for potential sponsors	
BIG	2022	Brandweerinterventieboek Gevaarlijke stoffen	
Brandweer Amsterdam-Amstelland	2019	Werkinstructies risicomatrix – Ter ondersteuning van een risicogerichte advisering	
Brandweer Nederland	2019	Bestrijding incidenten wegtransport H ₂	https://www.brandweernederland.nl/wp-content/uploads/sites/2/2025/01/20190628-BRWNL-Aandachtskaart-H2-Wegtransport.pdf
Brandweer Nederland	2020	Operationeel Naslagwerk – Incidentbestrijding gevaarlijke stoffen (ON-IBGS)	
CAMEO Chemicals	2025	Methane, refrigerated liquid (cryogenic liquid)	https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/3872
Dharmavaram, S., Carroll, M. J., Lutostansky, E. M., McCormack, D., Chester, A., & Allason, D.	2023	Red squirrel tests: Air products' ammonia field experiments	https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/prs.12454
DNV	2021	External safety study - bunkering of alternative marine fuel for seagoing vessels	https://www.portofamsterdam.com/sites/default/files/2021-11/DNV%20POA%20Final%20Report_External%20safety%20study%20-%20bunkering%20of%20alternative%20marine%20fuels%20for%20seagoing%20vessels_Rev0_2021-04-19.pdf
ECHA CHEM	2025	ECHA Chemicals database	https://chem.echa.europa.eu/
Falck Risc & Gezamenlijke Brandweer Rotterdam	2015	LNG Masterplan voor Rijn-Maas-Donau	https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2021-06/nood-en_incidentbestrijding-rapport.pdf
French Ministry of Sustainable Development	2011	High-risk derailment in a city centre - 16th March, 1992 - Aix-les-Bains (Savoy) France	https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/FD_3468Aixlesbains_1992_eng.pdf
Gasunie	2021	Incidenten aardgas- en waterstof-transportleidingen ('Gele kaart')	
Gexcon	2025	Fire and explosion hazards: What to expect if there is a leak	https://www.gexcon.com/resources/blog/fire-and-explosion-hazards-what-to-expect-if-there-is-a-leak/
Hydrogen Safety Panel	2020	Hydrogen Incident Examples	https://h2tools.org/sites/default/files/Hydrogen_Incident_Examples.pdf
IAPH	2024	Port Readiness Level – Frequently Asked Questions	https://www.fuelreadyports.org/faqs
National Transportation Safety Board	2004	Derailment of Canadian Pacific Railway Freight Train 292-16 and Subsequent Release of Anhydrous Ammonia Near Minot, North Dakota - January 18, 2002	https://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Reports/RAR0401.pdf

Auteur	Jaartal	Titel	Link
Ng, C. K. L., Liu, M., Lam, J. S. L., & Yang, M.	2023	Accidental release of ammonia during ammonia bunkering: Dispersion behaviour under the influence of operational and weather conditions in Singapore	https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131281
NIPV	2018	Handreiking voorbereiding bestrijding buisleidingincidenten	https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/06/20180704-IFV-Handreiking-voorbereiding-bestrijding-buisleidingincidenten.pdf
NIPV	2023	Hogedruk waterstofleiding onder wateroppervlak	https://scenarioboeken.nipv.nl/hogedruk-waterstofleiding-onder-wateroppervlak/
NIPV	2023	Tankwagen methanol – Plasbrand	https://scenarioboeken.nipv.nl/tankwagen-methanol-plasbrand/
NIPV	2024	Breuk laadarm tijdens verladen van vloeibaar ammoniak naar schip	https://scenarioboeken.nipv.nl/breuk-laadarm-tijdens-verladen-van-vloeibaar-ammoniak-naar-schip/
NIPV	2024	De zeven veiligheidsprincipes van grootschalig transport van ammoniak en andere waterstofdragers	https://nipv.nl/wp-content/uploads/2024/03/20240321-NIPV-veiligheidsprincipes-waterstofenergiedragers.pdf
NIPV	2024	Mierenzuuraggregaat – Toxische wolk	https://scenarioboeken.nipv.nl/mierenzuur-aggregaat-toxische-wolk-2/
NIPV	2024	Waterstofexplosie in container	https://scenarioboeken.nipv.nl/waterstofexplosie-in-container/
NIPV	2025	Scheepsincidentbestrijding (SIB)	https://nipv.nl/ondersteuning/landelijk-specialisme-scheepsincidentbestrijding/
NIPV	2023	Waterschermen en waterstralen	20231222-NIPV-Waterschermen-en-waterstralen.pdf
NIPV	2025	Toolbox Waterstof – Algemene informatie	https://nipv.nl/onderzoek/waterstof/toolbox-waterstof-algemene-informatie/
NVBR	2005	Operationeel Handboek Ongevalsebestrijding Gevaarlijke Stoffen	
OCHA	2017	Flash Environmental Assessment Tool (FEAT 2.0) – Reference Guide Working Document	https://www.unocha.org/publications/report/world/flash-environmental-assessment-tool-feat-20-reference-guide-working-document
Port of Rotterdam	2024	Executive summary of Ammonia Transport Study	
Port of Rotterdam	2025	Praktijktuets scheepsbrandstof ammoniak	https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2025-04/Informatieblad%20Havenbedrijf%20Rotterdam%20-%20Praktijktuets%20overslag%20scheepsbrandstof%20ammoniak.pdf
Raj, P. K., Hagopian, J., & Kalelkar, A. S.	1974	Prediction of hazards of spills of anhydrous ammonia on water	https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0779400.pdf
RIVM	2019	Vijftien jaar incidentanalyse – Oorzaken, gevolgen en andere kenmerken van incidenten met gevaarlijke stoffen bij majeure risicobedrijven in de periode 2004-2018	https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2019-0042.pdf
RIVM	2022	Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid – Module III – Vervoer van gevaarlijke stoffen	https://www.rivm.nl/sites/default/files/2022-11/Module%20III%20-%20maart%202022.pdf
RIVM	2024	Effecten van waterstofexplosies	https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2024-0032.pdf
RIVM	2025	Risico's van stoffen	https://rvs.rivm.nl/
Sector for investigation of accidents in railway traffic	2023	Final report on serious accident investigation	https://www.datocms-assets.com/37731/1713353448-2022-12-25_pilot_derailment-45010_final-report.pdf
SINTEF	2024	SafeAm – Increased safety of ammonia handling for maritime operations	https://www.sintef.no/en/projects/2023/safeam_increased_safety_of_ammonia_handling_for_maritime_operations/

Auteur	Jaartal	Titel	Link
Skjold, T., Hisken, H., Bernard, L., Mauri, L., Atanga, G., Lakshmi pathy, S., ... & Huser, A.	2019	Blind-prediction: estimating the consequences of vented hydrogen deflagrations for inhomogeneous mixtures in 20-foot ISO containers	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423019302517?via%3Dihub
SmartPort	2023	Impact van de energietransitie op stikstof, geluid en omgevingsveiligheid	
Teng, L., Wang, K., Liu, B., Li, W., Yin, P., Li, Z., ... & Jiang, L.	2025	The consequence distance of liquid ammonia release from a pipeline in complex terrain	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582025001880
The Engineering ToolBox	2005	Ammonia – NH ₃ – Thermodynamic Properties	https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d_971.html
Toxic	2021	Chemiekaarten	https://toxic.nl/
Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland	2021	Omgevingsveiligheid bepalen – De veiligheid van de fysieke leefomgeving (omgevingsveiligheid) bepalen met de methodiek van het regionale risicoprofiel	
Yang, M., & Lam, J. S. L.	2024	Risk assessment of ammonia bunkering operations: Perspectives on different release scales	https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133757

**Bijlage 2 Deelnemers workshops,
begeleidingsgroep, klankbordgroep**

Bijlage 2 Deelnemers workshops, begeleidingsgroep, klankbordgroep

Consortium / workshops

Nr	Organisatie	Naam
1	Antea Group	
2	Antea Group	
3	Antea Group	
4	NIPV	
5	H2K	
6	H2K	
7	GB	
8	GB	
Alleen workshop over ammoniak:		
9	Ebert Hera (Sitech)	
10	OCI Nitrogen	
11	Yara Sluiskil	

Begeleidingsgroep

Nr	Organisatie	Naam
1	TNO (PL namens Ministerie I&W)	
2	Ministerie I&W	
3	Ministerie I&W	
4	Ministerie I&W	
5	Ministerie J&V	
6	Ministerie J&V	
7	Ministerie KGG	
8		

Klankbordgroep

Nr	Organisatie	Naam
1	RIVM	
2	Air Products	
3	Veiligheidsregio Rotterdam-Rijnmond	
4	Veiligheidsregio Zaanstreek-Waterland	
5	Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland	
6	Veiligheidsregio Zaanstreek-Waterland	
7	CTGG	
8	H2-fuel group	
9	Essent Hydrogen	
10	Hydroflexx	
11	Koninklijke Binnenvaart Nederland	
12	Koninklijke Binnenvaart Nederland	
13	ProRail	
14	Voyex	
15		

**Bijlage 3 Presentatie Workshop 1 & 2 -
werkwijze uitwerking in de workshops**

Bijlage 3 Presentatie Workshop 1 & 2 - werkwijze uitwerking in de workshops

De PowerPointpresentatie in deze is als leidraad gevolgd tijdens de workshops met het consortium en de aanwezige specialistische bedrijven. In de presentatie is de kern van het onderzoek opgenomen en op welke wijze de scenario aanpak is gedaan. Met rode tekst is in de PowerPointpresentatie aangegeven wat tijdens de workshops is besproken en wat de samenvatting is van de discussies en het delen van de kennis. De uitkomsten van de workshops zijn gebruikt voor het opstellen van het rapport.

Binnen de scenario's is er een keuze gemaakt welke scenario's in detail zijn bekeken in de workshops van het consortium, waarbij de keuze een representatieve afspiegeling is van de mogelijke scenario's. Hierbij is een aanpak gehanteerd in lijn met de selectie van 'Installatiescenario's' door Seveso-bedrijven in het kader van een Veiligheidsrapportage. Ook bij de selectie van installatiescenario's gaat het niet om het uitwerken van alle mogelijke scenario's, maar om een representatief beeld te geven van alle mogelijke oorzaken en van type maatregelen die een bedrijf heeft getroffen.

Op eenzelfde wijze hebben we nu voor de verschillende stoffen en de variabelen die zijn te onderscheiden voor wat betreft locatie, effect, ondergrond en omgeving. Zie de onderstaande tabel, waarin met ingekleurde blokjes de gekozen mogelijkheden per variabele is aangegeven.

Dit leidt tot een twaalfstal te onderscheiden scenario's, zie de nummers 1 t/m 12 in onderstaande tabel. Hiervan gaan vijf over een brand, drie over een explosie en vier over een toxische wolk. De brand scenario's kunnen gaan over een fakkel-, plas- of wolkbrand.

Tabel 2.3 Representatieve scenario's per waterstofdrager met bijbehorende locatie, effect, ondergrond en omgeving. In kleur is aangegeven om welke vervoersmodaliteit het gaat: verlading (zwart), spoor (rood), weg (groen), water (blauw) en buis (geel)

		Locatie		Effect			Ondergrond		Omgeving		
		Verlading	Transport	Brand	Explosie	Toxische wolk	Grond	Water	Open	Industrieel	Bewoond
1	gH ₂										
2				Fakkel							
3	LH ₂										
4				Fakkel							
5	NH ₃ (koud)										
6											
7	NH ₃ (warm)										
8											
9	Methanol			Plas							
10	LSM			Wolk							
11	LOHC's			Plas							
12	Boorhydrides										

Niet alle twaalf de scenario's zijn in detail besproken in de workshops. Er is gekozen om zes scenario's in detail uit te werken en te bespreken met de specialisten tijdens de workshops. Dit betreft:

- Scenario 1 – een explosie van GH₂ tijdens verlading in bewoond gebied;
- Scenario 2 – een fakkelbrand GH₂ vanuit een buisleiding in open gebied;
- Scenario 5 – Lekkage van koud ammoniak uit een binnenvaartschip nabij bewoond gebied;
- Scenario 6 – Lekkage van koud ammoniak tijdens lossen van een zeeschip in havengebied;
- Scenario 7 - Lekkage van warm ammoniak bij spoorvervoer nabij bewoond gebied;
- Scenario 9 – een plasbrand methanol bij spoorvervoer nabij bewoond gebied.

In de sheets in de navolgend presentatie zijn deze scenario's opgenomen. Dit heeft als basis gediend voor het doornemen van de scenario's in het consortium.

Door gebruik te maken van een aantal 'wat als' vragen tijdens het bespreken van de scenario's was het mogelijk om een zo volledig mogelijk beeld te krijgen van alle gevraagde stoffen en vervoersmodaliteiten. Bijvoorbeeld, 'wat als' het gaat om een andere stof, 'wat als' de uitstroom zou zijn in water in plaats van op het land of 'wat als' een incident zou plaatsvinden in open gebied in plaats van in bewoond gebied. Vraag daarbij was of dit zou leiden tot wijzigingen in de uitwerking van het scenario zoals al gedaan voor wat betreft mogelijke effecten en de inzet van de brandweer. De zaken die anders zouden zijn, zijn benoemd.

Door deze aanpak kan met het in detail doornemen van de zes genoemde scenario's en de aanvullende vragen een zo volledig mogelijk beeld worden gegeven van de verschillende modaliteiten, stoffen en incidentscenario's. Dit heeft als basis gediend voor de uitwerking zoals opgenomen in hoofdstuk 3 van de rapportage.

De detailuitwerkingen van de scenario's zijn opgenomen in de navolgende PowerPointpresentatie.

**Bijlage 4 Tabel eigenschappen en gevaren van
waterstofdragers**

Bijlage 4 Tabel eigenschappen en gevaren van waterstofdragers

Over Antea Group

Antea Group is het thuis van 1800 trotse ingenieurs en adviseurs. Samen bouwen wij elke dag aan een veilige, gezonde en toekomstbestendige leefomgeving. Je vindt bij ons de allerbeste vakspecialisten van Nederland, maar ook innovatieve oplossingen op het gebied van data, sensing en IT. Hiermee dragen wij bij aan de ontwikkeling van infra, woonwijken of waterwerken. Maar ook aan vraagstukken rondom klimaatadaptatie, energietransitie en de vervangingsopgave. Van onderzoek tot ontwerp, van realisatie tot beheer: voor elke opgave brengen wij de juiste kennis aan tafel. Wij denken kritisch mee en altijd vanuit de mindset om samen voor het beste resultaat te gaan. Op deze manier anticiperen wij op de vragen van vandaag en de oplossingen voor morgen. Al 70 jaar.

Contactgegevens

Rivium Westlaan 72
2909 LD Capelle aan den IJssel
Postbus 8590
3009 AN Rotterdam

Copyright ©

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, elektronisch of op welke wijze dan ook, zonder schriftelijke toestemming van de auteurs.

De informatie die in dit rapport is opgenomen is uitsluitend bestemd voor geadresseerde(n) en kan persoonlijke of vertrouwelijke informatie bevatten. Gebruik van deze informatie, door anderen dan de geadresseerde(n) en gebruik door hen die niet gerechtigd zijn van deze informatie kennis te nemen, is niet toegestaan. De informatie is uitsluitend bestemd om te worden gebruikt door de geadresseerde, voor het doel waarvoor dit rapport is vervaardigd. Indien u niet de geadresseerde bent of niet gerechtigd bent tot kennisneming, is openbaarmaking, vermenigvuldiging, verspreiding en/of verstrekking van deze informatie aan derden niet toegestaan, tenzij na schriftelijke toestemming door Antea Group en wordt u verzocht de gegevens te verwijderen en direct een melding te maken bij security@anteagroup.nl. Derden, zij die niet geadresseerd zijn, kunnen geen rechten aan dit rapport ontleen, tenzij na schriftelijke toestemming door Antea Group.

www.anteagroup.nl