

# Voorbereiding van veiligheidsregio's op toekomstige incidenten met waterstofdragers (P102)



TNO 2025 R12458 – Februari 2026

## Voorbereiding van veiligheidsregio's op toekomstige incidenten met waterstofdragers (P102)

|                      |                                                                                              |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Auteurs              | J.W. (Johan) van Middelaar, S. (Silke) Mergler,<br>M. (Marcel) Weeda, W. (Willemijn) Lolcama |
| Rubricering rapport  | ONGERUBRICEERD Releasable to TNO and MinJenV                                                 |
| Vastgesteld door     | D.R. Willems                                                                                 |
| Vastgesteld d.d.     | 16 februari 2026 (deze rubricering wijzigt niet)                                             |
| Titel                | ONGERUBRICEERD Releasable to TNO and MinJenV                                                 |
| Managementuittreksel | ONGERUBRICEERD Releasable to TNO and MinJenV                                                 |
| Samenvatting         | ONGERUBRICEERD Releasable to TNO and MinJenV                                                 |
| Rapporttekst         | ONGERUBRICEERD Releasable to TNO and MinJenV                                                 |
| Bijlagen             | ONGERUBRICEERD Releasable to TNO and MinJenV                                                 |
| Oplage               | -                                                                                            |
| Aantal pagina's      | 80 (excl. voor- en achterblad en distributielijst)                                           |
| Aantal bijlagen      | 2                                                                                            |
| Programmanaam        | Innovatieverkenning Crisisbeheersing 25                                                      |
| Programmanummer      | P102                                                                                         |
| Projectnaam          | Preparatie van veiligheidsregio's op toekomstige incidenten<br>met waterstofdragers          |
| Projectnummer        | 060.63226/01.03                                                                              |

**Alle rechten voorbehouden**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

## Managementuittreksel

# Voorbereiding van veiligheidsregio's op toekomstige incidenten met waterstofdragers

### Programma

Programmanaam:  
Innovatieverkenning Crisisbeheersing 25

Programmanummer: P102

Programmaplanning: Startdatum 1 januari 2025  
Einddatum 31 december 2025

Programmabegeleider:  
D.R. Willems  
Ministerie van Justitie en Veiligheid, DG Politie en  
Veiligheidsregio's

Programmaleider:  
M.P.W. van Berlo  
TNO Defence, Safety & Security

### Project

Projectnaam:  
Preparatie van veiligheidsregio's op toekomstige  
incidenten met waterstofdragers

Projectnummer: 060.63226/01.03

Projectplanning: Startdatum 1 januari 2025  
Einddatum 31 december 2025

Projectbegeleider:  
R. de Ruiter  
Ministerie van Justitie en Veiligheid, DG Politie en  
Veiligheidsregio's

Projectleider:  
W. Lolcama  
TNO Defence, Safety & Security

**De energietransitie vraagt om een toekomstbestendige aanpak van veiligheid in Nederland. Het Ministerie van Justitie en Veiligheid wil dat veiligheidsregio's goed voorbereid zijn op de mogelijke gevolgen van het toenemende gebruik van waterstof en waterstofdragers. Daarom is onderzocht welke risico's en scenario's in de toekomst voorstelbaar zijn, en welke kennis, middelen en samenwerking nodig zijn om incidenten effectief te kunnen beheersen.**

## Probleemstelling

De energietransitie kan leiden tot een toename van het gebruik van waterstof en diverse waterstofdragers, zoals vloeibare waterstof (LH<sub>2</sub>), ammoniak, vloeibare organische waterstofdragers (LOHC's), methanol, vloeibaar synthetisch methaan (LSM) en natriumboorhydride (NaBH<sub>4</sub>). Dit brengt nieuwe en deels onbekende risico's met zich mee voor de Nederlandse veiligheidsregio's, die verantwoordelijk zijn voor de incidentbestrijding. Er is behoefte aan inzicht in welke scenario's voorstelbaar zijn, welke risico's deze met zich meebrengen, en hoe veiligheidsregio's zich hierop kunnen voorbereiden.

## Beschrijving van de werkzaamheden

Het onderzoek is opgebouwd uit drie samenhangende stappen:

- › **Marktverkenning:** Analyse van de huidige en verwachte ontwikkelingen in de toepassing van waterstof en waterstofdragers in Nederland, inclusief import, productie, transport en gebruik. Hierbij is gekeken naar technologische trends, beleidskaders en de verwachte groei van verschillende dragers.
- › **Tijdspad en ontwikkeling risico's waterstofdragers:** Systematische inventarisatie van bestaande en opkomende risico's, gebaseerd op literatuur, marktontwikkelingen en technologische vooruitgang. Hierbij is onderscheid gemaakt naar korte, middellange en lange termijn, en naar verschillende typen incidenten, locaties en ketens.
- › **Scenariodenken:** Op basis van relevante parameters zijn met behulp van een morfologische box plausibele incidentenscenario's opgesteld. Deze scenario's zijn

gevalideerd met experts uit de veiligheidsregio's en in een interactieve workshop verder uitgediept. Tijdens deze sessie zijn per scenario de belangrijkste lacunes, behoeften en handelingsperspectieven voor de veiligheidsregio's geïnventariseerd. Ook is gekeken naar bestaande en innovatieve oplossingen om deze lacunes te dichten.

### Resultaten en conclusies

De marktverkenning laat zien dat het gebruik van waterstofdragers de komende decennia sterk kan toenemen, met name ammoniak en vloeibare waterstof, maar ook LOHC's, methanol, LSM en natriumboorhydride. De risico-ontwikkeling toont aan dat veel risico's bekend zijn uit de praktijk met stoffen als ammoniak, methanol en LNG, maar dat nieuwe dragers en grotere volumes zorgen voor extra onzekerheden en complexiteit. Het toepassen van scenariodenken maakt duidelijk dat incidenten met grote impact, zoals toxische wolken of explosies in woongebieden, in de toekomst voorstelbaar zijn en dat de reguliere brandweer hierop nog onvoldoende is voorbereid.

Om zich beter voor te bereiden op toekomstige incidenten met waterstofdragers moeten veiligheidsregio's hun inrichting van de veiligheidsketen zowel preventief als operationeel versterken. Dit vraagt om een integrale aanpak waarin technologische vernieuwing, specialistische kennisopbouw en structurele samenwerking met bedrijven centraal staan. Aan de preventieve kant is het noodzakelijk om actief om te gaan met de nog aanzienlijke onzekerheden rondom het gebruik, de transportroutes en de volumenstromen van waterstofdragers. Door actuele ontwikkelingen expliciet te volgen, structureel aan te sluiten bij kennisnetwerken en scenario's voor mogelijke incidenten door te spelen, kunnen veiligheidsregio's lacunes in hun voorbereiding identificeren en tijdig behoeften aan aanvullende kennis, hulpmiddelen, opleidingen of andere instrumenten signaleren. De in dit onderzoek toegepaste scenariomethodiek en vastgestelde parameters bieden hiervoor een praktisch kader, waarmee veiligheidsregio's hun voorbereiding adaptief en toekomstgericht kunnen blijven ontwikkelen.

Aan de operationele kant ligt de nadruk op het versterken van de respons bij complexe en grootschalige incidenten. Investerings in geavanceerde detectie- en responsmiddelen voor cryogene en toxische stoffen, in combinatie met een versterking van de IBGS (Incidentbestrijding Gevaarlijke Stoffen) capaciteit via gespecialiseerde opleidingen en interregionale scenario en GRIP oefeningen, dragen bij aan een effectievere inzet. Daarnaast is het creëren van een snel en betrouwbaar gezamenlijk situatiebeeld essentieel, onder meer door afspraken te maken over real time data deling tussen exploitanten en de meldkamer.

### Toepasbaarheid

De resultaten van dit onderzoek bieden veiligheidsregio's en beleidsmakers concrete handvatten om zich beter voor te bereiden op toekomstige incidenten met waterstofdragers. Door scenariodenken en gezamenlijke analyse met experts ontstaat gericht inzicht in lacunes en handelingsperspectieven. Dit stelt veiligheidsregio's in staat om tijdig te kunnen anticiperen op nieuwe risico's als gevolg van de energietransitie.

# Summary

The energy transition calls for a future-proof approach to safety in the Netherlands.

The Ministry of Justice and Security aims to ensure that safety regions are well prepared for the potential consequences of the increasing use of hydrogen and hydrogen carriers. For this reason, an investigation was conducted into which risks and scenarios may arise in the future, and which knowledge, resources, and forms of cooperation are required to effectively manage incidents.

## Problem statement

The energy transition may lead to an increase in the use of hydrogen and various hydrogen carriers, such as liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>), ammonia, liquid organic hydrogen carriers (LOHCs), methanol, liquid synthetic methane (LSM), and sodium borohydride (NaBH<sub>4</sub>). This introduces new and partly unfamiliar risks for the Dutch safety regions, which are responsible for incident response. There is a need for insight into which scenarios are conceivable, what risks they entail, and how safety regions can prepare for them.

## Description of activities

The study is structured around three interrelated steps:

- › **Market exploration:** An analysis of current and expected developments in the application of hydrogen and hydrogen carriers in the Netherlands, including import, production, transport, and use. This included an assessment of technological trends, policy frameworks, and the expected growth of different carriers.
- › **Timeline and development of risks of hydrogen carriers:** A systematic identification of existing and emerging risks, based on literature, market developments, and technological progress. A distinction was made between the short, medium, and long term, as well as between different types of incidents, locations, and supply chains.
- › **Scenario thinking:** Based on relevant parameters, plausible incident scenarios were developed using a morphological box. These scenarios were validated with experts from the safety regions and further explored during an interactive workshop. In this session, the key gaps, needs, and courses of action for the safety regions were identified for each scenario. Existing and innovative solutions to address these gaps were also examined.

## Results and conclusions

The market exploration shows that the use of hydrogen carriers may increase significantly in the coming decades, particularly ammonia and liquid hydrogen, but also LOHCs, methanol, LSM, and sodium borohydride. The risk analysis indicates that many risks are already known from practical experience with substances such as ammonia, methanol, and LNG, but that new carriers and larger volumes introduce additional uncertainties and complexity. The application of scenario thinking demonstrates that high-impact incidents, such as toxic clouds or explosions in residential areas, are conceivable in the future and that regular fire services are not yet sufficiently prepared to deal with them.

To better prepare for future incidents involving hydrogen carriers, safety regions need to strengthen both the preventive and operational design of the safety chain. This requires an integrated approach in which technological innovation, the development of specialist expertise, and structural cooperation with industry play a central role.

On the preventive side, it is necessary to actively address the still considerable uncertainties surrounding the use, transport routes, and volume flows of hydrogen carriers. By explicitly monitoring current developments, structurally engaging with knowledge networks, and exploring potential incident scenarios, safety regions can identify gaps in their preparedness and timely signal the need for additional knowledge, resources, training, or other instruments. The scenario methodology applied in this study, together with the identified parameters, provides a practical framework for allowing safety regions to continue developing their preparedness in an adaptive and future-oriented manner.

On the operational side, the focus is on strengthening the response to complex and large-scale incidents. Investments in advanced detection and response equipment for cryogenic and toxic substances, combined with strengthening capacities for responding to incidents with hazardous materials through specialised training and interregional scenario- and GRIP exercises, contribute to more effective deployment. In addition, creating a rapid and reliable shared situational awareness is essential, for example by establishing agreements on real-time data sharing between operators and emergency dispatch centres.

### **Applicability**

The results of this study provide safety regions and policymakers with concrete tools to better prepare for future incidents involving hydrogen carriers. Through scenario thinking and joint analysis with experts, targeted insight is gained into gaps and possible courses of action. This enables safety regions to anticipate in a timely manner new risks arising from the energy transition.

# Inhoudsopgave

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| Managementuittreksel.....                                         | 3         |
| Summary.....                                                      | 5         |
| <b>1 Inleiding.....</b>                                           | <b>8</b>  |
| 1.1 Aanleiding.....                                               | 8         |
| 1.2 Probleemstelling en onderzoeksdoel.....                       | 9         |
| 1.3 Scope van dit onderzoek.....                                  | 10        |
| 1.4 Leeswijzer.....                                               | 11        |
| <b>2 Onderzoeksaanpak.....</b>                                    | <b>12</b> |
| <b>3 Marktverkenning.....</b>                                     | <b>14</b> |
| 3.1 De rol van waterstof in de energietransitie.....              | 14        |
| 3.2 Toepassingen van groene waterstof.....                        | 14        |
| 3.3 Hernieuwbare energie via waterstofdragers.....                | 18        |
| 3.4 Import van waterstof op langere termijn.....                  | 22        |
| 3.5 Export of doorvoer naar Duitsland.....                        | 23        |
| 3.6 Import van waterstof op korte termijn.....                    | 25        |
| <b>4 Tijdspad en ontwikkeling risico's waterstofdragers.....</b>  | <b>29</b> |
| 4.1 De markt als bepalende factor voor risico's.....              | 29        |
| 4.2 Technologische ontwikkelingen en hun invloed op risico's..... | 30        |
| 4.3 Risico's van waterstofdragers.....                            | 32        |
| 4.4 Tijdspad voor risico-ontwikkeling.....                        | 34        |
| <b>5 Toekomstverkenning.....</b>                                  | <b>39</b> |
| 5.1 Scenariodenken als methodiek voor toekomstverkenning.....     | 39        |
| 5.2 Toepassing scenariodenken.....                                | 44        |
| <b>6 Bestaande en innovatieve oplossingen.....</b>                | <b>57</b> |
| 6.1 Uitgangspunten.....                                           | 57        |
| 6.2 Bestaande oplossingen.....                                    | 59        |
| 6.3 Innovatieve oplossingen.....                                  | 61        |
| <b>7 Conclusies en aanbevelingen.....</b>                         | <b>66</b> |
| 7.1 Aanbevelingen.....                                            | 68        |
| <b>Referenties.....</b>                                           | <b>71</b> |
| <b>Bijlagen</b>                                                   |           |
| Bijlage A: Longlist van scenario's                                | 75        |
| Bijlage B: Werkbladen workshop                                    | 80        |

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Het behalen van de klimaatdoelen vereist een ingrijpende energietransitie. Waterstof speelt hierin een sleutelrol als duurzame grond- en brandstof voor sectoren zoals industrie, mobiliteit en elektriciteitsproductie. Om waterstof effectief toe te passen, zijn ook waterstofdragers van groot belang. Zij maken het mogelijk om waterstof op een efficiënte en grootschalige manier te transporteren en/of op te slaan, wat essentieel is voor internationale handel en infrastructuur.

De verwachting is dan ook dat het gebruik van waterstof en waterstofdragers in import, productie, transport en toepassing de komende jaren sterk zal toenemen. In de Kabinetsvisie waterstofdragers [1] geeft het Nederlandse kabinet zoveel mogelijk duidelijkheid over haar voorkeuren voor bepaalde combinaties van waterstofdragers, eindgebruik en vervoersmodaliteiten. Tegelijkertijd bestaan er nog veel onzekerheden over technologische ontwikkelingen, toekomstige volumestromen en geschikte transportmodaliteiten, waardoor “de voor- en nadelen van verschillende waterstofdragers continu in beweging zijn.” [1] Dit leidt tot onzekerheden en vragen bij de veiligheidsregio's op het gebied van veiligheid en incidentbestrijding. Incidenten moeten in principe vanuit de reguliere brandweezorg bestreden kunnen worden. In Nederland bestaat de brandweer echter voor meer dan 80% uit vrijwilligers [2], die geen specialistische opleiding hebben wat de bestrijding van grootschalige, complexe incidenten met gevaarlijke stoffen betreft. In hun ‘Reactie op de kabinetsvisie waterstofdragers’ [3] geeft het Veiligheidsberaad, het bestuurlijke koepel van de veiligheidsregio's, aan dat zij zich vooral zorgen maken over de risico's met ammoniakvervoer, en dan met name vervoer over de weg:

*“Een ongeval met ammoniak kan leiden tot een gifwolk met doden en gewonden tot gevolg. Bij transportincidenten zijn er vanuit de basisbrandweezorg (inclusief het specialisme IBGS<sup>1</sup>) bij (grote) lekkages onvoldoende mogelijkheden tot effectieve bronbestrijding, waardoor grote gezondheidsschade kan ontstaan, met overbelasting van de geneeskundige hulpverleningsketen als gevolg” [3].*

Hoewel ammoniak momenteel wordt beschouwd als de meest geschikte waterstofdrager voor het snel ontwikkelen van een wereldwijde markt, brengen ook andere waterstofdragers (potentieel nieuwe) risico's met zich mee. De kabinetsvisie behandelt zeven waterstofdragers: vloeibare waterstof (liquid hydrogen, LH<sub>2</sub>), ammoniak, vloeibare organische waterstofdragers (liquid organic hydrogen carriers, LOHC's), methanol en gekoeld vloeibaar synthetisch methaan (liquid synthetic methane, LSM). Ook natriumboorhydride (NaBH<sub>4</sub>) is meegenomen, terwijl de technologie voor deze waterstofdrager nog het meest in ontwikkeling is. Het is van belang om met de huidige kennis van de (technische) ontwikkelingen in te zoomen op mogelijke scenario's die zich in de toekomst kunnen voordoen bij incidenten met deze waterstofdragers.

Het Ministerie van Justitie en Veiligheid heeft daarom aan TNO gevraagd een verkenning uit te voeren rondom toekomstige risico's met waterstofdragers zodat de veiligheidsregio's zich

<sup>1</sup> Incidentbestrijding Gevaarlijke Stoffen.

aan de hand van de daaruit resulterende inzichten beter kunnen voorbereiden op een toekomst waarin waterstof een centrale rol speelt. Uitgangspunt was om de expertise van TNO in dit onderzoek aan te vullen met specifieke kennis van experts uit de veiligheidsregio's om tot een gezamenlijk resultaat te komen.

Daarnaast is het belangrijk te vermelden dat parallel aan dit onderzoek - onder leiding van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat - een ander onderzoek loopt naar de potentiële gevolgen van incidenten met waterstofdragers en de (on)mogelijkheden voor incidentbestrijding, met als doel de risico's voor omwonenden en hulpverleners te beheersen. Dat onderzoek richt zich op de huidige stand van zaken wat betreft handelingsperspectieven voor de veiligheidsregio's en beoogt een feitendossier op te stellen, inclusief het in kaart brengen van kennislacunes. Het onderhavige J&V-onderzoek is complementair aan het I&W-onderzoek, doordat het inzicht biedt in het tijdspad waarop risico's zich in de toekomst kunnen ontwikkelen en de noodzaak voor doorontwikkeling van wetgeving, beleid, mensen, kennis, middelen en technologie.

## 1.2 Probleemstelling en onderzoeksdoel

Er zijn bij vele partijen in het land allerlei plannen en ambities ten aanzien van het gebruik van waterstofdragers. Tegelijkertijd veranderen de ontwikkelingen en ideeën over vraag en behoefte naar waterstof. Opties worden duurder en ideeën waren te ambitieus en optimistisch, waardoor projecten minder snel gerealiseerd worden. Binnenkort wordt een update verwacht van de studie naar volumestromen van waterstofrijke energiedragers van Berenschot, Arcadis en TNO uit 2023 [4] om recht te doen aan deze veranderingen.

De vraag is op welke wijze deze informatie ter beschikking komt voor de veiligheidsregio's en hoe zij vervolgens inzicht verkrijgen in de ontwikkeling van (toekomstige) risico's gerelateerd aan de (voorgenomen) uitrol van nieuwe energiedragers.

Deze verkenning richt zich daarom op het inzicht krijgen in welke incidentscenario's met waterstofdragers in de toekomst voorstelbaar zijn, ondanks de huidige onzekerheden. De scenario's moeten eveneens vernieuwend zijn om aspecten van incidenten naar voren te brengen waarmee de veiligheidsregio's nu nog niet geconfronteerd worden. Aan de hand daarvan kan samen met de veiligheidsregio's een inschatting gemaakt worden welke risico's deze scenario's met zich meebrengen, welke risico's de grootste uitdagingen vormen, en hoe daar het beste op voor te bereiden. Daarnaast wordt gekeken welke innovatieve oplossingen kunnen helpen om de veiligheidsregio's (nog) beter voor te bereiden op mogelijke incidenten met waterstofdragers.

De centrale vraag van dit onderzoek is als volgt:

*“Hoe kunnen veiligheidsregio's zich beter voorbereiden op mogelijke toekomstige crises met waterstofdragers?”*

Onder deze centrale vraag zal het onderzoek zich specifiek richten op de volgende deelvragen:

1. Wat is het mogelijke tijdspad van risico's gebonden aan de realisatie van de energietransitie m.b.t. waterstofdragers?
2. Op welke wijze kan inzicht worden verkregen in de ontwikkeling van (toekomstige) risico's gerelateerd aan de (voorgenomen) uitrol van waterstofdragers?
3. Welke bestaande en innovatieve oplossingen kunnen bijdragen aan het voorbereiden van de veiligheidsregio's op incidenten met waterstofdragers?

## 1.3 Scope van dit onderzoek

In dit onderzoek zijn de zeven waterstofdragers behandeld die ook in de kabinetsvisie aan bod komen: vloeibare waterstof (liquid hydrogen, LH<sub>2</sub>), ammoniak, vloeibare organische waterstofdragers (liquid organic hydrogen carriers, LOHC's), methanol en vloeibaar synthetisch methaan (liquid synthetic methane, LSM), natriumboorhydride (NaBH<sub>4</sub>).

In dit onderzoek is ammoniak onderverdeeld in de volgende vormen:

- › Koude ammoniak: vloeibaar gemaakt door (actieve) koeling tot -33 °C (of lager).
- › Warme ammoniak: vloeibaar gemaakt door hoge druk. De druk loopt op naarmate de temperatuur hoger is. Ter indicatie: de druk is ca. 4 bar bij 0 °C en ca. 8 bar bij 20 °C.

Bij deze lijst van waterstofdragers kan onderscheid gemaakt worden in dragers waarbij voor eindgebruik conversie naar waterstofgas nodig is, of dragers die rechtstreeks als energiedrager ingezet kunnen worden. Tabel 1.1 laat het verschil zien.

**Tabel 1.1:** Tabel met geselecteerde waterstofdragers en verschillende gebruiksvormen.  
Uit: Kamerbrief Kabinetsvisie omgaan met waterstofdragers [1]. Bijlage: Verdiepingsdocument beoordeling waterstofdragers [5].

| Eindgebruik is waterstofgas                                                | Eindgebruik is waterstofdrager<br>(direct gebruik van de drager) |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1. Gekoeld vloeibaar gemaakte waterstof                                    | 1. Gekoeld vloeibaar gemaakte waterstof                          |
| 2. Ammoniak                                                                | 2. Ammoniak                                                      |
| 3. Methanol                                                                | 3. Methanol                                                      |
| 4. Liquid synthetic methane (LSM)                                          | 4. Liquid synthetic methane (LSM)                                |
| 5. Methylcyclohexaan<br>(MCH - een liquid organic hydrogen carrier (LOHC)) |                                                                  |
| 6. Dibenzyltolueen<br>(DBT - een liquid organic hydrogen carrier (LOHC))   |                                                                  |
| 7. Natriumboorhydride                                                      |                                                                  |

Dit onderzoek richt zich op incidenten met waterstofdragers die voor de conversie tot waterstofgas gebruikt worden (linker kolom). Incidenten kunnen in dit geval optreden bij transport, opslag, overslag en conversie van deze stoffen. Incidenten bij de productie van waterstof (of waterstofdragers) zijn buiten beschouwing gelaten.

Dit onderzoek hanteert expliciet twee uitgangspunten die ook zijn benoemd in het 'Verdiepingsdocument beoordeling waterstofdragers' [5]:

- › *Alle beschouwde stoffen worden – voor de eenvoud – aangeduid met de term waterstofdrager, hoewel het in strikte zin niet altijd om 'dragers' van waterstof gaat, maar bijvoorbeeld ook om vloeibare waterstof en direct inzetbare waterstofderivaten.*
- › *De inzet op gasvormige waterstof is al vastgesteld in het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) [en daarom niet meegenomen in dit onderzoek]. Aangenomen is dat een landelijk waterstoftransportnetwerk gerealiseerd zal worden en dat het waterstofgas, indien de waterstofdrager naar waterstofgas wordt geconverteerd, kan worden ingevoerd in dit landelijke waterstoftransportnetwerk.*

## 1.4 Leeswijzer

Dit rapport bestaat na dit inleidende hoofdstuk uit zes hoofdstukken en enkele bijlagen. Hoofdstuk 2 beschrijft de onderzoeksaanpak, inclusief de genomen stappen. Vervolgens biedt hoofdstuk 3 een marktverkenning waarin de huidige marktontwikkelingen en relevante trends worden geschetst. In hoofdstuk 4 volgt de risico-ontwikkeling waarin zowel het tijdspad van toekomstige risico's als de belangrijkste risico's met verschillende waterstofdragers in kaart gebracht worden. Hoofdstuk 5 gaat in op de wijze waarop inzicht verkregen is in toekomstige incidenten met waterstofdragers ondanks de huidige onzekerheden en zijn de belangrijkste lacunes, behoeften en handelingsperspectieven voor de veiligheidsregio's geïnventariseerd. Daarna bespreekt hoofdstuk 6 zowel bestaande als innovatieve oplossingen die kunnen bijdragen aan het voorbereiden van de veiligheidsregio's op mogelijke incidenten met waterstofdragers. Op basis van alle bevindingen presenteert hoofdstuk 7 ten slotte de conclusies en aanbevelingen voor vervolgstappen.

## 2 Onderzoeksaanpak

Voor dit onderzoek is een gefaseerde aanpak gehanteerd, waarbij zowel bureauonderzoek als expertkennis is ingezet ter beantwoording van de onderzoeksvragen. De aanpak bestaat uit de volgende fases, waarbij fase 1-3 iteratief doorlopen zijn:

### 1. Marktverkenning

In de eerste fase is een marktverkenning uitgevoerd rondom de rol van waterstof en waterstofdragers in de energietransitie, waarbij fossiele energiebronnen worden vervangen door hernieuwbare alternatieven. Waterstof, vooral geproduceerd via elektrolyse met duurzame elektriciteit ("groene waterstof"), speelt een sleutelrol als energiedrager en grondstof in diverse sectoren. De marktverkenning biedt inzicht in de huidige en toekomstige rol van waterstof en waterstofdragers, de relevante toepassingen, de benodigde infrastructuur en de beleidsmatige kaders. Ten grondslag aan de marktverkenning liggen twee macrosenario's die de toekomst schetsen voor de Nederlandse energievoorziening na 2030: ADAPT en TRANSFORM<sup>2</sup>. ADAPT bouwt voort op huidige economische sterktes, behoud van levensstijl en zekerheid, terwijl TRANSFORM voortbouwt op bereidheid tot gedragsverandering, een schone en energiezuinige economie, innovatieve technologieën. De verkenning is uitgevoerd door een deskstudie op basis van onder andere onderzoeken, beleidsdocumenten en technische rapporten. Daarnaast is gebruikgemaakt van interne expertise binnen TNO, afkomstig uit verschillende domeinen zoals energiestudies, technologie, veiligheid en incidentbestrijding.

### 2. Tijdspad en ontwikkeling risico's waterstofdragers

In de tweede fase is middels deskstudie onderzocht hoe de veiligheidsrisico's rondom waterstofdragers zich ontwikkelen gedurende de energietransitie; deze risico's zijn systematisch geïdentificeerd door literatuuronderzoek, analyse van markt- en technologische ontwikkelingen, en het in kaart brengen van bestaande en opkomende risico's op basis van relevante parameters en expertkennis. De nadruk ligt niet alleen op nieuwe stoffen, maar vooral op veranderende ketens, toenemende volumes en nieuwe toepassingen. De risico's worden beïnvloed door marktontwikkelingen, technologische vooruitgang en de complexiteit van logistieke ketens. De risico-ontwikkeling is systematisch in kaart gebracht voor de korte, middellange en lange termijn, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen bestaande en opkomende risico's, de mate van beheersbaarheid en de benodigde handelingsperspectieven voor hulpdiensten. De risico-ontwikkeling toont aan waar bepaalde onzekerheden liggen in de waterstofketen gezien de huidige ontwikkelingen.

### 3. Toekomstverkenning

In de derde fase is onderzocht wat de opkomst van verschillende waterstofdragers betekent voor mogelijke toekomstige incidenten, zodat veiligheidsregio's zich hierop kunnen voorbereiden. Hiervoor wordt scenariodenken als methodiek toegepast: door het ontwikkelen en analyseren van plausibele en relevante scenario's ontstaat inzicht in situaties waarin de reguliere incidentbestrijding mogelijk tekortschiet en voorbereiding nodig is. De eerdere marktverkenning en risico-ontwikkeling wordt gebruikt om relevante parameters en variabelen voor deze scenario's te identificeren. Met behulp van een morfologische box zijn uiteenlopende scenario's gegenereerd en eerst door experts van TNO en vervolgens in een

<sup>2</sup> <https://publications.tno.nl/publication/34636594/KRZna2/TNO-2020-scenario.pdf>

expertsessie met vertegenwoordigers uit de veiligheidsregio's gevalideerd op plausibiliteit en relevantie. Uit een longlist van scenario's zijn drie scenario's geselecteerd voor verdieping, gericht op incidenten met grote impact en beperkte ervaring bij de reguliere brandweer. Deze scenario's zijn in een workshop met experts uit de veiligheidsregio's geanalyseerd om lacunes in kennis, middelen en samenwerking te identificeren en om te bepalen welke aanvullende voorbereidingen nodig zijn. Zo biedt deze stap een gestructureerde aanpak om de risico's van toekomstige incidenten met waterstofdragers te verkennen en de voorbereiding van veiligheidsregio's te versterken.

#### **4. Synthese: bestaande en innovatieve oplossingsrichtingen**

In de stap "Bestaande en innovatieve oplossingen" is een verkenning uitgevoerd naar oplossingsrichtingen waarmee veiligheidsregio's zich kunnen voorbereiden op incidenten met waterstofdragers. Er wordt onderscheid gemaakt tussen bestaande oplossingen, gebaseerd op bekende IBGS-principes (bronbestrijding, effectgebiedsbepaling, ontsmetting), en innovatieve aanvullingen die inspelen op lacunes in kennis, technologie, organisatie, samenwerking en regelgeving. Deze stap gebruikt elementen die door de experts uit de veiligheidsregio's in de workshop genoemd zijn, aangevuld door TNO-experts op basis van bureauonderzoek.

#### **5. Conclusies en aanbevelingen**

Alle bevindingen uit de voorgaande stappen zijn samengebracht in dit rapport en in de conclusies samengevat om de onderzoeksvragen te beantwoorden. Dit omvat onder andere:

- › Overzicht van markt- en risico-ontwikkeling;
- › Toelichting op de methode voor toekomstverkenning;
- › Een uitwerking van de geselecteerde scenario's;
- › De resultaten van de expertsessie en workshop;
- › Een overzicht van geïdentificeerde lacunes en mogelijke oplossingsrichtingen.

Deze rapportage dient als input voor Ministerie van J&V en de veiligheidsregio's om meer kennis te krijgen over de mogelijke ontwikkelingen rondom waterstofdragers. Daarnaast biedt het inzicht in hoe de veiligheidsregio's zich kunnen voorbereiden op mogelijke toekomstige crises met waterstofdragers en ammoniak, en wat daarvoor nodig is.

De stappen worden in de volgende hoofdstukken nader toegelicht.

## 3 Marktverkenning

### 3.1 De rol van waterstof in de energietransitie

De energietransitie gaat over het vervangen van de fossiele energiebronnen steenkool, aardolie en aardgas door hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie, windenergie, biomassa, waterkracht, zonnewarmte, geothermie en omgevingswarmte. Waterstof ( $H_2$ ) zal een belangrijke rol spelen bij de absorptie van hernieuwbare energie in het energiesysteem en bij de vervanging van fossiele brandstoffen en grondstoffen door hernieuwbare alternatieven in het eindgebruik van energie en voor producten uit de chemische industrie. Het betreft dan waterstof die is geproduceerd door middel van elektrolyse van water, dat wil zeggen het splitsen van water in waterstof en zuurstof met behulp van hernieuwbare elektriciteit (hierna “groene waterstof”).

Doordat de zon niet constant schijnt en de wind niet constant waait is veel geïnstalleerd vermogen nodig om gemiddeld aan een vraag naar elektriciteit te voldoen. Een deel van de tijd zal dan het aanbod van elektriciteit groter zijn dan de vraag. Door middel van elektrolyse van water kan de energie dan tijdelijk worden opgeslagen in de vorm van waterstof. Opslag in batterijen of als warmte kan ook. Maar de opslagcapaciteit hiervan is beperkt en betreft vooral opslag voor uren of dagen. Waterstof kan in veel grotere hoeveelheden en voor langere tijd worden opgeslagen en bijvoorbeeld via pijpleidingen ook eenvoudiger over grote afstanden worden getransporteerd. Bij een tekort aan elektriciteitsproductie uit zon en wind om de vraag te dekken kan de waterstof dan worden ingezet om elektriciteit te produceren in flexibele gascentrales. Decentraal zou op termijn ook productie in kleinere eenheden op basis van brandstofcellen kunnen ontstaan. Maar als het potentieel aan hernieuwbare energie veel groter is dan de vraag naar elektriciteit kan er ook extra capaciteit worden geïnstalleerd om de energie van zon en wind te benutten voor vele andere mogelijke toepassingen van waterstof.

### 3.2 Toepassingen van groene waterstof

Naast vervanging van aardgas voor de productie van koolstofdioxide ( $CO_2$ )-vrije elektriciteit in flexibel regelbare gascentrales zijn er diverse andere mogelijke toepassingen voor groene waterstof. Dit zijn:

#### **Vervanging van fossiel waterstofgebruik in de industrie**

Een voor de hand liggende toepassing voor groene waterstof is de vervanging van het huidige fossiele waterstofgebruik in de industrie voor onder andere de productie van ammoniak (hierna grijze ammoniak), de raffinage van aardolie, de productie van biobrandstoffen (op het ogenblik voornamelijk uit biomassa-reststromen), de productie van waterstofperoxide, de hydrogenatie van plantaardige oliën en vetten in de voedingsmiddelenindustrie en tal van (vaak kleinere) toepassingen van waterstof als industrieel gas bij metaalverwerking en in de elektronica- en halfgeleiderindustrie. In Nederland wordt in totaal naar schatting ruim 100 petajoule (ca. 900 kiloton) waterstof geproduceerd met aardgas [6]. In Nederland wordt bijna 60% van die waterstof gebruikt voor de productie van ammoniak en ruim 30% voor de raffinage van aardolie. Het resterende deel is voor alle andere toepassingen.

Vervanging van het huidige fossiele waterstofgebruik door groene waterstof is relatief eenvoudig ten opzichte van inzet in nieuwe toepassingen omdat er niet geheel nieuwe ketens en markten ontwikkeld hoeven worden. Het grootste obstakel dat overwonnen moet worden zijn de hogere kosten voor groene waterstof. Maar de vervanging hoeft niet in één keer waardoor bij geleidelijke vervanging de stijging van de gemiddelde kosten beperkt kan blijven. Het realiseren van elektrolyseprojecten vergt echter grote investeringen met aanzienlijke risico's, omdat de technologie nog in ontwikkeling is en er tal van onzekerheden zijn over de aard, omvang en snelheid van de energietransitie. De ontwikkeling komt daarom op het ogenblik nog maar moeizaam op gang.

### **Vervanging van aardgas voor hoge temperatuur warmte in de industrie**

Groene waterstof kan worden ingezet voor vervanging van aardgas als brandstof in industriële processen die hoge temperatuur warmte nodig hebben en moeilijk of niet zijn te elektrificeren. In dit verband worden vaak industrietakken als de keramische industrie en de glasindustrie genoemd. Meer algemeen kan het gaan om alle industrie met een behoefte aan warmte met temperaturen van grofweg ruim boven de 200 °C.

Bij de huidige productiekosten is de prijs van groene waterstof echter een ordegrrootte duurder dan aardgas waardoor deze optie voorlopig niet haalbaar is [7]. Bedrijven die willen verduurzamen en waarvoor elektrificatie (nog) geen optie is zien daarom meer in een overgang naar koolstofarme waterstof. Dit is waterstof geproduceerd met aardgas gecombineerd met "carbon capture and storage" (CCS). Dit vergt echter nieuwe waterstoffabrieken met installaties die de CO<sub>2</sub> bij voorkeur tot meer dan 90% kunnen afvangen. Deze fabrieken zullen invoeden op het landelijke waterstofnet dat door Gasunie dochter Hynetwork wordt aangelegd [8]. Maar de bedrijven waar het om gaat liggen meestal niet in de buurt van het waterstofnet waardoor extra decentrale waterstofinfrastructuur nodig is. Vooralsnog ziet de overheid de aanleg hiervan niet als publieke taak en wordt alleen CCS beleidsmatig ondersteund omdat niet duidelijk is hoeveel infrastructuur er nodig is en uit voorzorg om niet in een "lock-in" terecht te komen in koolstofarme waterstof, wat een lange termijn voortzetting van het gebruik van aardgas zou betekenen. Op dit ogenblik hangt het daarom van private business cases af of nieuwe grootschalige productie van, regionale infrastructuur voor, en vervanging van aardgas door koolstofarme waterstof tot ontwikkeling komt.

### **Productie van ijzer en staal**

Waterstof kan worden gebruikt voor de reductie van ijzererts in een alternatief proces (Direct Reduced Iron (DRI) process) voor het huidige hoogovenproces waardoor er geen steenkool/cokes nodig is voor de productie van ruwijzer. Tata heeft plannen om beide hoogovens te vervangen door het DRI-proces. Beide zullen niet tegelijk worden vervangen en in eerste instantie zal het proces uitgevoerd worden met aardgas. Een overstap naar waterstof (of groen gas) komt pas als dat economisch haalbaar is. Het kabinet heeft toegezegd maximaal 2 miljard euro bij te dragen aan de verduurzamingsplannen maar de financiële steun wordt pas verstrekt na het ondertekenen van een definitieve maatwerkafpraak. Indien het proces voorspoedig gaat zou vervanging van de eerste hoogoven al in 2030 of kort daarna plaatsvinden. Inzet van waterstof zal naar verwachting pas veel later aan de orde zijn.

De huidige productiecapaciteit van Tata is ongeveer 7 miljoen ton ruwstaal. Als beide hoogovens zijn vervangen en de DRI-fabrieken zijn overgestapt op waterstof, dan zou voor die productiecapaciteit ongeveer 400 kiloton waterstof nodig zijn, wat ongeveer 5 gigawatt aan elektrolysecapaciteit zou vergen voor productie van de waterstof. Dat is een aanzienlijke capaciteit, maar die zou binnen Nederland gerealiseerd kunnen worden.

### **Productie van methanol op basis van waterstof en koolstofdioxide**

Vervanging van aardgas voor de productie van methanol in processen op basis van groene waterstof en koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), waarbij de CO<sub>2</sub> bij voorkeur van niet fossiele oorsprong is. Methanol die wordt geproduceerd met groene waterstof wordt in het algemeen aangeduid als e-methanol. Tot 2021 vond er methanolproductie plaats in Nederland bij de fabriek van OCI Methanol in Delfzijl. De productie is gestopt toen na de inval van Rusland in Oekraïne de gasprijs sterk steeg. Ondertussen is de fabriek verkocht aan Methanex, maar is niet duidelijk wat de plannen zijn met de fabriek. Voor productie op basis van groene waterstof en CO<sub>2</sub> zal ombouw nodig zijn. Het proces is echter energie-intensiever dan de productie met aardgas, en groene waterstof is nog een aantal malen duurder dan aardgas. Het is dan ook de vraag of productie van e-methanol in Nederland economisch haalbaar is. Import van e-methanol ligt vooralsnog meer voor de hand. Beschikbare cijfers over handelsstromen geven aan dat in 2023 bijna 2,9 miljoen ton (fossiele) methanol werd geïmporteerd in Nederland waarvan bijna 1 miljoen ton werd ingezet in de Nederlandse industrie en iets meer dan 1,1 miljoen ton werd geëxporteerd/doorgevoerd naar Duitsland [9]. Bij vervanging is er dus voorlopig voldoende infrastructuur voorhanden om enkele miljoenen tonnen methanol te verwerken.

### **Productie van synthetische koolwaterstoffen op basis van waterstof en koolstofdioxide**

Vervanging van aardolie voor de productie van vloeibare brandstoffen (e-fuels) en basisproducten voor de chemische industrie in processen op basis van groene waterstof en CO<sub>2</sub>. Op hoofdlijnen zijn er twee routes te onderscheiden:

- › Productie via (varianten van) het Fisher-Tropsch (FT) proces waarmee mengsels van koolwaterstoffen in diverse verhoudingen kunnen worden geproduceerd. Deze worden vervolgens via raffinage opgewerkt tot diverse brandstoffracties (kerosine, diesel en benzine) en nafta dat in krakers verder wordt verwerkt tot olefinen zoals ethyleen en propyleen die weer de basis vormen voor vele kunststoffen en andere producten uit de chemische industrie;
- › Productie op basis van e-methanol. Met het Methanol-to-Jet Fuel proces kan e-kerosine (of eSAF, Synthetic Aviation Fuel) voor de luchtvaart worden geproduceerd, en met het Methanol-to-Olefins proces kunnen olefinen voor de chemische industrie worden geproduceerd.

Het FT-proces is net als de productie van e-methanol een energie-intensief proces en het vergt grote investeringen in geheel nieuwe fabrieken. Het is dan ook de vraag wanneer investeringen zullen plaatsvinden en of dat in Nederland gebeurt. Import en verwerking van FT-productmengsels tot e-fuels in (aangepaste) bestaande raffinaderijen is wellicht realistischer, net als import van FT-nafta en verwerking in bestaande krakers tot basisproducten voor de chemische industrie. Productie van e-fuels en basisproducten in Nederland kan mogelijk ook via de e-methanol route. Op het ogenblik is er een initiatief van Power2X en Advorio om een grootschalige productie- en opslagfaciliteit voor duurzame vliegtuigbrandstof (e-SAF) en andere synthetische brandstoffen volgens deze route in Rotterdam te ontwikkelen [10]. Als het in Nederland uiteindelijk niet kan dan zullen de e-fuels geïmporteerd moeten worden. Bij import van FT-producten, e-methanol en/of e-fuels vindt toepassing van de waterstof buiten Nederland plaats. Import van die producten is vergelijkbaar met de huidige import van methanol en aardolieproducten en leidt niet tot nieuwe risico's.

### **Brandstof voor voertuigen in mobiliteit en transport**

Brandstof voor vervoerstoepassingen en mobiele werktuigen zoals auto's, bestelauto's, bussen, trucks, tractors, shovels, graafmachine, treinen, binnenvaartschepen en pleziervaartuigen. Batterij-elektrische voertuigen zijn in principe efficiënter, maar niet geschikt

voor alle voertuigen en inzetprofielen van voertuigen. Toepassing van waterstof concentreert zich op het ogenblik vooral op zwaardere vrachtauto's en mobiele werktuigen. Indien laainfrastructuur en grondstoffen voor batterijen geen beperkingen opleveren, zal het aandeel waterstof voor vervoerstoepassingen naar verwachting beperkt blijven. De optie wordt wel actief nagestreefd en ondersteund door overheden. Vanuit Europa is er de Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR) die lidstaten verplicht om te zorgen voor realisatie van een tankinfrastructuur bij stedelijke knooppunten en langs Europese hoofdtransportroutes [11]. Nederland doet dit met de Subsidieregeling Waterstof in Mobiliteit (SWiM) waarmee ook aanschaf van voertuigen wordt ondersteund. Er zijn twee rondes geweest waarin subsidie is toegekend voor in totaal 9 tankstations en 566 vrachtwagens en bestelwagens [12]. Volgens de laatste stand zijn er 25 waterstoftankstations in Nederland waarvan er 12 voldoen aan de AFIR-eisen. Eind 2025 waren er 62 bussen, 48 zware en 40 lichte bedrijfsvoertuigen en 652 personenauto's op waterstof op de weg [13].

### **Brandstof voor lokale elektriciteitsproductie met aggregaten**

Vervanging van diesel als brandstof voor emissie-vrije productie van elektriciteit met aggregaten op bouwplaatsen en evenemententerreinen. Bij aanbestedingen voor bouwprojecten en weg- en waterwerkzaamheden wordt in toenemende mate uitvoering met emissie-vrije werktuigen als randvoorwaarde opgenomen. Ondertussen zijn er diverse aanbieders van aggregaten op waterstof om lokaal gereedschappen en batterij-elektrische werktuigen van elektriciteit te voorzien. Het lijkt een aantrekkelijke markt voor waterstof, maar is niet een markt met een groot volume.

### **Lokale integratie van hernieuwbare energie in energiehubs**

Het principe van tijdelijke opslag van energie in de vorm van waterstof voor elektriciteitsproductie op een ander moment bij onvoldoende productie uit zon en wind kan niet alleen grootschalig centraal maar ook op kleinere schaal decentraal worden toegepast. Het kan op individueel bedrijfsniveau, waarbij er met name veel belangstelling is vanuit de agrarische sector. Het kan ook op het niveau van een groep bedrijven of diverse type bedrijventerreinen als onderdeel van een energiehub. De ontwikkeling van energiehubs staat nog in de kinderschoenen. Het is nog niet duidelijk in welke situaties inpassing van waterstof in een energiehub meerwaarde heeft en haalbaar is en hoe groot de rol van waterstof kan worden [14]. Hoe dan ook, in energiehubs wordt de waterstof lokaal geproduceerd, tijdelijk opgeslagen en ook weer lokaal geconsumeerd (voor productie van elektriciteit en/of warmte of het tanken van voertuigen).

### **Ruimte- en tapwaterverwarming in de gebouwde omgeving**

Vervangen van aardgas voor ruimte- en tapwaterverwarming in de gebouwde omgeving. Er heeft een pilot-project gelopen in Lochem [15] en er loopt nog een pilot-project in Wagenborgen [16]. Vooralsnog hebben isolatie, elektrificatie (hybride en volledige elektrische warmtepompen) en warmtenetten prioriteit voor het reduceren van de aardgasvraag in de gebouwde omgeving. Hoewel er ervaring wordt opgedaan voor het geval gedurende de transitie de optie toch nodig blijkt, wordt de inzet van waterstof op het ogenblik niet actief nagestreefd. In het geval van warmtenetten, is er op termijn mogelijk wel een rol als brandstof in centrales die de pieken in de warmtevraag in de winter moeten opvangen.

### **Bijmengen in het aardgasnet**

Vervangen van aardgas als brandstof door het bijmengen van een beperkte hoeveelheid waterstof in (delen van) het aardgasnet. Hoewel het technisch mogelijk is en er tal van praktijkprojecten lopen of hebben gelopen in Europa is er vooralsnog geen interesse in deze optie in Nederland.

### 3.3 Hernieuwbare energie via waterstofdragers

Op het ogenblik worden grote hoeveelheden fossiele energie geïmporteerd in Nederland en Europa. Algemeen wordt aangenomen dat de import van fossiele energie (van buiten Europa) niet volledig kan worden vervangen door benutting van lokale (Europese) hernieuwbare energie. Import zal nodig blijven, zeker in de relatief energie-intensieve economieën in de dichtbevolkte Noord-West Europese regio.

De benodigde import van hernieuwbare energie zal sterk afhangen van de mate van elektrificatie van het energieverbruik<sup>3</sup>, de mate waarin de benodigde elektriciteit lokaal kan worden geproduceerd met hernieuwbare bronnen (o.a. offshore wind van de Noordzee) en de ontwikkeling van de industrie, met name de energie-intensieve basisindustrie. Voor Nederland geldt daarnaast dat de omvang van de import mede wordt bepaald door de importbehoefte van Duitsland omdat de zeehavens in Nederland de dichtstbijzijnde zeehavens zijn voor een groot deel van Duitsland.

Verreweg de grootste hernieuwbare energiebron is zonne-energie, op ruime afstand gevolgd door windenergie. De voornaamste technologieën voor de winning van de energie van zon en wind leveren elektriciteit. Dit is echter lastig over hele grote afstanden en tussen continenten te transporteren. Ten behoeve van export/import moet de energie in een transporteerbare vorm worden omgezet. Dit is waar productie van groene waterstof in beeld komt.

De volumetrische energiedichtheid van gasvormig waterstof bij atmosferische druk is echter beperkt, zodat verdere bewerking of conversie nodig is om aanzienlijke hoeveelheden groene waterstof per schip te kunnen transporteren. In het algemeen gaat het om de volgende opties, die ook reeds in Tabel 1.1 zijn samengevat:

#### **Vloeibaar waterstof (Liquid Hydrogen; LH<sub>2</sub>)**

Om gasvormig waterstof vloeibaar te maken moet het diep worden gekoeld; waterstof wordt vloeibaar bij -253 °C. Vloeibare waterstof die bij de terminal binnenkomt, hoeft na overslag alleen te worden verdampt voor distributie via pijpleidingen. Het kan ook in vloeibare vorm verder worden vervoerd per binnenschip, per vrachtwagen of per spoor voor bevoorrading van grote en kleine(re) afnemers (bijvoorbeeld tankstations) totdat netwerken voor distributie zijn ontwikkeld. LH<sub>2</sub> levert zeer zuivere waterstof. Een ander voordeel is dat alle energiegebruik aan de exportkant plaatsvindt, daar waar voldoende hernieuwbare energie beschikbaar is. Bij slimme combinatie met cryogene processen zou de koude ook nuttig kunnen worden gebruikt wat gunstig is voor de efficiency van de optie.

Op 25 februari 2022 is het eerste internationale transport van een grote hoeveelheid vloeibare waterstof gerealiseerd over een afstand van 9000 kilometer van Australië naar Japan [17]. Het eerste schip voor transport van LH<sub>2</sub> heeft een volume van 1250 m<sup>3</sup> waarmee bijna 89 ton waterstof kan worden getransporteerd. Op 27 november 2025 is men in Japan gestart met de bouw van een LH<sub>2</sub> terminal met een capaciteit van 50.000 m<sup>3</sup> (3,5 kiloton waterstof) [18]. Naast de terminal zijn er plannen om een volgende LH<sub>2</sub> tanker te bouwen die met een volume van 40.000 m<sup>3</sup> een factor 30 groter is dan het eerste schip [19].

<sup>3</sup> Elektrisch rijden is veel efficiënter dan rijden op brandstof en er is geen aardolie of zelfs biomassa nodig voor productie van brandstof. Ook verwarming van woningen en bedrijfspanden met (hybride)warmtepompen is, indien mogelijk, veel efficiënter dan (alleen) verwarmen met een ketel op aardgas. Hetzelfde geldt voor industriële processen met een warmtevraag tot circa 200 °C en verwacht wordt dat ook processen met een hogere temperatuurvraag zijn te elektrificeren, hoewel de technologische oplossingen daarvoor in veel gevallen nog niet voorhanden zijn.

In april 2025 is er overeenkomst voor gezamenlijke ontwikkeling getekend om een importcorridor voor LH<sub>2</sub> te realiseren die de haven van Duqm in Oman, de haven van Amsterdam in Nederland en belangrijke logistieke knooppunten in Duitsland, waaronder de haven van Duisburg, met elkaar moet verbinden [20]. Het bedrijf ECOLOG ontwikkelt een terminal in de haven van Amsterdam en zal het transport per schip verzorgen. Het streven is om de levering van grote groene waterstofvolumes vanuit Oman naar Europa tegen 2029 mogelijk te maken [21]. Begin december 2025 is echter de ontwikkeling van één van de twee grote groene waterstofprojecten bij Duqm geannuleerd die de waterstof voor de corridor zouden moeten leveren [22]. Het is te vroeg om aan te geven of en in welke mate dit de tijdlijn voor ontwikkeling van de corridor beïnvloedt en of realisatie tegen 2029 überhaupt mogelijk is. Annulering van het project in Oman illustreert in ieder geval wel de moeizame ontwikkeling die groene waterstof in deze beginfase doormaakt.

### **Ammoniak (NH<sub>3</sub>)**

Ammoniak wordt geproduceerd door een reactie van waterstof met stikstof tot ammoniak via het klassieke Haber-Bosch proces. Voor productie op basis van groene waterstof wordt de stikstof verkregen door scheiding van lucht met een Air Separation Unit (ASU). Lucht bestaat voor ongeveer 78% uit stikstof. Transport kan dan als vloeistof plaatsvinden bij een temperatuur onder -33 °C. Waterstof kan worden teruggewonnen door ammoniak thermisch te kraken op een druk van 20-50 bar bij 600 – 700 °C en waterstof vervolgens uit het gasmengsel van waterstof en stikstof af te scheiden. Hierbij wordt ongeveer 85% van de waterstof teruggewonnen. Het resterende deel wordt als brandstof ingezet voor het kraakproces.

Ammoniak is een basisproduct dat al wereldwijd wordt verhandeld. In 2023 werd er wereldwijd ruim 185 miljoen ton grijze ammoniak geproduceerd [23]. Mede door sluiting van fabrieken in Frankrijk, Engeland en Duitsland is de productie in West-Europa vanaf 2020 gedaald van ongeveer 11 miljoen ton naar ruim 7,3 miljoen ton in 2023 (toename naar 8,8 miljoen ton in 2024). Naast eigen productie bedroeg de import van ammoniak in West-Europa bijna 4,1 miljoen ton in 2023. Ondanks de hoge aardgasprijzen wijzen cijfers erop dat in 2023 de export van ammoniak uit Nederland (ruim 400 kiloton) groter was dan de import (bijna 300 kiloton) [24]. Er vindt op het ogenblik export van ammoniak plaats naar Duitsland per trein en binnenvaartschip. Een deel van de import kan dus ook weer deel van de export zijn. Maar in ieder geval is er al infrastructuur voor import en transport aanwezig voor vele honderden kilotonnen ammoniak.

De productiecapaciteit voor ammoniak in Nederland bedraagt ongeveer 3 miljoen ton. Ook in Duitsland is er een grote productiecapaciteit, hoewel iets kleiner dan in Nederland. In sectie 3.2 is al aangegeven dat op het ogenblik bijna 60% van de fossiele waterstofproductie in Nederland samenhangt met de productie van ammoniak. In Duitsland is het aandeel kleiner, maar de absolute hoeveelheid is slechts 10% à 15% lager dan in Nederland. Er is dus veel fossiele waterstof te vervangen voor de productie van grijze ammoniak. Bij een verplichting voor inzet van zogenoemde 'renewable fuels of non-biological origin' (RFNBO, zie sectie 3.6) in de industrie ligt dan directe vervanging van de productie van grijze ammoniak door geïmporteerde groene ammoniak voorlopig meer voor de hand dan het terugwinnen van de waterstof uit de groene ammoniak tenzij het gunstiger is om in Nederland groene ammoniak te produceren met binnenlands geproduceerde groene waterstof. In dat laatste geval zou binnenlandse productie de voorkeur hebben boven import zolang er potentieel is voor binnenlandse productie. Er zou dan weinig reden zijn voor import van groene ammoniak voor waterstof (dus als waterstofdrager).

Tot slot zijn er ontwikkelingen om ammoniak in te zetten als vervanging voor stookolie als brandstof voor de zeescheepvaart. Hier zijn wel nieuwe motoren voor nodig, maar de eerste schepen die ammoniak kunnen inzetten worden gebouwd. Import zou dan nodig kunnen zijn om schepen te bunkeren. Ook in dat geval is er geen terugwinning van waterstof, maar alleen direct gebruik van ammoniak. Er is dan ook geen transport van ammoniak door het land. Deze ammoniak komt niet verder dan terminals in de haven.

### **Methanol (ook wel methyl-alcohol; CH<sub>3</sub>OH)**

Transport van groene waterstof in de vorm van methanol vereist productie van methanol op basis van groene waterstof en CO<sub>2</sub>, waarbij de CO<sub>2</sub> bij voorkeur van niet fossiele oorsprong is, dus ook hernieuwbaar<sup>4</sup>. Bij de productie wordt de CO<sub>2</sub> met waterstof gereduceerd tot koolstofmonoxide (CO), waarna de CO met waterstof reageert tot methanol. Methanol is bij omgevingstemperatuur een vloeistof en kan dus eenvoudig worden getransporteerd. Waterstof kan worden teruggewonnen door reforming van methanol met stoom in een katalytisch proces op een druk van ca. 20 bar bij 250 – 360 °C, gevolgd door scheiding van waterstof uit het productgas.

Het is echter de vraag of e-methanol moet worden beschouwd als waterstofdrager. De waterstofdichtheid van methanol is beperkt en het heeft veel grotere waarde als vervanging van fossiele methanol dat nu al op grote schaal (wordt geïmporteerd en) in de chemische industrie wordt gebruikt. Volgens beschikbare cijfers werd er bijna 2,9 miljoen ton methanol geïmporteerd in Nederland in 2023 [9]. De consumptie in Nederland was bijna 1 miljoen ton. Bijna 1,9 miljoen ton werd weer geëxporteerd, waarvan iets meer dan 1,1 miljoen ton naar Duitsland en ruim 200 kiloton naar België. Via het Methanol-to-Jet Fuel en het Methanol-to-Olefins proces kan het op termijn ook aardolie vervangen als grondstof voor de productie van kerosine voor de luchtvaart en voor de chemische industrie. Verder zijn er net als voor ammoniak ontwikkelingen om methanol direct als brandstof in te zetten in schepen. Het is om al deze redenen niet waarschijnlijk e-methanol op grote schaal zal worden ontleed voor terugwinning/productie van waterstof.

### **Vloeibaar synthetisch methaan (liquid synthetic methane, LSM)**

Vloeibaar synthetisch methaan is min of meer identiek aan vloeibaar aardgas (liquid natural gas; LNG). Productie van LSM vindt net als van e-methanol plaats op basis van groene waterstof en (duurzame) CO<sub>2</sub>. Het productieproces staat bekend als het Sabatier proces. Vervoer gaat in vloeibare vorm bij -162 °C, net als bij LNG. Terugwinning van waterstof kan in een gekatalyseerde reactie met stoom op een druk van ca. 20-30 bar bij een temperatuur van 800-900 °C, net zoals nu waterstof wordt geproduceerd met aardgas.

Bij de productie van waterstof met LSM komt de CO<sub>2</sub> weer vrij. Bij afvang, vloeibaar maken en terugvoer van de CO<sub>2</sub> kan het als een drager worden gezien. Dit ligt echter niet voor de hand, zeker niet als het methaan wordt geproduceerd met duurzame koolstof. Optimale benutting van schaarse duurzame koolstof is voor de energie- en materialentransitie van nog groter belang omdat het waarschijnlijk een nog schaarsere grondstof is dan groene waterstof. Net als bij e-methanol is het daarom de vraag of LSM moet worden gezien als waterstofdrager. In de eerste stap van de waterstofproductie wordt een mengsel van waterstof en koolstofmonoxide gevormd. Dit mengsel, dat synthesesgas wordt genoemd, is nu al een

<sup>4</sup> Om methanol te kunnen kwalificeren als “renewable fuel of non-biological origin” (RFNBO) in het kader van de Europese richtlijn voor hernieuwbare energie (Renewable Energy Directive; RED), moet de koolstof vanaf 2040 duurzaam zijn (van biogene oorsprong, circulair van afval of van Direct Air Capture; DAC). Om ketens op gang te brengen mag tot die tijd ook fossiele CO<sub>2</sub> worden gebruikt die is afgevangen bij de industrie of de productie van elektriciteit in kolen of gascentrales. De investeringshorizon voor grote projecten bedraagt echter minimaal 15 jaar, zodat ook nu al vooral naar mogelijkheden voor productie met duurzame koolstof wordt gezocht.

belangrijke grondstof voor de chemische industrie. Productie van synthesesgas is echter ook een belangrijke eerste stap voor de productie van e-methanol en in toekomstige Fisher-Tropsch fabrieken voor de productie van e-fuels (duurzame vloeibare brandstoffen) en e-nafta dat na kraken e-olefines oplevert voor productie van allerlei kunststoffen en producten in de chemische industrie. De processen zijn beschikbaar. Een bekend voorbeeld van conversie van methaan/aardgas in vloeibare brandstoffen is bijvoorbeeld het proces dat Shell op grote schaal toepast in de Pearl GTL (Gas-to-Liquids) fabriek in Qatar.

### **Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)**

Bij transport van groene waterstof door LOHC's wordt waterstof gebonden aan een vloeibaar organisch dragermateriaal. De bekendste zijn toluen en benzyltolueen. Bij het beladen (hydrogeneren) van toluen ontstaat methylcyclohexaan (MCH). Het Japanse Chiyoda en Honeywell UOP uit de Verenigde Staten ontwikkelen een proces op basis van dit stoffenpaar. Chiyoda heeft een proeffabriek in Brunei waar toluen wordt beladen en de MCH naar Japan wordt getransporteerd [25]. In Japan vindt dehydrogenatie van de MCH plaats. In de periode 2021/22 is er een haalbaarheidsstudie gedaan voor een project bij Koole Tankstorage (tegenwoordig Chane) in Rotterdam, waarbij commercialisatie werd verwacht in 2026-2027. Zowel resultaten van de studie als de huidige status van het project zijn niet bekend.

Bij het beladen van benzyltolueen ontstaat perhydrobenzyltolueen. Technologie voor dit stoffenpaar wordt ontwikkeld door Hydrogenious LOHC Technologies GmbH uit Duitsland. Tankopslagbedrijf VOPAK en Hydrogenious zijn begin 2023 de joint venture LOHC Logistix gestart voor levering voor import van waterstof via de LOHC benzyltolueen. Er zijn plannen voor de bouw van een fabriek in Rotterdam waarmee in eerste instantie 1,5 ton waterstof per dag kan worden teruggewonnen van de LOHC [26]. Tot op heden is er echter nog geen investeringsbeslissing genomen. Naast deze twee LOHC's zijn er meerdere ontwikkelingen. Onder andere de Nederlandse start-up Voyex ontwikkelt een alternatieve LOHC-technologie, maar details over de drager zijn nog niet bekend.

Bij het beladen van LOHC's met waterstof komt er warmte vrij. Voor terugwinning van de waterstof is er weer warmte nodig. Dehydrogenring van de bekende LOHCs vindt plaats met een katalysator bij temperaturen van 250-350 °C. Het dragermateriaal wordt daarna teruggevoerd voor een nieuwe lading waterstof. Welbeschouwd is er eigenlijk alleen bij LOHC's echt sprake van een drager; een stof die waterstof vervoert en zelf niet wordt verbruikt.

### **Natriumboorhydride (NaBH<sub>4</sub>)**

Natriumboorhydride is een zout. Als het in contact komt met water lost het op en komt er waterstof vrij. Daarbij ontstaat er een in wateroplosbaar bijproduct: natriummetaboraat-dihydraat. Dit kan worden gedroogd tot natriummetaboraat (NaBO<sub>2</sub>). Recycling van boraat naar boorhydride kan via metallothermische of kogelmolenprocessen m.b.v. metalen, metaalhydriden of metaallegeringen. Met name magnesium (Mg) blijkt effectief voor de regeneratie van NaBH<sub>4</sub>. De hoeveelheid energie die hiervoor nodig is bedraagt echter vele malen de energie-inhoud van waterstof zelf en is dus over de hele keten gezien niet efficiënt. Het hoge energiegebruik heeft te maken met de regeneratie van MgO naar Mg die nodig is voor het proces. Minder energie-intensieve, elektrochemische processen zijn in ontwikkeling maar bevinden zich nog op laag TRL-niveau [27].

In Nederland ontwikkelt de start-up H2Fuel bezig met de ontwikkeling van de NaBH<sub>4</sub> optie. Het Israelische Electriq Global werkt aan een boorhydride variant op basis van kalium (KBH<sub>4</sub>). In oktober 2023 heeft het bedrijf een subsidie van €1,1 miljoen toegekend gekregen voor een haalbaarheidsstudie naar een fabriek voor productie van waterstof op basis van het poeder. Bij positief resultaat zou de fabriek naar verwachting in 2026 operationeel kunnen zijn.

Het is echter niet bekend wat het resultaat is van de studie en wat de huidige status is van de plannen.

### 3.4 Import van waterstof op langere termijn

In de TNO-energiescenario's ADAPT en TRANSFORM worden toekomstperspectieven geschetst voor de energievoorziening in Nederland op de langere termijn [28]. Ze laten zien hoe een klimaatneutraal energiesysteem eruit kan zien bij het nastreven van verschillende duurzaamheidsambities. Het TRANSFORM-scenario is ambitieuzer dan ADAPT op het gebied van duurzaamheid. In de industrie worden veel nieuwe processen gebruikt voor de productie van chemicaliën en brandstoffen. Bovendien geldt in TRANSFORM een doelstelling voor verduurzaming van koolwaterstoffen die worden gebruikt bij de productie van chemicaliën en kunststoffen. Door gedragsverandering en verdere energiebesparing is de energievraag in TRANSFORM lager dan in ADAPT. In TRANSFORM wordt er verder vanuit gegaan dat de internationale lucht- en scheepvaart, waarvan de emissies buiten de nationale klimaatdoelstelling vallen, veel vergaande reductiemaatregelen zullen nemen dan in ADAPT.

In ADAPT zijn de veranderingen in de industrie beperkter en kunnen fossiele brandstoffen nog steeds als grondstof worden gebruikt; immers, de koolstof wordt voor enige tijd vastgelegd in producten en emissies in de afvalfase kunnen worden afgevangen en opgeslagen. De emissies van de internationale lucht- en scheepvaart worden slechts met 50% verminderd. In de basis kan worden gesteld dat ADAPT meer leunt op afvang en opslag van emissies voor het behalen van de doelen voor emissiereductie, daar waar TRANSFORM meer leunt op energiebesparing, afval als grondstof voor een circulaire chemische industrie en inzet van hernieuwbare energiebronnen. Met ADAPT haalt Nederland weliswaar de Europese doelstellingen, maar de bijdrage aan het behalen van de klimaatdoelstelling van Parijs is beperkter dan met TRANSFORM.

Naast het basisscenario voor TRANSFORM zijn er varianten met aanvullende aannamen over de concurrentiepositie van de Nederlandse industrie, met name de energie-intensieve industrie en de import van duurzame halffabrikaten zoals groene ammoniak en methanol. In alle scenario's is naast binnenlandse productie van waterstof echter ook nog import van waterstof nodig. Tegelijk is er sprake van aanzienlijk export van waterstof wat duidt op doorvoer naar Duitsland. Tabel 3.1 geeft ter illustratie van ordegroottes een samenvatting van de bandbreedtes van resultaten voor waterstof in de verschillende scenariovarianten. Hierbij is van belang dat het normatieve scenario's betreft, d.w.z. dat klimaatneutraliteit is opgelegd als randvoorwaarde in 2050. Het is mogelijk dat dit in de praktijk niet wordt gehaald en klimaatneutraliteit pas op een later moment wordt gerealiseerd. Daarmee zullen de cijfers in principe niet veranderen, maar slechts verschuiven naar later in de tijd.

**Tabel 3.1:** Projecties voor waterstof in de TNO ADAPT en TRANSFORM-scenario's voor 2045.

| Projecties waterstof voor 2045 | Bandbreedte *) [PJ H <sub>2</sub> ] | Bandbreedte bij import als LH <sub>2</sub> [kt H <sub>2</sub> ] | Bandbreedte bij import als NH <sub>3</sub> [kt NH <sub>3</sub> ] |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Binnenlandse vraag             | 203 – 586                           |                                                                 |                                                                  |
| Binnenlandse productie         | 95 – 413                            |                                                                 |                                                                  |
| Import                         | 90 – 303                            | 750 – 2.525                                                     | 5.000 – 16.833                                                   |
| Export                         | 130 – 279                           |                                                                 |                                                                  |

\*) N.B. omdat de ondergrenzen en bovengrenzen niet allemaal van dezelfde scenariovarianten zijn is de balans over de cijfers voor onder- en bovengrens niet sluitend.

Zoals in sectie 3.2 aangegeven, wordt er op het ogenblik ordegrrootte 100 PJ aan waterstof geproduceerd in Nederland met aardgas. De cijfers geven aan dat in minimale gevallen de vraag naar en de productie van waterstof niet sterk toeneemt. Er zal wel een verschuiving zijn van waterstof geproduceerd met aardgas naar productie van groene waterstof. Maar er zijn ook toekomstbeelden van een klimaatneutrale energievoorziening mogelijk waarin de vraag en de productie een aantal malen groter zijn dan in de huidige situatie.

In alle gevallen is er sprake van een aanzienlijke import van waterstof. In de twee rechter kolommen in Tabel 3.1 is aangegeven wat dit zou betekenen als de waterstof wordt geïmporteerd als vloeibaar waterstof of als ammoniak. Bij terugwinning uit ammoniak gaat dit niet zonder verlies. Voor de cijfers in de tabel is 15% verlies van waterstof aangenomen. Als import van groene waterstof in de vorm van ammoniak zou plaatsvinden, dan is de import ruim een orde tot wel 50 maal groter dan in de huidige situatie. Daarnaast kan import van groene ammoniak plaatsvinden ter vervanging van de huidige productie van grijze ammoniak. Ook kan import ontstaan wanneer de inzet van ammoniak als brandstof in de scheepvaart tot ontwikkeling komt. Om de hoeveelheid ammoniak te beperken zou ammoniak alleen voor ammoniak toepassingen geïmporteerd kunnen worden en zou groene waterstof bij voorkeur als vloeibaar waterstof of via LOHC's geïmporteerd kunnen worden als het alleen om de waterstof te doen is.

## 3.5 Export of doorvoer naar Duitsland

In Duitsland zijn ook energiescenario's gemaakt die vergelijkbaar zijn met de scenario's voor Nederland. De laatste update betreft twee verschillende scenario's, het O45-Strom en het O45-H<sub>2</sub> scenario [29]. Beide zijn overwegend groen en bereiken klimaatneutraliteit richting 2050. Het scenario O45-Strom zet zo veel mogelijk in op elektrificatie en gaat uit van volledige import van ammoniak en gedeeltelijke import van methanol en nafta. In het O45-H<sub>2</sub> scenario valt elektrificatie tegen en wordt een groter deel van de warmtevraag in de industrie en de gebouwde omgeving ingevuld met waterstof. Alle ammoniak en methanol voor de industrie worden in Duitsland geproduceerd en aangevuld met import van nafta.

Tabel 3.2 geeft een samenvatting voor de vraag en invulling van waterstof in het O45-Strom en het O45-H<sub>2</sub> scenario. Ondanks een hoge mate van elektrificatie, heeft ook het O45-Strom scenario een aanzienlijke waterstofvraag. Deze bestaat voor een derde uit waterstof die nodig is voor elektriciteitsproductie in gascentrales op momenten dat er onvoldoende aanbod is vanuit zon en wind. De overige twee derde is nodig voor zowel energetische als niet-energetische toepassingen in de industrie.

**Tabel 3.2:** Projecties voor waterstof in de Duitse O45-scenario's voor 2045.

| Projecties waterstof voor 2045 | Bandbreedte [PJ H <sub>2</sub> ] | Bandbreedte bij import als GH <sub>2</sub> [kt H <sub>2</sub> ] | Bandbreedte bij import als NH <sub>3</sub> [kt NH <sub>3</sub> ] |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Binnenlandse vraag             | 1.098 – 2.182                    |                                                                 |                                                                  |
| Binnenlandse productie         | 472 – 676                        |                                                                 |                                                                  |
| Import                         | 626 – 1.506                      | 5.217 – 12.550                                                  |                                                                  |
| wv. Import vanuit Nederland    | 140 – 360                        | 1.167 – 3.000                                                   | 7.778 – 20.000                                                   |

In de scenario's vindt import van ammoniak, methanol en nafta voor de industrie plaats per schip. De import van waterstof vindt vooral plaats als gasvormig waterstof waarvoor is verondersteld dat er een Europees waterstofnetwerk wordt gerealiseerd. Import van waterstof

is voor bijna 95% afkomstig uit Europa en wordt via dat netwerk geïmporteerd met name uit Zuid-Europa en de Balkan. De projectie voor import die vanuit Nederland plaatsvindt is echter ook aanzienlijk. De scenariostudie rapporteert 360 PJ voor het O45-H<sub>2</sub> scenario. De hoeveelheid voor het O45-Strom scenario is een schatting naar rato, maar zou iets kleiner kunnen zijn.

De cijfers voor export van waterstof in de Nederlandse scenario's komen redelijk overeen met de berekende import in Duitsland vanuit Nederland. Aangezien het twee verschillende studies zijn en de scenario's ook van elkaar verschillen is de overeenkomst waarschijnlijk toeval, maar de cijfers geven wel een indicatie voor de grote hoeveelheid groene waterstof, die nodig is als er wordt gestreefd naar een klimaatneutrale energievoorziening.

De waterstof die vanuit Nederland geleverd zou moeten worden varieert van ongeveer 30% meer tot ruim driemaal de huidige hoeveelheid waterstof, die in Nederland wordt geproduceerd met aardgas. De gemiddelde transportcapaciteit voor die hoeveelheid waterstof bedraagt ongeveer 4,5 tot ruim 11 gigawatt. Maar voor het kunnen dekken van piekvraag, of piekaanbod bij levering vanuit variabel aanbod van wind en zon, zal de totale capaciteit van één of meer pijpleidingverbindingen naar Duitsland waarschijnlijk groter moeten zijn. Dit komt boven op de capaciteit die nodig is voor waterstoftransport binnen Nederland, maar de geschetste capaciteiten zijn voor een waterstofpijpleidingnetwerk niet onoverkomelijk. De capaciteit van het landelijk waterstofnetwerk dat door Hynetwork aangelegd gaat worden, wordt bij een bedrijfsdruk van 30 tot 50 bar zonder tussentijdse compressie bijvoorbeeld al geschat op 10<sup>+</sup> GW.

Levering aan Duitsland zou deels vanuit binnenlandse productie met offshore wind van de Noordzee kunnen komen. Maar voor de hoeveelheden waar het om gaat zal ook import van groene waterstof per schip van buiten Europa nodig zijn. Die import zou plaats kunnen vinden via LOHC's. Het gewichtspercentage waterstof in LOHC's is in de praktijk typisch ongeveer 5,5%. Volledige import via LOHC's zou daarmee, alleen voor Duitsland, transport betekenen van ruim 21 miljoen ton tot wel 55 miljoen ton LOHC. Verder zou het een grote LOHC-dehydrogenatie capaciteit in Nederland vergen. De LOHC's, of in ieder geval een deel daarvan, zouden per pijpleiding, binnenvaartschip of trein doorgevoerd kunnen worden voor verwerking in Duitsland. Maar dit kan tot veel extra transport over water en spoor leiden.<sup>5</sup> Het gewichtspercentage waterstof in ammoniak is effectief ongeveer driemaal groter dan van LOHC's. De geschetste hoeveelheid in Tabel 3.2 zou voor Nederland bovenop import van ammoniak voor de eigen waterstofbehoefte, voor de eigen industrie, voor de scheepvaart, en deels voor de industrie in Duitsland kunnen komen. Dit zou import vergen die vele tientallen malen groter is dan de huidige import van ammoniak. Ook zou het een grote capaciteit aan krakers vergen. Net als voor LOHC's, zou in ieder geval een deel van de ammoniak die nodig is voor groene waterstof doorgevoerd kunnen worden naar Duitsland. Dit zou bij voorkeur via een pijpleiding moeten plaatsvinden die aan zou moeten sluiten op een centrale verwerkingscapaciteit in Duitsland. Maar gelet op de transportcapaciteit die een waterstofnetwerk kan leveren, kan de behoefte aan transport en verwerkingscapaciteit voor LOHC's en ammoniak worden vermeden wanneer de waterstof wordt geïmporteerd als vloeibaar waterstof. Als het daadwerkelijk gaat om een vraag naar groene waterstof dan lijkt import van die waterstof via vloeibaar waterstof de meest geschikte optie.

<sup>5</sup> De toename aan transport over water en spoor zal afhangen van de hoeveelheid die per pijpleiding kan worden getransporteerd, maar ook van afname van transportbehoefte door het wegvallen van transport van bijvoorbeeld steenkool en allerlei aardolieproducten als gevolg van de energietransitie.

## 3.6 Import van waterstof op korte termijn

De ontwikkeling van de vraag naar groene waterstof wordt op de korte termijn gedreven door verplichtingen voor inzet van zogenoemde “Renewable Fuels of Non-Biological Origin” (RFNBO) [30]. Dit zijn vloeibare of gasvormige brandstoffen waarvan de energie-inhoud afkomstig is van hernieuwbare bronnen, met uitzondering van biomassa. Dit omvat waterstof die is geproduceerd door elektrolyse van water met elektriciteit van hernieuwbare bronnen en vloeibare en gasvormige brandstoffen die zijn geproduceerd met hernieuwbare waterstof. Hoewel ammoniak nog niet bekend staat en ingezet wordt als brandstof, kan ook ammoniak, die wordt geproduceerd met groene waterstof, een RFNBO zijn. In plaats van brandstoffen zou het wellicht beter geweest zijn om brandbare stoffen op te nemen in de omschrijving. Om als RFNBO te kunnen kwalificeren, moet gebruik van een RFNBO tot minimaal 70% emissiereductie leiden ten opzichte van een fossiele referentiewaarde, gerekend over de keten van productie tot gebruik. Daarnaast moet aan een aantal aanvullende randvoorwaarden worden voldaan, die zijn vastgelegd in “delegated acts” die behoren bij de herziene Europese “Renewable Energy Directive” die sinds 20 november 2023 van kracht is (de RED III) [31].

De verplichtingen met betrekking tot inzet van RFNBO volgen uit de RED III (Directive (EU) 2023/2413), de ReFuelEU Aviation verordening (Regulation (EU) 2023/2405) en de FuelEU Maritime verordening (Regulation (EU) 2023/1805). Het gaat om de volgende opgaven:

- › Artikel 22a van de RED III draagt lidstaten op ervoor te zorgen dat de bijdrage van RFNBO in de industrie die voor finaal energieverbruik en niet-energetisch gebruik worden bestemd, tegen 2030 ten minste 42% en tegen 2035 60% bedraagt van de waterstof, die in de industrie voor finaal energieverbruik en niet-energetisch gebruik in de industrie wordt bestemd. Waterstof die wordt gebruikt voor de productie van conventionele brandstoffen en biobrandstoffen en waterstof die wordt geproduceerd als bijproduct of wordt afgeleid van bijproducten uit industriële installaties is hierbij uitgezonderd van de grondslag voor de opgave.
- › Artikel 25 van de RED III draagt lidstaten op om er via een verplichting aan brandstofleveranciers voor te zorgen dat in 2030 het aandeel van RFNBO in de aan de vervoerssector geleverde energie ten minste 1% bedraagt. Er zijn nog geen doelen voor na 2030.
- › Artikel 4 van de ReFuelEU Aviation verordening draagt leveranciers van luchtvaartbrandstof op om ervoor te zorgen dat volgens een bepaald tijdschema op elke luchthaven in de EU brandstoffen voor de luchtvaart beschikbaar zijn met een minimum aandeel duurzame brandstoffen, met als onderdeel daarvan een minimum aandeel synthetische/RFNBO brandstoffen. De minimumpercentages voor synthetische brandstoffen, voornamelijk e-kerosine, bedraagt 0,7% vanaf 1 januari 2030 (met gemiddeld 1,2% over 2030 en 2031), 5% vanaf 1 januari 2035 en vervolgens oplopend via 10% in 2040 en 15% in 2045 naar 35% in 2050.
- › Artikel 5 van de FuelEU Maritime verordening bevat slechts een beperkte opgave voor inzet van RFNBO. In de verordening ligt de nadruk meer op emissiereductie dan op inzet van hernieuwbare brandstoffen. De verplichting is omslachtig geformuleerd, maar komt grofweg neer op een aandeel van 1% in 2030 in de brandstoffen geleverd aan schepen met een bruto tonnage van meer dan 5 000 ton (diverse uitzonderingen daargelaten) en 2% in 2035 (hoewel er diverse redenen zijn waardoor hiervan kan worden afgezien).

Het kabinet is voornemens om een deel van de lidstaatverplichting bij de industrie neer te leggen. Die verplichting bedraagt 4% in 2030 en 9,9% in 2035 [32]. Het overige deel van de lidstaatverplichting, respectievelijk 38% in 2030 en 50,1% in 2035 zal moeten worden gerealiseerd door de industrie te verleiden via financiële instrumenten om de meerkosten

van groene waterstof te compenseren. Verder is er een aanknopingspunt in de RED III voor uitzondering van een deel van de grondslag voor de lidstaatverplichting die het gevolg is van gebruik van waterstof voor de productie van ammoniak. Nederland gaat er nu op voorhand van uit dat 60% van het waterstofgebruik voor ammoniak uitgezonderd kan worden. Tot slot wordt verwacht dat invulling van de verplichting voor de producenten van ammoniak ingevuld gaat worden door import van RFNBO gecertificeerde ammoniak.

Voor de vervoerssector heeft het kabinet jaarverplichtingen vastgesteld voor RFNBO door brandstofleveranciers. De RED III biedt de mogelijkheid om voor invulling van de RFNBO-opgave voor de vervoerssector gebruik te maken van de zogenoemde raffinageroute. Deze houdt in dat groene waterstof die wordt gebruikt voor de productie van conventionele brandstoffen of biobrandstoffen mag worden geteld alsof die waterstof direct als brandstof wordt ingezet in de vervoerssector. Omdat inzet via de raffinageroute goedkoper is dan directe inzet als brandstof in waterstofvoertuigen, zal de markt naar verwachting vooral kiezen voor invulling van de opgave via de raffinageroute. Om toch ook directe inzet van waterstof als brandstof van de grond te krijgen, wordt er een apart subdoel voor directe inzet ingevoerd [33]. Zowel doelen voor de vervoerssectoren “Land”, “Binnenvaart” en “Scheepvaart” kunnen via de raffinageroute worden ingevuld. Dit is echter niet mogelijk voor de luchtvaart waarvoor de EU-verordening specifiek de inzet van synthetische luchtvaartbrandstof voorschrijft.

Tabel 3.3 geeft een overzicht van de lidstaatverplichting voor inzet van RFNBO in de industrie en de RFNBO-jaarverplichtingen voor de industrie en vervoerssector zoals vastgesteld/voorgenomen door het kabinet.<sup>6</sup> Voor de vervoerssectoren zijn geen doelen gedefinieerd in de RED III en het kabinet heeft ook nog geen verdere richting gegeven aan de mogelijke ontwikkeling richting 2035. Er is wel een RFNBO-doel voor de luchtvaart in 2035 in de ReFuelEU Aviation verordening, maar die is nog niet vertaald naar een hoeveelheid. Voorlopig geeft alleen 2030 een volledig beeld. Hieruit blijkt dat de totale jaarverplichting die wordt opgelegd aan industrie en vervoerssector 12 PJ bedraagt. Invulling hiervan met groene waterstof zou ongeveer 1,2 GW elektrolyse vergen. De 0,9 PJ voor de ammoniakindustrie zal naar verwachting echter worden ingevuld door import van groene ammoniak. Het gaat dan om import van 51 kiloton ammoniak, iets minder dan 20% van de import van grijze ammoniak in 2023. In 2035 zou de behoefte kunnen oplopen naar import van 126 kiloton, ruim 40% van de import in 2023.

**Tabel 3.3:** Overzicht van de RFNBO-verplichtingen voor de industrie en vervoerssector in 2030 en 2035.

|                                    | 2030 RFNBO |      | 2035 RFNBO |      |
|------------------------------------|------------|------|------------|------|
|                                    | %          | [PJ] | %          | [PJ] |
| <b>Industrie</b>                   |            |      |            |      |
| Totale lidstaatverplichting        | 42%        | 14,5 | 60%        | 20,8 |
| Jaarverplichting ammoniakindustrie | 4%         | 0,4  | 9,9%       | 2,3  |
| Jaarverplichting overige industrie | 4%         | 0,9  | 9,9%       | 1,1  |
| Resterende lidstaatverplichting    | 38%        | 13,1 | 50,1%      | 17,3 |

<sup>6</sup> De basiswaarden voor de RFNBO-grondslag voor de industrie zijn 59 PJ voor ammoniakproductie en 11 PJ voor gebruik van waterstof in overige industrieën. Verwacht wordt dat 60% van het waterstofgebruik voor ammoniak uitgezonderd kan worden voor de grondslag waarmee de uitgangswaarde voor de ammoniakindustrie uitkomt op 23,6 PJ. De jaarverplichting voor de industrie gaat gelden voor bedrijven met een waterstofgebruik van minimaal 0,1 kiloton.

|                                                                     | 2030<br>RFNBO |       | 2035<br>RFNBO |        |
|---------------------------------------------------------------------|---------------|-------|---------------|--------|
|                                                                     | %             | [PJ]  | %             | [PJ]   |
| <b>Vervoerssector</b>                                               |               |       |               |        |
| Jaarverplichting Land                                               |               | 7,60  |               | ?      |
| wv. Directe inzet                                                   |               | 2,00  |               | ?      |
| Jaarverplichting Binnenvaart                                        |               | 0,22  |               | ?      |
| Jaarverplichting Scheepvaart                                        |               | 1,72  |               | ?      |
| Jaarverplichting Luchtvaart                                         |               | 1,10  |               | ?      |
| Totale jaarverplichting vervoerssector                              |               | 10,60 |               | ?      |
| <b>Industrie en vervoerssector</b>                                  |               |       |               |        |
| Jaarverplichtingen industrie en vervoerssector                      |               | 12,0  |               | 3,4+?  |
| Lidstaatverplichting industrie en jaarverplichtingen vervoerssector |               | 25,2  |               | 20,8+? |

Voor de 1,1 petajoule voor de luchtvaart is e-kerosine nodig. Het gaat om ongeveer 25 kiloton kerosine. Bij productie in Nederland op basis van groene waterstof en CO<sub>2</sub> zal er iets meer dan 1,1 petajoule waterstof nodig zijn vanwege conversieverliezen bij de productie. Verwacht wordt echter dat productie elders plaatsvindt en dat de e-kerosine wordt geïmporteerd. Productie in Nederland zou ook kunnen op basis van e-methanol waarbij dan waarschijnlijk ook de e-methanol wordt geïmporteerd, zodat het niet leidt tot een waterstofvraag in Nederland.

Afgezien van de jaarverplichting voor directe inzet van waterstof als brandstof in voertuigen onder de sector Land, is de verwachting dat de jaarverplichtingen voor Land, Binnenvaart en Scheepvaart vooral ingevuld zullen worden via inzet van waterstof in de raffinageroute. Er zijn echter ontwikkelingen voor de inzet van methanol en ook ammoniak als brandstof voor de scheepvaart. Invulling van de jaarverplichting voor de scheepvaart kan dus ook met methanol en ammoniak. 2030 lijkt hiervoor vooralsnog te kort dag, maar in 2035 kunnen dit al wel reële opties zijn. In dat geval is de verwachting dat de methanol en ammoniak voornamelijk zullen worden geïmporteerd. Tot slot is import van methanol voor een bijdrage aan de invulling van de jaarverplichtingen voor Land en Binnenvaart ook niet uitgesloten. Methanol kan eenvoudig (tot op zekere hoogte) worden bijgemengd bij benzine en ook in de binnenvaart staat methanol in de belangstelling als brandstof alternatief voor fossiele diesel.

Voor de industrie is er al wel zicht op de RFNBO-opgave voor 2035. Ook in 2035 is de jaarverplichting nog beperkt ten opzichte van de lidstaatverplichting. Nederland dient in principe wel invulling te geven aan de resterende lidstaatverplichting. Maar zolang inzet van RFNBO duurder is dan de conventionele brandstoffen, zal de industrie niet meer RFNBO inzetten dan de jaarverplichting zonder verdere financiële stimulering.<sup>7</sup> Indien aanvullende maatregelen succesvol zijn, zou dit kunnen leiden tot een groene waterstofvraag van 17,3 petajoule, ofwel 144 kiloton waterstof, waar ongeveer 1,7 GW elektrolysecapaciteit voor nodig is. Hier zou nog een aanzienlijke capaciteit bij kunnen komen als ook de jaarverplichtingen voor de vervoerssector richting 2035 verder toenemen. Die capaciteit zou dan in de richting van de streefwaarden van 3 à 4 GW kunnen gaan, die eerder voor 2030 golden, maar intussen zijn opgeschoven naar 2035 [34].

<sup>7</sup> Financiële stimulering kan direct door subsidie of fiscale maatregelen, of indirect door het creëren van vraag naar groene producten en dus betalende klanten.

Een ander uiterste voor invulling van de resterende lidstaatverplichting voor de industrie zou import van groene ammoniak kunnen zijn voor vervanging van binnenlandse productie. Dit zou import vergen van ordegrootte 930 kiloton ammoniak, wat ongeveer driemaal de import van ammoniak in 2023 zou betekenen, en ongeveer de helft bedraagt van de productiecapaciteit van Yara in Sluiskil. Ook zou import volledig via e-methanol kunnen plaatsvinden. Dit zou ongeveer 860 kiloton e-methanol vergen, wat dicht ligt tegen het geschatte huidige gebruik van 1 miljoen ton methanol in de industrie die ook nu al wordt geïmporteerd. In beide gevallen zou daar import voor invulling van de jaarverplichtingen in de vervoerssector bovenop kunnen komen. In de praktijk zal het waarschijnlijk een mix van deze opties worden. Voorwaarde is wel dat de vereiste capaciteiten internationaal beschikbaar zijn. Op het ogenblik lijkt dit voor ammoniak waarschijnlijker dan voor methanol. De capaciteit van het NEOM-project in Saudi-Arabië, dat z'n voltooiing nadert, heeft een productiecapaciteit van 1,2 miljoen ton groene ammoniak per jaar. Recent werd duidelijk dat YARA onderhandelt over afname van groene ammoniak van het project [35].

Voor grootschalige import van groene waterstof via vloeibaar waterstof of LOHC's lijkt 2035 te kort dag. Daar is nog te veel technologie-ontwikkeling, opschaling en realisatie van nieuwe infrastructuur voor nodig. Ook lijkt er voor 2035 nog weinig behoefte aan grootschalige import van groene waterstof in Duitsland vanuit Nederland. De lange termijn scenario's schetsen wel enige behoefte voor 2035, maar in die scenario's is geen rekening gehouden met de vertraging die er in de praktijk is in de ontwikkeling van de groene waterstof als brandstof voor energietoepassingen en als grondstof voor de chemische industrie. Daarnaast zijn er ook in Duitsland ambitieuze plannen, met name rond Wilhelmshaven in Noord-Duitsland, voor ontwikkeling van importfaciliteiten voor groene waterstof op basis van ammoniak die de eerste behoefte zouden kunnen dekken [36].

Niettemin geven zowel de Nederlandse als Duitse langetermijn-scenario's aan dat er aanzienlijke hoeveelheden groene waterstof nodig kunnen zijn voor het realiseren van een netto-nul klimaatneutraal energie- en grondstoffsysteem. Hoeveel import van groene waterstof daarvoor nodig gaat zijn is echter niet aan te geven. Het hangt sterk af van de mate van elektrificatie die mogelijk is en gedekt kan worden met eigen productie van duurzame elektriciteit, de ontwikkeling in de omvang van de industrie, de beschikbaarheid van biomassa als grondstof voor de chemische industrie en voor biobrandstoffen, en de mate waarin binnenlandse productie van ammoniak, methanol, brandstoffen en ruwijzer wordt vervangen door import van duurzame varianten. In dat laatste geval speelt groene waterstof wel een grote rol, maar vindt toepassing van de waterstof niet in Nederland plaats. In het geval er wel veel groene waterstof nodig is en daarmee import van groene waterstof, dan lijkt vooral import van vloeibare waterstof veel voordelen te bieden. Het kan eenvoudig worden hervergast tot gasvormig waterstof voor transport per pijpleiding. Er zijn geen fabrieken nodig voor het terugwinnen van waterstof uit waterstofderivaten. Al het energiegebruik voor de optie vindt plaats op de locatie van productie en het vloeibaar maken van de waterstof en bij hervergassing kan ook de energie die vrijkomt mogelijk nuttig gebruikt worden. Tot slot levert de optie direct zeer zuivere waterstof waardoor er ook geen waterstof verloren gaat in de scheidingprocessen die nodig zijn bij terugwinning van waterstof uit de andere opties, en het opzuiveren van de waterstof tot de juiste specificaties voor transport per pijpleiding.

Groene waterstof die nodig is voor de productie van ammoniak, methanol of e-fuels kan in eerste instantie beter worden geïmporteerd als ammoniak of methanol en direct als zodanig worden ingezet.

## 4 Tijdspad en ontwikkeling risico's waterstofdragers

Het tijdspad en ontwikkeling van risico's met waterstofdragers is niet alleen een kwestie van nieuwe stoffen, maar vooral van veranderende ketens, volumes en toepassingen. In dit hoofdstuk staat de volgende vraag centraal:

**Onderzoeksvraag 1: “Wat is het mogelijke tijdspad van risico's gebonden aan de realisatie van de energietransitie met betrekking tot waterstofdragers?”**

Eerst wordt uitgelegd hoe risico's zich kunnen ontwikkelen door veranderende ketens, volumes en toepassingen. Vervolgens wordt het tijdspad van deze risico's systematisch behandeld, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de korte, middellange en lange termijn. Door deze fasering ontstaat inzicht in hoe marktontwikkelingen en technologische innovaties de aard en omvang van veiligheidsrisico's beïnvloeden.

### 4.1 De markt als bepalende factor voor risico's

Nederland is in hoge mate afhankelijk van de import van waterstofdragers. Tot nu toe zijn dit vooral fossiele dragers, zoals aardgas en aardolie, die als energiedrager of grondstof een centrale rol spelen in onze economie. In de energietransitie zal deze afhankelijkheid waarschijnlijk niet verdwijnen, maar verschuiven naar energie- en waterstofdragers op basis van hernieuwbare energiebronnen. Zoals geschetst in de marktverkenning, betekent dit dat niet alleen pure waterstof een rol zal spelen, maar juist ook verbindingen die waterstof als basis hebben en als afgeleide verbinding worden geïmporteerd en ingezet. Het gaat hierbij voor een belangrijk deel om stoffen die nu al bekend zijn en op grote schaal worden gebruikt, zoals methanol en ammoniak. Daarnaast kunnen ook hernieuwbare varianten van fossiele brandstoffen (e-fuels, zoals synthetische kerosine) en e-methaan (de synthetische tegenhanger van aardgas en LNG) een rol gaan spelen. Tegelijkertijd zullen sommige bestaande “waterstofdragers” in de toekomst mogelijk juist verdwijnen, afhankelijk van technologische en marktontwikkelingen.

De ontwikkeling van risico's rondom waterstofdragers wordt in belangrijke mate bepaald door marktontwikkelingen. Naarmate de volumes van waterstofdragers in transport en opslag toenemen, groeit ook het risico op incidenten. Het is echter belangrijk te benadrukken dat het hierbij voor een groot deel gaat om risico's die al bekend zijn uit de praktijk van transport en distributie van stoffen als ammoniak, methanol en vloeibaar synthetisch methaan (LSM/LNG). Voor deze stoffen bestaan al decennialang logistieke ketens, regelgeving en handelingsperspectieven voor incidentbestrijding. De introductie van waterstofdragers betekent dus niet dat we plotseling met geheel nieuwe en onbekende risico's worden geconfronteerd. De echte vernieuwing zit vooral in de opkomst van enkele relatief nieuwe dragers, zoals vloeibare waterstof en natrium-/kaliumboorhydride. Voor deze stoffen zijn de technologie en logistiek nog in ontwikkeling en is er minder praktijkervaring met grootschalig transport en incidentbestrijding. Dit brengt additionele onzekerheden met zich mee, maar de volumes zijn voorlopig nog klein en de kans op incidenten blijft daardoor beperkt.

Naast de marktontwikkelingen speelt ook de technologische ontwikkeling van conversie, opslag en transport een cruciale rol in de risico-ontwikkeling. Veel van deze technologieën staan nog in de kinderschoenen of zijn slechts kleinschalig toegepast. Hierdoor zijn de risico's en handelingsperspectieven nog niet volledig bekend. Dit vraagt om voortdurende monitoring en kennisontwikkeling, zodat veiligheidsregio's tijdig kunnen anticiperen op nieuwe risico's en incidenttypen.

Ook de snelheid en richting van de marktontwikkeling zijn nog onzeker, waardoor het lastig is risico's goed in te schatten en tijdig te anticiperen. De keten van productie tot eindgebruik wordt langer en complexer, met meer schakels waar incidenten kunnen optreden. Door de opkomst van waterstofdragers en nieuwe toepassingsvormen is het bovendien voorstelbaar dat er nieuwe typen eindgebruikers of marktpartijen ontstaan. Voor deze gebruikers gaat het in de praktijk vrijwel altijd om de toepassing van gasvormig waterstof, terwijl de waterstofdrager zelf voor hen slechts een tussenstap is. Wanneer dergelijke nieuwe 'spelers' toetreden, gelden ook voor hen dezelfde vergunning- en toezichtregimes als voor bestaande partijen in transport, industrie en toepassing, zodat de veiligheid in de gehele keten geborgd blijft. Hoe deze risico's zich manifesteren, hangt sterk af van de gekozen route in de energietransitie: ADAPT bouwt voort op bestaande infrastructuur en kent een gematigde groei van waterstofdragers, terwijl TRANSFORM inzet op innovatie en snelle opschaling van nieuwe technologieën. In beide scenario's bepalen de snelheid van technologische ontwikkeling, de schaal van import en distributie, en de ketencomplexiteit het risicoprofiel voor de komende decennia.

## 4.2 Technologische ontwikkelingen en hun invloed op risico's

De stand van zaken van technologische ontwikkelingen is systematisch weergegeven in Tabel 4.1 waarin voor de verschillende waterstofdragers onderscheid is gemaakt tussen vier soorten vaste locaties en vier soorten dynamische locaties. De vaste locaties zijn opslag, verlading, conversie en toepassing/gebruik. De dynamische locaties zijn wegtransport, spoor, water/binnenvaart en buisleiding. Voor elk van deze locaties is per waterstofdrager aangegeven in hoeverre de technologie reeds is ontwikkeld en toegepast. De technologische status wordt weergegeven in drie niveaus:

- › Groen: bewezen en breed toegepaste technologie, waarvoor bestaande kennis en handelingsperspectieven beschikbaar zijn.<sup>8</sup>
- › Geel: technologie in ontwikkeling, kleinschalig toegepast (bijvoorbeeld in pilots, experimenten of demo's), of wettelijk (nog) niet toegestaan of verboden; dit is nader toegelicht in Tabel 4.2.
- › Rood: technologie die niet realistisch of haalbaar wordt geacht, bijvoorbeeld vanwege (kosten)technische, maatschappelijke en/of economische redenen.

<sup>8</sup> De risico's en effecten van incidenten met waterstofdragers die betrekking hebben op reeds bestaande en breed toegepaste technologieën en stoffen worden momenteel onderzocht in een separaat traject door AnteaGroup, in opdracht van het ministerie van IenW; dat onderzoek richt zich op het vaststellen van de bestaande risico's en het opstellen van een feitedossier. In de huidige studie ligt de focus daarom specifiek op technologieën en toepassingen in de gele cellen, omdat daar de grootste onzekerheden en uitdagingen voor de komende periode te verwachten zijn.

Voor de beantwoording van onderzoeksvraag 1 ligt de focus op de gele vlakken in de matrix. Juist deze categorieën vertegenwoordigen de technologieën en toepassingen waarvan de technologische, juridische en/of maatschappelijke ontwikkelingen in de komende jaren nog onzeker zijn en waar de grootste kennis- en capaciteitslacunes bestaan. Dit sluit aan bij de doelstelling om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van toekomstige risico's, zodat veiligheidsregio's zich kunnen voorbereiden op incidenten met waterstofdragers die nu nog niet of nauwelijks voorkomen.

**Tabel 4.1:** Stand van technologie voor verschillende waterstofdragers en hun toepassingen op vaste en dynamische locaties.

|                   | Vaste locaties |           |           |            | Dynamische locaties |       |       |      |
|-------------------|----------------|-----------|-----------|------------|---------------------|-------|-------|------|
|                   | Opslag         | Verlading | Conversie | Toepassing | Weg                 | Spoor | Water | Buis |
| LH2               |                |           |           |            |                     |       |       | a)   |
| Warme NH3         |                |           |           |            |                     |       |       |      |
| Koude NH3         |                |           |           |            |                     |       |       |      |
| LOHC - Tol/MCH    |                |           |           |            |                     |       |       |      |
| LOHC - DBT/pDBT   |                |           |           |            |                     |       |       | b)   |
| LSM               |                |           |           |            |                     |       |       | c)   |
| MeOH              |                |           |           |            |                     |       |       |      |
| NaBH <sub>4</sub> |                | f)        |           | e)         |                     |       |       | d)   |

Toelichting op de niet-realistisch geachte opties (rode cellen):

- Dit vereist extreem goed geïsoleerde leidingen, herkoeling om verdampingsverliezen te beperken, en speciale materialen om waterstofbroosheid te voorkomen; dit maakt het technisch complex en economisch onhaalbaar; langeafstandstransport gebeurt doorgaans in gasvorm.
- Technisch niet haalbaar voor grotere afstanden, vanwege de viscositeit en daardoor hoge pompkosten en mogelijke noodzaak voor verwarmde leidingen bij lage temperaturen.
- LSM (LNG) vereist een cryogene temperatuur en daardoor speciale geïsoleerde leidingen en pompsystemen, daardoor technisch complex en economisch minder aantrekkelijk; voor grote afstanden wordt aardgas in buisleidingen doorgaans in gasvorm vervoerd.
- Technisch (theoretisch) mogelijk, maar economisch en praktisch nog niet realistisch voor grote afstanden. Momenteel wordt onderzoek vooral gedaan naar transport per tankwagen of container, niet via pijpleiding.
- Boorhydriden worden in niches toegepast als waterstofdrager, zoals in pilots en in onderzoekslabs, maar commercieel gebruik is nog zeer beperkt; de technologie staat in de beginfase van opschaling op verschillende vernieuwende projecten.
- Overslag (transshipment) van NaBH<sub>4</sub> in bulk als vaste stof (poeder of granulaat) is technisch mogelijk en wordt in de literatuur als realistisch beschouwd, maar is door regelgeving sterk beperkt. Bulkoverslag in de praktijk betekent overslag van grote hoeveelheden in goed gesloten vaten/drums (bijvoorbeeld op pallets), niet als losgestorte stof.

Tabel 4.2 geeft een overzicht van de huidige wettelijke status voor het transport van verschillende waterstofdragers via diverse modaliteiten, zoals weg (ADR), spoor (RID) en binnenvaart (ADN). In de tabel wordt per stof aangegeven of transport is toegestaan, onder welke UN-nummer het valt, en of er specifieke beperkingen of verboden gelden. Deze tabel is belangrijk omdat de wettelijke kaders en classificaties direct bepalen welke stoffen op welke manier mogen worden vervoerd. Voor bekende dragers zoals methanol en ammoniak zijn de regels grotendeels uitgekristalliseerd en is transport toegestaan onder strikte voorwaarden. Voor andere dragers, zoals LH2 en NaBH<sub>4</sub>, zijn er nog beperkingen of zelfs verboden, omdat de technologie en praktijkervaring nog beperkt zijn en de risico's nog niet volledig in kaart zijn gebracht. De tabel laat zien dat de ontwikkeling van transportmogelijkheden voor nieuwe waterstofdragers sterk samenhangt met de voortgang van wet- en regelgeving. Dit heeft directe gevolgen voor de opschaling en toepassing van deze dragers in de energietransitie.

**Tabel 4.2** Wettelijke stand van zaken voor transport van waterstofdragers [37].

|                                                                                     |     | methanol                                                                          | ammoniak, samengeperst                                                            | ammoniak, gekoeld                                                                 | waterstof, samengeperst                                                            | waterstof, gekoeld                                                                  | natriumboor hydride                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                     |     |  |  |  |  |  |  |
|    | ADR | UN 1230                                                                           | UN1005                                                                            | verbod                                                                            | UN1049                                                                             | UN1966                                                                              | verbod                                                                              |
|  | RID | UN 1230                                                                           | UN1005                                                                            | verbod                                                                            | UN1049                                                                             | UN1966                                                                              | verbod                                                                              |
|  | ADN | UN 1230                                                                           | UN1005                                                                            | ID9000                                                                            | verbod                                                                             | verbod                                                                              | verbod                                                                              |

## 4.3 Risico's van waterstofdragers

De risico-ontwikkeling rondom waterstofdragers wordt in hoge mate beïnvloed door veranderingen in ketens, volumes en toepassingen die samengaan met de energietransitie. Hoewel veel waterstofdragers al decennialang in industriële installaties worden gebruikt, brengt de grootschalige introductie in nieuwe logistieke trajecten en de verschuiving naar woon- en gemengde gebieden nieuwe onzekerheden met zich mee. De aard en omvang van incidenten hangen sterk af van de fysische en chemische eigenschappen van elke drager, zoals fasegedrag, temperatuur, toxiciteit en reactiviteit. Hierdoor varieert het handelingsperspectief voor hulpdiensten per situatie: sommige incidenten zijn bij de bron aan te pakken, terwijl in andere gevallen (met name bij toxische wolken of cryogene lekkages) effectbeperking en bescherming van de bevolking centraal staan.

### Ammoniak

Ammoniak blijft één van de meest kritieke waterstofdragers, vooral vanwege de hoge toxiciteit en de potentieel grote effectafstanden. Bij warme ammoniak, die onder druk verkeert, doen incidenten zich doorgaans voor in de vorm van toxische dampwolken die vergelijkbaar zijn met lekkages uit bestaande industriële processen. In een deel van deze situaties is het mogelijk de bron af te sluiten, mits de installatie nog veilig benaderbaar is. Koude ammoniak is beperkt ontvlambaar, maar vormt bij lekkage vooral een dichte, laaghangende giftige dampwolk die zich met de wind verspreidt. Tegelijkertijd kan de extreme koude leiden tot beschadiging van infrastructuur die niet cryogeen-bestendig is. Incidenten met koude ammoniak doen zich o.a. voor bij op- en overslag in havens of transport per tankwagen of binnenvaartschip. Bij lekkage in oppervlaktewater lost ammoniak grotendeels op, wat de dampwolk beperkt maar leidt tot acute ecologische schade, zoals vissterfte en verstoring van het aquatisch milieu door sterke pH-stijging. Voor de brandweer is het handelingsperspectief

in de beginfase beperkt. De eerste giftige wolk verspreidt zich vaak sneller dan hulpdiensten kunnen ingrijpen. De focus ligt daarom op het snel afzetten van het gebied, alarmeren van omwonenden (schuiladvies), en het stoppen van de uitstroom via noodsystemen of afsluiters. Effectbestrijding gebeurt met waternevel om de damp te verdunnen of neer te slaan, maar dit is slechts deels effectief en kan leiden tot vervuild bluswater.

### **Vloeibare waterstof**

Bij lekkage verdampt vloeibare waterstof razendsnel tot gasvormige waterstof ( $\text{GH}_2$ ), die lichter is dan lucht en zich snel verspreidt. De damp is zeer licht ontvlambaar en heeft een breed explosiegebied. Ontsteking leidt tot een fakkelbrand of, bij vertraagde ontsteking, tot een wolkbrand of explosie. De vlam is vrijwel onzichtbaar, wat extra risico's oplevert voor hulpverleners. Het grootste gevaar bij  $\text{LH}_2$  is de combinatie van extreme kou en brandbaarheid. Contact met de vloeistof veroorzaakt vrieswonden; daarnaast kunnen materialen bros worden en falen. Bij lekkage ontstaat een koude gaswolk die zich snel verspreidt en bij ontsteking grote schade kan veroorzaken. In besloten ruimten is het risico op explosie aanzienlijk. Voor de brandweer is het handelingsperspectief beperkt. In de beginfase is het vaak niet mogelijk om de uitstroom te stoppen of de brand effectief te bestrijden. De inzet richt zich op het afzetten van het gebied, het beschermen van objecten (koelen) en het gecontroleerd laten uitbranden van de waterstof. Blussen is alleen zinvol als de gastoevoer kan worden afgesloten. Koelen van tanks en leidingen met verneveld water is essentieel om fysische explosies (BLEVE) te voorkomen. Vanwege de beperkte praktijkervaring met  $\text{LH}_2$  is specialistische kennis en voorbereiding cruciaal. Incidentbestrijding vereist inzet van gaspakdragers, onafhankelijke ademlucht en kennis van cryogene stoffen.

### **Liquid Organic Hydrogen Carriers**

LOHC's presenteren een ander risicoprofiel dan ammoniak en  $\text{LH}_2$ . Hoewel de acute gevaren doorgaans kleiner zijn, kunnen plasbranden bij deze stoffen langdurig en hardnekkig zijn, mede door de aromatische samenstelling van veel dragermoleculen, wat leidt tot dikke rook en lange brandduur. Daarnaast kunnen sommige LOHC-componenten toxisch of persistent in het milieu zijn, waardoor ook op de langere termijn risico's ontstaan voor bodem- en waterkwaliteit. Tijdens de processen van hydrogenatie en dehydrogenatie bestaat bovendien een reëel risico op waterstoflekkage. Incidentbestrijding bij LOHC's lijkt sterk op die van koolwaterstofbranden en vereist langdurige koeling, zorgvuldige monitoring en nauwe samenwerking met milieudiensten om verspreiding van schadelijke stoffen te voorkomen. Vanwege de potentiële milieuschade kan de inzet in LOHC-scenario's aanzienlijk langer aanhouden dan bij andere waterstofdragers.

### **Liquid Synthetic Methane**

LSM (ook wel 'synthetisch methaan' genoemd) dat in vloeibare vorm wordt vervoerd, vertoont een risicoprofiel dat sterk overeenkomt met dat van LNG. Brandbaarheid en de mogelijkheid van gaswolkexplosies onder specifieke omstandigheden vormen de belangrijkste gevaren. Daarnaast kunnen cryogene effecten schade aan infrastructuur veroorzaken. Omdat LSM qua karakter sterk lijkt op LNG, zijn bestaande protocollen voor LNG-incidenten in hoge mate toepasbaar. Wanneer detectie en afsluitmechanismen tijdig functioneren, zijn incidenten met LSM doorgaans goed beheersbaar.

### **Methanol**

Methanol vormt risico's door zowel zijn brandbaarheid als toxiciteit. Wanneer methanol lekt, kunnen zich dampwolken vormen die bij contact met een ontstekingsbron explosief kunnen verbranden. In vergelijking met ammoniak of cryogene stoffen is het incidentverloop beter beheersbaar, omdat zowel bronbestrijding als effectbeperking doorgaans effectief kan worden uitgevoerd met bestaande middelen, zoals alcoholbestendig schuim en gerichte

ventilatie. Toch blijft snel en zorgvuldig optreden noodzakelijk: het combineren van brandgevaar en gezondheidsrisico's maakt dat een incident met methanol altijd vraagt om een directe inschatting van het effectgebied en, waar nodig, het nemen van maatregelen zoals afzetting of evacuatie.

### **Natriumboorhydride**

Natriumboorhydride is een vaste stof die wordt onderzocht als potentiële waterstofdrager, maar bevindt zich nog in een vroege ontwikkelfase. De stof is sterk reductief en reageert heftig met water en alcoholen, waarbij waterstofgas en warmte vrijkomen. Deze reactie kan leiden tot snelle gasontwikkeling, brand of zelfs explosie, vooral bij onvoldoende beheersing van de reactieomstandigheden. Vanwege het beperkte gebruik in de praktijk en het ontbreken van grootschalige toepassingen is het risicobeeld grotendeels gebaseerd op laboratoriumgegevens en theoretische aannames. Hierdoor is het handelingsperspectief voor hulpdiensten momenteel beperkt. Incidentbestrijding vereist specialistische kennis van de stoffeigenschappen, inclusief de reactiviteit met water en de mogelijke vorming van brandbare gasmengsels. Preventieve maatregelen zijn cruciaal: opslag en gebruik dienen plaats te vinden onder inerte omstandigheden (bijvoorbeeld onder stikstofatmosfeer) om contact met vocht te vermijden. Bedrijven die met  $\text{NaBH}_4$  werken, moeten beschikken over adequate beheersmaatregelen en noodprocedures. Voor hulpdiensten is het essentieel om voorafgaand aan een incident samen te werken met deze bedrijven om inzicht te krijgen in de specifieke risico's en aanwezige voorzieningen. Bij incidenten is het van belang om voldoende afstand tot de bron te houden en alleen met beschermde, getrainde eenheden op te treden. Inzet moet gericht zijn op het voorkomen van contact met water en het beheersen van eventuele gasvorming. Vanwege de onbekendheid met grootschalige incidenten met  $\text{NaBH}_4$  is terughoudendheid geboden en moet de inzet altijd plaatsvinden op basis van actuele informatie, specialistisch advies en in nauwe samenwerking met de betrokken organisatie.

## **4.4 Tijdsfad voor risico-ontwikkeling**

De ontwikkeling van risico's rondom waterstofdragers is sterk afhankelijk van het tempo en de aard van de energietransitie. In deze paragraaf is het verwachte tijdsfad geschetst voor de korte, middellange en lange termijn waarbinnen de verschillende risico's zich kunnen manifesteren, met aandacht voor zowel technologische als maatschappelijke ontwikkelingen. Het tijdsfad is geschetst op basis van ADAPT en TRANSFORM, die uiteenlopende toekomstbeelden bieden voor de uitrol van waterstofdragers in Nederland. Door inzicht te geven in de fasering van risico's en de bijbehorende uitdagingen voor de veiligheidsregio's, wordt duidelijk op welke momenten extra aandacht, voorbereiding en investeringen noodzakelijk zijn om incidenten met waterstofdragers effectief te kunnen beheersen.

### Samenvatting energie-scenario's ADAPT en TRANSFORM

Het regeerakkoord Rutte IV schrijft voor dat de Nederlandse broeikasgasemissies vóór 2030 met ten minste 55% moeten worden gereduceerd en dat de energievoorziening in 2050 klimaatneutraal moet zijn. Een substantieel deel van de energie zal naar verwachting komen uit waterstofdragers. De vraag is wat het tijdspad is voor de ontwikkeling van de veiligheidsrisico's en welke consequenties heeft dat voor de capaciteit en handelingsperspectieven voor de Veiligheidsregio's voor de bestrijding van incidenten. Het tijdspad, zoals beschreven in dit hoofdstuk, is beschreven op basis van de zogeheten ADAPT en TRANSFORM energie-scenario's, zoals ontwikkeld door TNO [28]. In beide scenario's worden de klimaatdoelen gehaald, maar de manier waarop verschilt. ADAPT gaat uit van het voortzetten van de huidige levensstijl en economische structuur, waarbij fossiele brandstoffen met CO<sub>2</sub>-opslag toegestaan blijven en de verduurzaming van grondstoffen beperkt is. TRANSFORM is ambitieuzer en zet in op gedragsverandering, sterke elektrificatie en een hoge mate van circulaire en hernieuwbare koolstof in de chemie en volledige verduurzaming van brandstoffen voor lucht- en scheepvaart.

Over de termijnen en per waterstofdrager variëren de risico's, effecten en handelingsperspectieven van kleinschalig en leerbaar, naar grootschalig en specialisatie-behoefstig tot volledig ingebed, maar nooit risicovrij. Het ADAPT-energiescenario kent op elke termijn minder drastische veranderingen en kan met versterking van bestaande structuren veel aan, maar moet alert blijven op resterende risico's in fossiel-waterstof hybride systemen. Het TRANSFORM-energiescenario vraagt om proactieve, innovatieve en gecoördineerde incidentbestrijding: van principe-afspraken tot hightech bestrijding en ontwerp, om de aanzienlijke toename aan waterstofdragerstromen veilig te laten verlopen. Beide scenario's benadrukken echter dat voorbereiding essentieel is en dat inzicht in het tijdspad en risico's veiligheidsregio's in staat stelt tijdig te anticiperen en zo de energietransitie zo veilig mogelijk te faciliteren.

In de volgende drie paragrafen wordt het tijdspad van risico-ontwikkeling uitgewerkt. Eerst wordt ingegaan op de risico's en handelingsperspectieven op korte termijn (5-10 jaar), waarin de eerste stappen van de energietransitie zichtbaar worden en bestaande incidenttypen domineren. In de paragraaf over de middellange termijn (10-15 jaar) is het ontstaan van nieuwe logistieke ketens en technologieën beschreven en toename van de complexiteit van incidenten. De laatste paragraaf richt zich op de lange termijn (15-25 jaar), waarin waterstofdragers volledig zijn ingebed in het energiesysteem en nieuwe typen risico's en incidenten kunnen optreden.

## 4.4.1 Korte termijn

Op korte termijn legt Nederland de basis voor de transitie. In ADAPT blijft de dominantie van de bestaande fossiele infrastructuur bestaan terwijl de eerste stappen richting vergroening zichtbaar zijn, zoals hoog energieverbruik, continuïteit van brand- en explosie-incidenten bij olie en gas, en een groeiende import en productie van NH<sub>3</sub>. De risico's bestaan uit brand, explosie en toxische wolken bij NH<sub>3</sub>, met name op de Basisnet-routes door een hogere frequentie van (warm) NH<sub>3</sub>-transport. In TRANSFORM zet de markt in op meer groene energie. De eerste waterstof- en ammoniak importterminals en hubs worden gerealiseerd, elektrolyse neemt toe en LH<sub>2</sub> en LOHC's komen op de markt. Voor de korte termijn ligt de focus op leren en beheersbaar houden van incidenten, die vergelijkbaar zijn met de huidige situatie. Dit geeft ruimte om protocollen te testen en kennis en expertise op te bouwen.

ADAPT zet in op voorzichtigheid, terwijl TRANSFORM proactief investeert in detectie- en bestrijdingsmiddelen om zich voor te bereiden op de komst van verschillende waterstofdragers.

**Tabel 4.3** Uitgangspunten voor risico-ontwikkeling op korte termijn.

| Korte termijn                           | ADAPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | TRANSFORM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gevaren en effecten                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Risico's vooral toxisch (NH<sub>3</sub>) en koud/brandbaar (LH<sub>2</sub>).</li> <li>› Kleine lekkages met beperkte impact omdat volumes (nog) gering zijn.</li> <li>› Effecten blijven lokaal, grootste effecten van ammoniaklekken bij industriële installaties.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Opschaling van pilots, waterstofhubs in havens, bulkimport koude NH<sub>3</sub> en LH<sub>2</sub>.</li> <li>› Nieuwe transportroutes met NH<sub>3</sub>- en LH<sub>2</sub>-tankwagens.</li> <li>› Kans op grotere incidenten als gevolg van grotere volumes.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Uitgangspunten voor incidentbestrijding | <ul style="list-style-type: none"> <li>› IBGS en Brandweer voldoende bekwaam; ammoniakincidenten zijn bekend terrein.</li> <li>› Bronaankpak; kleine lekkages worden direct en actief bestreden.</li> <li>› Omwonenden krijgen helder advies over schuilen of evacueren bij NH<sub>3</sub>-incidenten.</li> <li>› Basisvoorzieningen (waterschermen en absorptiemiddelen) voldoende beschikbaar.</li> </ul>                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>› IBGS-training en oefeningen met NH<sub>3</sub>- en LH<sub>2</sub>-incidenten.</li> <li>› Waterschermen bij NH<sub>3</sub>-lekken<sup>9</sup></li> <li>› Bij LH<sub>2</sub> afstand houden en gecontroleerd afblazen.</li> <li>› Coördinatie en samenwerking met bedrijfsbrandweer.</li> <li>› Preventief monitoren, early warning en detectiealarm voor tijdige inzet.</li> </ul>                                                                                                                                                                                               |
| Handelingsperspectief                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Pilots inherent veilig opgezet, b.v. kleine tanks, dubbele wand en automatische afsluiters.</li> <li>› Lessons learned uit industriële incidenten worden gedeeld met alle veiligheidsregio's.</li> <li>› Waterstofdragers worden op afroep geproduceerd, zodat er zo min mogelijk wordt opgeslagen in dichtbevolkte gebieden.</li> <li>› Regionaal wordt het publieksprotocol "Blijf Binnen bij ammoniakalarm" geoefend, zodat omwonenden juist reageren bij een lek.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Multidisciplinaire Taskforces en draaiboeken voor rampscenario's.</li> <li>› Regionale oefeningen en (digitale) simulaties, testen besluitvorming en evacuatie.</li> <li>› Wettelijk borgen dat nieuwe installaties voldoen aan Safe by Design (veiligheids-hiërarchie), zoals voorkomen, minimaliseren, vervangen, vereenvoudigen, b.v. voorkeur voor buisleiding of binnenvaart boven weg.</li> <li>› Speciale normen voor pilotprojecten met extra veiligheidsbarrières, zodat ervaring kan worden opgedaan en normen continu worden geëvalueerd en aangescherpt.</li> </ul> |

## 4.4.2 Middellange termijn

De energiemarkt ontwikkelt zich verder. In ADAPT groeit het gebruik van energie gestaag door en de risico's van brand en explosie blijven beheersbaar door versterking van bestaande structuren, strenge doch effectieve regels en de focus op preventie. Risico's op de Basisnet-routes blijven bestaan, maar veranderen door transport van zowel warme als koude NH<sub>3</sub>. Ook (transport van) methanol kan een rol gaan spelen. In TRANSFORM ontstaan waterstofhubs en wordt LOHC-technologie volwassen. Er komen distributienetwerken voor transport van waterstofdragers, waaronder de backbone. Naast toxische NH<sub>3</sub>-wolken nemen de risico's voor LH<sub>2</sub>-explosie en chronische effecten van LOHC's toe, maar de effecten en incidentfrequentie daarvan blijven beperkt. De komst van geavanceerde technologie en goed preventiebeleid reduceert de kans op incidenten, terwijl hulpdiensten zich voorbereiden op incidenten met verschillende waterstofdragers.

<sup>9</sup> Uit onderzoek is gebleken dat relatief weinig NH<sub>3</sub> wordt 'neergeslagen' en dat het vooral voor betere menging met lucht zorgt en zodoende de gaswolk verdunt.

**Tabel 4.4:** Uitgangspunten voor risico-ontwikkeling op middellange termijn.

| Middellange termijn                     | ADAPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | TRANSFORM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gevaren en effecten                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Fossiele energie blijft belangrijk.</li> <li>› Waterstofdragers bij niche-toepassingen.</li> <li>› Transportstromen schuiven: meer transport via buisleidingen binnenvaart i.p.v. weg en spoor.</li> <li>› Risicoprofiel wordt diverser: naast toxiciteit van NH<sub>3</sub> - en wellicht methanol - wordt explosiegevaar van LH<sub>2</sub> relevant.</li> <li>› Grotere volumes vergroten de omgevingsveiligheid als aandachtspunt.</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Diversiteit van incidentscenario's, zoals backbone (H<sub>2</sub>), buisleidingen, bunkerstations, (energy-) hubs.</li> <li>› Domino-effecten, zoals brandoverslag van/naar LH<sub>2</sub>-opslag; kans op hybride incidenten, keten- of cascade-effecten.</li> <li>› Buisleidingbreuk met NH<sub>3</sub> zal een toxische wolk genereren.</li> <li>› Leren uit bijna-ongevallen voor preventie van incidenten.</li> </ul>                       |
| Uitgangspunten voor incidentbestrijding | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Meer middelen voor meer regio's, zoals gaspak-teams voor NH<sub>3</sub>-incidenten, drones, IR-detectie.</li> <li>› Regionaal risicoprofiel en rampenplannen actualiseren o.b.v. incidenten met waterstofdragers.</li> <li>› Focus op effectbeperking: soms is bronafsluiting niet direct mogelijk; dan defensieve strategie (afzetten, koelen, wolk verdunnen).</li> <li>› Interregionale bijstand: bij grote incidenten opschaling conform GRIP.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Samenwerking met bedrijfsbrandweren.</li> <li>› Slimme detectie &amp; alarmering, zoals toepassing automatische shut-down, slimme sensoren en sectorvalven.</li> <li>› Brandweer ontvangt real-time sensorinfo via meldkamer.</li> <li>› Oefenen: zoals scenario's waarbij brand én toxisch én explosie samenkomen.</li> <li>› Omgevingsalarmering via sirenes en NL-Alert; evacuatieplannen met focus op opvang van grotere groepen.</li> </ul> |
| Handelings-perspectief                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Vervoer over basisnet gevaarlijke stoffen i.c.m. buisleidingen of binnenvaart.</li> <li>› Samenwerking met bedrijven, hulpdiensten en wetenschap.</li> <li>› Handelingsperspectieven o.b.v. van praktijkdata, zoals Red Squirrel ammoniaktests.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Safe by Design: ontwerpmaatregelen die risico's door bronaanpak verkleinen.</li> <li>› Centrale regie &amp; wetgeving: voor transport door eenduidige regels.</li> <li>› Innovatie: real-time beslissingsondersteuning en predictive modelling ("voorspellen").</li> <li>› Internationale samenwerking: met buurlanden.</li> </ul>                                                                                                               |

### 4.4.3 Lange termijn

Nederland nadert klimaatneutraliteit. ADAPT houdt fossiele infrastructuur in stand en vervangt restfossiel door LH<sub>2</sub> en koude NH<sub>3</sub>. TRANSFORM heeft een energiemix van lokale elektrolyse, NH<sub>3</sub>, LOHC's, LSM, methanol en boorhydraten. Op lange termijn zijn er twee uitersten: in ADAPT blijft de situatie beheersbaar met conventionele middelen en incrementele verbetering met de focus op beheersen van incidenten in een beperkt veranderd systeem. In TRANSFORM is het energiesysteem radicaal anders met significant grotere volumes en meer transportbewegingen, waarin ook de veiligheidscultuur, -kennis en -technologie zijn meegegroeid. In dit scenario wordt gestreefd naar rampenvrije operaties door hoogwaardige preventie, tegelijkertijd een ultrasnelle detectie en met hightech gecoördineerde respons.

**Tabel 4.5:** Uitgangspunten voor risico-ontwikkeling op lange termijn.

| Lange termijn                           | ADAPT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | TRANSFORM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gevaren en effecten                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Een klein deel fossiele brandstof blijft in gebruik. Waterstofdragers worden ingezet in niche-markten.</li> <li>› NH<sub>3</sub>, LOHC en LH<sub>2</sub> beperkt geïmplementeerd. Gevaarlijke transporten afgenomen door (lokale) elektrificatie.</li> <li>› Incident-scenario's blijven ernstig, maar kans is zeer klein.</li> <li>› Decentrale productie en minder transport van grotere hoeveelheden.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Waterstofdragers zijn ruggengraat van het energiesysteem.</li> <li>› Nieuwe risico-dynamiek, zoals systemische risico's (complexe systemen), sabotage, cascade-effecten en cyberrisico's.</li> <li>› Door voorzorgen zijn rampen zeldzaam, maar kunnen door grotere volumes en meer transportbewegingen niet worden uitgesloten.</li> </ul>                                                                                           |
| Uitgangspunten voor incidentbestrijding | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Bestending van kennis d.m.v. geïntegreerde kennisbank. specialisten voor verdieping.</li> <li>› Bij calamiteiten blijft effectbeperking centraal.</li> <li>› Bedrijven en burgers zijn zelfredzamer.</li> <li>› Incidentbestrijding is onderdeel van integrale veiligheid.</li> <li>› Aandacht voor milieu-impact en vervolgschade bij elk incident.</li> </ul>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Hi-tech respons, inclusief drones en sensornetwerken met real-time gegevens voor alle hulpdiensten.</li> <li>› Incidentbestrijding door meerdere hulpdiensten gecoördineerd.</li> <li>› Brandweerteams werken 'human-centric' samen met geavanceerde autonome systemen, zoals robots.</li> <li>› Adaptive response planning, kennishubs en AI ondersteunen bevelvoerders, b.v. met suggesties o.b.v. duizenden simulaties.</li> </ul> |
| Handelings-perspectief                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Beperkte groei en beperkt meer middelen, met focus op beheer: onderhouden van wat werkt (Basisnet, Seveso-toezicht, praktijkoefeningen).</li> <li>› Periodieke update van incident-scenario's.</li> <li>› Internationale standaarden en convenanten, rekening houdend met buurlanden die mogelijk verder zijn in transitie.</li> </ul>                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Maximale preventie in ontwerp, technologie en toezicht, streven naar nul ongevallen.</li> <li>› Veerkracht in de hele keten om optimaal robuust te zijn, b.v. redundantie, effectieve inzet en herstel.</li> <li>› Kennis en innovatie ter verhoging en borging van veiligheid.</li> <li>› Open communicatie, vertrouwen van publiek door openheid over risico's en aanpak.</li> </ul>                                                |

## 5 Toekomstverkenning

De marktverkenning en risico-ontwikkeling in de voorgaande hoofdstukken laten zien dat er nog onzekerheden zijn omtrent technologische, beleidsmatige en maatschappelijke ontwikkelingen op het gebied van waterstof en waterstofdragers. Het feit dat de hoeveelheden waterstof toe zullen nemen in combinatie met de risico's die aan de verschillende waterstofdragers verbonden zijn, onderstreept echter het belang om vroegtijdig meer duidelijkheid te krijgen over wat nodig is om toekomstige incidenten met waterstofdragers te beperken. In dit hoofdstuk wordt daarom de volgende onderzoeksvraag beantwoord:

**Onderzoeksvraag 2: Op welke wijze kan inzicht worden verkregen in de ontwikkeling van (toekomstige) risico's met waterstof(dragers) gerelateerd aan de (voorgenomen) uitrol van nieuwe energiedragers?**

Het doel is om inzicht te verkrijgen in mogelijke toekomstige incidenten met waterstofdragers waarin de reguliere incidentbestrijding mogelijk tekortschiet, maar waarbij de risico's met de juiste voorbereiding hanteerbaar blijven.

### 5.1 Scenariodenken als methodiek voor toekomstverkenning

Toekomstverkenning is een essentiële methodiek om inzicht te krijgen in toekomstige ontwikkelingen. Toekomstverkenning is echter niet één enkel instrument of methode, maar een reeks methoden die zijn ontworpen om systematisch meerdere mogelijke toekomsten te verkennen en de implicaties van verandering te begrijpen [38]. Scenariodenken vormt hierbij een krachtig instrument om systematisch verschillende toekomstbeelden te creëren en te analyseren, om zo bewustzijn te creëren van een onzekere toekomst en vervolgens hierop voor te kunnen bereiden [39]. Eerder TNO onderzoek uit 2023 heeft aangetoond dat juist deze doelen voor de nationale crisisbeheersing relevant zijn [40].

Er bestaan diverse definities van scenariodenken en ook van de methodieken die hieraan ten grondslag liggen. Cordova-Pozo & Rouwette komen tot de volgende zes kernaspecten die onderdeel zouden moeten uitmaken van de definitie van een scenario [39]. Een scenario:

1. is gericht op de toekomst;
2. gaat over een externe context of contexten;
3. is beschreven in een verhaalvorm;
4. is aannemelijk;
5. is onderdeel van een systematische set van scenario's;
6. is een betekenisvol alternatief ten opzichte van andere scenario's.

Vertaald naar dit onderzoek betekent dit dat een scenario een narratief is dat zich afspeelt in een toekomst waarin de hoeveelheid van waterstof en waterstofdragers toeneemt. Het gaat over een externe context die invloed heeft op een onderwerp, wat in dit onderzoek zoveel betekent als de invloed van de stand van technologie voor verschillende waterstofdragers op incidenten met waterstofdragers. Het is beschreven in een verhaalvorm: een narratief over een incident met een bepaalde waterstofdrager. Een scenario wordt getoetst langs de mate van aannemelijkheid: hoe plausibel of voorstelbaar is het scenario en zijn er voldoende

aanwijzingen in de markt, rondom beleid, of op technologisch gebied dat een incidentscenario met een bepaalde waterstofdrager in de toekomst ook daadwerkelijk plaats zou kunnen vinden? Een scenario is ook in principe onderdeel van een set scenario's, dat systematisch tot stand is gekomen, zodat meerdere toekomsten met elkaar vergeleken kunnen worden. In dit onderzoek is dit een set van scenario's met verschillende waterstofdragers in verschillende toekomstsituaties. Als laatste punt moet een scenario een betekenisvol alternatief zijn ten opzichte van andere scenario's binnen de set. In dit onderzoek moeten de verschillende onzekerheden op het gebied van waterstof en waterstofdragers in elk scenario op een andere manier tot uitdrukking komen.

Hoewel er in de literatuur geen eenduidigheid bestaat over de exacte definitie [41], is scenariodenken breed geaccepteerd als een manier om systematisch verschillende toekomstbeelden te creëren en om vervolgens te analyseren hoe men zich er het beste op kan voorbereiden. Hiervoor zijn een aantal stappen nodig:

- › Het bepalen van de relevante scenarioparameters en bijhorende variabelen;
- › Het genereren van scenario's;
- › Het analyseren van scenario's.

## 5.1.1 Bepalen van scenarioparameters en variabelen

Voor het ontwikkelen van scenario's is het cruciaal om te bepalen welke parameters relevant zijn voor het genereren van plausibele scenario's. Met een team van TNO-experts en op basis van de marktverkenning en risico-ontwikkeling werd in dit onderzoek gekeken welke parameters relevant zijn bij incidentscenario's met waterstofdragers. De TNO-experts zijn afkomstig uit verschillende domeinen zoals energiestudies, waterstoftechnologie, veiligheid en scenariodenken. De marktverkenning en risico-ontwikkeling uit de eerdere hoofdstukken werd gebruikt om te bepalen bij welke parameters (technologische) ontwikkelingen nog in beweging zijn waardoor onzekerheden bestaan. Juist parameters met een hoge onzekerheid vormen kritische parameters voor de scenario's. Bij het verzamelen van parameters lag de focus op parameters die relevant zijn om scenario's te beschrijven die zich op (middel)lange termijn (zoals aangegeven in paragraaf 4.4) kunnen voordoen. Parameters zoals bijvoorbeeld "meteo-informatie", die in een live-situatie of bij het realistisch oefenen belangrijk zijn, zijn daarom niet meegenomen. De volgende parameters zijn geïdentificeerd, waarbij onderscheid is gemaakt in "incidentparameters" (die beschrijven wat, waar, met welke stof gebeurt) en "impactparameters" (die beschrijven wat de impact is van het incident):

### Incidentparameters:

1. **Waterstofdragers:** verschillende waterstofdragers hebben verschillende effecten en risico's (zoals beschreven in paragraaf 4.3) en vereisen verschillende incidentbestrijdingsstrategieën.
2. **Handelingen:** de handelingen die uitgevoerd worden met de verschillende waterstofdragers (transport, opslag, overslag/verlading, bewerking (conversie)) brengen elk bepaalde risico's met zich mee, en technologische innovaties op dit gebied zijn volop in ontwikkeling waardoor nieuwe mogelijkheden, maar ook risico's, ontstaan.
3. **Omgevingsfactoren/geografische locatie:** de locatie van incidenten, zoals stedelijk gebied, landelijk gebied of industriële zones beïnvloedt de impact op de omgeving en de beschikbaarheid van bestrijdingsmiddelen.
4. **Incidenttypen:** Verschillende typen incidenten, zoals brand, explosie of toxische wolk, vereisen verschillende bestrijdingsstrategieën en hebben verschillende impact op de omgeving of mensen in de omgeving.

Impactparameters:

5. **Impact op de mens:** Verschillende incidenten veroorzaken verschillende gezondheidsrisico's bij de mens, zowel op de menselijke bevolking nabij het incident, alsook hulpverleners.
6. **Impact op het milieu:** Verschillende incidenten hebben verschillende effecten op het milieu, zoals lucht-, water- of bodemvervuiling, wat belangrijk is voor de planning van herstelmaatregelen.

Voor elk van de geïdentificeerde parameters werden vervolgens plausibele variabelen gedefinieerd die voor de opbouw van specifieke scenario's nodig zijn (zie Tabel 5.1):

**Tabel 5.1:** Overzicht met geïdentificeerde parameters en plausibele variabelen per parameter.

| Parameter                 | Variabelen – 1 <sup>e</sup> orde | Variabelen 2 <sup>e</sup> orde                      |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Incidentparameters</b> |                                  |                                                     |
| Waterstofdragers          | Vloeibare waterstof              |                                                     |
|                           | Warme ammoniak                   |                                                     |
|                           | Koude ammoniak                   |                                                     |
|                           | LOHC Tol/MCH                     |                                                     |
|                           | LOHC DBT/pDBT                    |                                                     |
|                           | Liquid synthetic methane         |                                                     |
|                           | Methanol                         |                                                     |
|                           | Natriumboorhydride               |                                                     |
| Handelingen               | Transport                        | Truck                                               |
|                           |                                  | Trein                                               |
|                           |                                  | Binnenvaartschip                                    |
|                           |                                  | Transmissiepijpleiding (tot 60 bar)                 |
|                           |                                  | Regionale pijpleiding (tot 16 bar)                  |
|                           |                                  | Zeeschip                                            |
|                           | Overslag/verlading               | Tussen transportmiddel en een ander transportmiddel |
|                           |                                  | Tussen transportmiddel en opslag                    |
|                           |                                  | Tussen transportmiddel en conversie installatie     |
|                           | Opslag                           | Zoutcaverne (ondergronds)                           |
|                           |                                  | Terminal (havens, industrie)                        |
|                           |                                  | Tank (tankstations)                                 |
|                           |                                  | Tank (in voertuigen)                                |
|                           |                                  | Loods                                               |
|                           | Conversie/bewerking              | Verdamper vloeibaar waterstof                       |
|                           |                                  | Ammoniakkraaker                                     |
|                           |                                  | Dehydrogenatie LOHC                                 |
|                           |                                  | Hydrolyse Natriumboorhydride                        |
|                           |                                  | MTO proces                                          |
|                           |                                  | Reforming                                           |

| Parameter                                  | Variabelen – 1 <sup>e</sup> orde              | Variabelen 2 <sup>e</sup> orde |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Incidentparameters</b>                  |                                               |                                |
| Omgevingsfactoren/<br>geografische locatie | Industriecluster                              |                                |
|                                            | Bedrijventerrein                              |                                |
|                                            | Havengebied                                   |                                |
|                                            | Gebouwde omgeving                             |                                |
|                                            | Landelijk gebied                              |                                |
|                                            | Rivier/delta                                  |                                |
|                                            | Bouwterrein                                   |                                |
|                                            | Festivalterrein                               |                                |
|                                            | Corridor                                      |                                |
| Type incident                              | Toxische wolk                                 |                                |
|                                            | Brand                                         |                                |
|                                            | Explosie                                      |                                |
|                                            | Lekkage naar oppervlaktewater                 |                                |
|                                            | Lekkage naar grondwater                       |                                |
|                                            | Lekkage naar bodem                            |                                |
| <b>Impactparameters</b>                    |                                               |                                |
| Impact op de mens                          | Letsel, eenvoudig                             |                                |
|                                            | Ernstig gewonden, chronisch zieken            |                                |
|                                            | Doden                                         |                                |
| Impact op het milieu                       | Lichte/lokale verontreiniging                 |                                |
|                                            | Middelsterke/regionale verontreiniging        |                                |
|                                            | Sterke verontreiniging/over landsgrenzen heen |                                |

## 5.1.2 Genereren van scenario's

Zoals eerder vastgesteld, worden scenario's in verhaalvorm beschreven en maken daardoor complexe en abstracte toekomstbeelden begrijpelijk voor een breed publiek.

Door gebeurtenissen, ontwikkelingen en gevolgen te verpakken in een narratief, kunnen lezers zich beter inleven in de situatie en de samenhang tussen verschillende factoren doorzien. Dit vergroot de toegankelijkheid, ook voor stakeholders zonder specifieke achtergrond [39]. Een scenario bestaat daarbij uit een combinatie van variabelen uit de eerder geïdentificeerde parametercategorieën. Om de in Tabel 5.1 genoemde veelheid van variabelen systematisch te kunnen combineren tot incidentscenario's is gebruik gemaakt van een morfologische box.

Een morfologische box is een hulpmiddel om systematisch alle mogelijke oplossingsrichtingen voor een probleem te verkennen, door het probleem op te delen in deelaspecten en per

aspect verschillende opties te combineren<sup>10</sup>. In de kern is een morfologische box een multidimensionaal raamwerk, meestal weergegeven als een tweedimensionale tabel of matrix, bedoeld om een probleem op te splitsen in zijn kerncomponenten [13]. Eén dimensie van de matrix bevat de fundamentele parameters, attributen of sleutelfactoren van het probleem, terwijl de andere dimensie alle mogelijke variaties, kenmerken of potentiële oplossingen per parameter opsomt [13]. Door deze parameters en hun variaties systematisch te combineren, faciliteert de morfologische box het genereren van een volledige set potentiële combinaties voor het gedefinieerde vraagstuk [13].

In dit onderzoek is de TNO-tool Scenario-Spark gebruikt om alle parameters en variabelen in twee morfologische matrixen weer te geven<sup>11</sup>. Tabel 5.2 geeft de incidentparameters weer. Tabel 5.3 geeft de impactparameters weer.

**Tabel 5.2:** Morfologische matrix met incidentparameters.

| Stoffen                        | Handeling | Type transport                      | Type overslag naar...                         | Type opslag                  | Type conversie                | Omgevingsfactoren | Type incident                 |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Vloeibare waterstof (LH2)      | Transport | Truck                               | Transport-Truck                               | Zoutcaverne (ondergronds)    | Verdamper vloeibaar waterstof | Industriecluster  | Toxische wolk                 |
| Warme ammoniak                 | Overslag  | Trein                               | Transport-Trein                               | Terminal (havens, industrie) | Ammoniakkraaker               | Bedrijventerrein  | Brand                         |
| Koude ammoniak                 | Opslag    | Binnenvaartschip                    | Transport-Binnenvaartschip                    | Tank (tankstations)          | Dehydrogenatie LOHC           | Havengebied       | Explosie                      |
| LOHC Tol/MCH                   | Conversie | Transmissiepijpleiding (tot 60 bar) | Transport-Transmissiepijpleiding (tot 60 bar) | Tank (in voertuigen)         | Hydrolyse NaBH4               | Gebouwde omgeving | Lekkage naar oppervlaktewater |
| LOHC DBT/pDBT                  |           | Regionale pijpleiding (tot 16 bar)  | Transport-Regionale pijpleiding (tot 16 bar)  | Loods                        | MTO proces                    | Landelijk gebied  | Lekkage naar grondwater       |
| Liquid synthetic methane (LSM) |           | Zeeschip                            | Opslag-Zoutcaverne (ondergronds)              | Reforming                    |                               | Rivier/delta      | Lekkage naar bodem            |
| Methanol                       |           |                                     |                                               |                              |                               | Bouwterrein       |                               |
| Boorhydrides (NaBH4)           |           |                                     |                                               |                              |                               | Festivalterrein   |                               |
|                                |           |                                     |                                               |                              |                               | Corridor          |                               |
|                                |           |                                     |                                               |                              |                               |                   |                               |
|                                |           |                                     |                                               |                              |                               |                   |                               |
|                                |           |                                     | Opslag-Terminal (havens, industrie)           |                              |                               |                   |                               |
|                                |           |                                     | Opslag-Tank (tankstations)                    |                              |                               |                   |                               |
|                                |           |                                     | Opslag-Tank (in voertuigen)                   |                              |                               |                   |                               |
|                                |           |                                     | Conversie-apparaat                            |                              |                               |                   |                               |

**Tabel 5.3:** Morfologische matrix met impactparameters.

| Impact Mens                        | Impact Milieu                                 |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Letsel, eenvoudig                  | Lichte/lokale verontreiniging                 |
| Ernstig gewonden, chronisch zieken | Middelsterke/regionale verontreiniging        |
| Doden                              | Sterke verontreiniging/over landsgrenzen heen |

<sup>10</sup> De morfologische box wordt toegeschreven aan Dr. Fritz Zwicky (1898-1974), een vooraanstaand Zwitsers astrofysicus en luchtvaartwetenschapper die het grootste deel van zijn carrière aan het California Institute of Technology (Caltech) doorbracht [13]. Zwicky's belangrijkste motivatie was het aanpakken van problemen met meerdere onderling samenhangende dimensies, die niet eenvoudig te kwantificeren of op te lossen waren met conventionele causale modellen of simulaties [14]. Hij zocht een methode om het volledige oplossingsruimte van zulke complexe vraagstukken systematisch te verkennen.

<sup>11</sup> Een toelichting op het tool Scenario-Spark is online te vinden onder <https://youtu.be/-jmsidX8yLM>.

De tool combineert variabelen en sluit onrealistische combinaties uit op basis van informatie die door de TNO-experts in de tool is ingevoerd. AI-technologie ondersteunt vervolgens bij het beschrijven van scenario's in verhaalvorm, waardoor de scenario's niet alleen technisch, maar ook narratief inzichtelijk worden.

De automatisch gegenereerde scenario's worden vervolgens door experts (in dit geval door TNO waterstofexperts en experts uit de veiligheidsregio's) gevalideerd op plausibiliteit en relevantie. In dit onderzoek zijn de criteria plausibiliteit en relevantie als volgt gedefinieerd:

- › Plausibiliteit (voorstelbaar): het scenario sluit aan bij verwachte technologische en maatschappelijke ontwikkelingen op gebied van waterstof en waterstofdragers.
- › Relevantie:
  - Het scenario is vernieuwend en biedt nieuwe inzichten of uitdagingen voor de veiligheidsregio's die nog niet eerder zijn verkend in bestaande protocollen of kennisdomeinen.
  - Het scenario valt binnen de context van incidentbestrijding voor de reguliere brandweezorg in Nederland.

### 5.1.3 Analyseren van scenario's

Het analyseren van scenario's is een cruciale stap in de toekomstverkenning, omdat het inzicht biedt in mogelijke risico's, lacunes en handelingsperspectieven. Door systematisch gegenereerde incidentscenario's met waterstofdragers te toetsen en te evalueren, wordt het mogelijk om te anticiperen op uiteenlopende toekomstige situaties waarin de reguliere incidentbestrijding mogelijk tekortschiet. Dit proces gebeurt veelal in samenwerking met een multidisciplinair team van experts en draagt bij aan het ontwikkelen van robuuste strategieën die rekening houden met huidige onzekerheden. Voor dit onderzoek zijn de scenario's met TNO waterstofexperts en experts uit de veiligheidsregio's besproken. De experts uit de veiligheidsregio's zijn geselecteerd in afstemming met de TaskForce Veilige Energie Transitie (TaskForce VET).

## 5.2 Toepassing scenariodenken

Deze paragraaf beschrijft hoe de methodiek uit paragraaf 5.1 in dit onderzoek verder is toegepast.

### 5.2.1 Genereren van scenario's - Longlist

Zoals in paragraaf 5.1.2 beschreven, zijn met behulp van de morfologische box diverse combinaties van variabelen gegenereerd, wat heeft geleid tot een longlist van potentiële scenario's. Deze scenario's beslaan een breed spectrum aan incidenttypen en omstandigheden, variërend van kleinschalige lekkages tot grootschalige explosies in stedelijke gebieden. Alle scenario's op de longlijst zijn door TNO-waterstofexperts gevalideerd waarbij twee validatiecriteria gehanteerd zijn: plausibiliteit en relevantie, en dan specifiek het aspect "vernieuwend". Voor de validatie of een scenario ook binnen de context van incidentbestrijding voor de reguliere brandweezorg in Nederland valt, zijn in de volgende stap experts uit de veiligheidsregio's bevestigd (zie paragraaf 5.2.2).

De longlist is bedoeld als input voor verdere selectie en verdieping, waarbij zowel de inhoudelijke relevantie als de leerwaarde van de scenario's centraal staan. De titels van de scenario's in de longlist staan hieronder opgesomd; de volledige longlist van scenario's is te vinden in Bijlage A.

1. Toxische ammoniakwolk bij falen van een decentrale ammoniakkraker.
2. Toxische ammoniakwolk met milieuverontreiniging bij overslag in havengebied.
3. Brand en grootschalige lekkage van vloeibaar waterstof in havengebied.
4. Explosie en brand bij opslag van vloeibare waterstof bij tankstation grenzend aan woonomgeving.
5. Explosie en brand bij overslag van LSM op industriecluster.
6. Explosie en brand bij opslag van natriumboorhydride op bedrijventerrein.
7. Toxische wolk bij instantaan falen van een tankwagen met gekoelde ammoniak nabij een woonomgeving.
8. Lekkage van LOHC (DBT/pDBT) op de Rijn, vlak over de grens in Duitsland.

In Tabel 5.4 en Tabel 5.5 is te zien welke incident- en impactparameters uit de twee morfologische matrixen uit paragraaf 5.1.2 gebruikt zijn om de acht incidentscenario's te genereren. De kleuren in de tabel geven aan hoe vaak een variabele gebruikt is in de longlijst met scenario's:

- ▮ Variabelen in grijze vakken zijn 0 x gebruikt.
- ▮ Variabelen in oranje vakken zijn in 1 scenario gebruikt.
- ▮ Variabelen in gele vakken zijn in 2 scenario's gebruikt.
- ▮ Variabelen in rode vakken zijn in 3 scenario's gebruikt.

Met behulp van deze kleurcodes kan eenvoudig aangetoond worden welke variabelen in de opgestelde scenario's gebruikt worden, maar ook welke variabelen nog niet gebruikt worden. Dit kan helpen om de aandacht op variabelen te leggen die nog onvoldoende verkend zijn. In dit onderzoek zijn de incidentscenario's in de longlist vooral gekozen uit de vakken die eerder in Tabel 4.1 geel gemarkeerd zijn en aantonen waar technologie nog in ontwikkeling is, kleinschalig toegepast wordt, of wettelijk (nog) niet toegestaan of verboden is. Daardoor zijn geen scenario's opgesteld met variabelen, zoals bijvoorbeeld warme ammoniak of methanol waarvoor veel technologie al bewezen is en bestaande kennis en handelingsperspectieven beschikbaar zijn. Andere variabelen in de tabel, zoals een festivalterrein als omgevingsfactor, zijn niet verder uitgewerkt om het aantal scenario's behapbaar te houden. Deze variabelen bieden voor de veiligheidsregio's aanknopingspunten om in vervolg op dit onderzoek zelfstandig scenario's te genereren en te analyseren.

**Tabel 5.4:** Morfologische matrix met incidentparameters (na genereren van scenario's voor longlijst).

| Stoffen                        | Handeling | Type transport                      | Type overslag naar...                         | Type opslag                  | Type conversie                | Omgevingsfactoren | Type incident                 |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| Vloeibare waterstof (LH2)      | Transport | Truck                               | Transport-Truck                               | Zoutcaverne (ondergronds)    | Verdamper vloeibaar waterstof | Industriecluster  | Toxische wolk                 |
| Warme ammoniak                 | Overslag  | Trein                               | Transport-Trein                               | Terminal (havens, industrie) | Ammoniakkraker                | Bedrijventerrein  | Brand                         |
| Koude ammoniak                 | Opslag    | Binnenvaartschip                    | Transport-Binnenvaartschip                    | Tank (tankstations)          | Dehydrogenatie LOHC           | Havengebied       | Explosie                      |
| LOHC Tol/MCH                   | Conversie | Transmissiepijpleiding (tot 60 bar) | Transport-Transmissiepijpleiding (tot 60 bar) | Tank (in voertuigen)         | Hydrolyse NaBH4               | Gebouwde omgeving | Lekkage naar oppervlaktewater |
| LOHC DBT/pDBT                  |           | Regionale pijpleiding (tot 16 bar)  | Transport-Regionale pijpleiding (tot 16 bar)  | Loods                        | MTO proces                    | Landelijk gebied  | Lekkage naar grondwater       |
| Liquid synthetic methane (LSM) |           | Zeeschip                            |                                               |                              | Reforming                     | Rivier/delta      | Lekkage naar bodem            |
| Methanol                       |           |                                     | Opslag-Zoutcaverne (ondergronds)              |                              |                               | Bouwtterrein      |                               |
| Boorhydrides (NaBH4)           |           |                                     | Opslag-Terminal (havens, industrie)           |                              |                               | Festivalterrein   |                               |
|                                |           |                                     | Opslag-Tank (tankstations)                    |                              |                               | Corridor          |                               |
|                                |           |                                     | Opslag-Tank (in voertuigen)                   |                              |                               |                   |                               |
|                                |           |                                     | Conversie-apparaat                            |                              |                               |                   |                               |

**Tabel 5.5:** Morfologische matrix met impactparameters (na genereren van scenario's voor longlijst).

| Impact Mens                        | Impact Milieu                                 |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Letsel, eenvoudig                  | Lichte/lokale verontreiniging                 |
| Ernstig gewonden, chronisch zieken | Middelsterke/regionale verontreiniging        |
| Doden                              | Sterke verontreiniging/over landsgrenzen heen |

Zowel uit de rode vakken in de kolom voor type incident alsook uit de rode vakken in de kolom impact mens wordt duidelijk dat de focus bij de acht incidentscenario's lag op heftige scenario's met grote impact voor de mens.

## 5.2.2 Genereren van scenario's - Shortlist

Tijdens een expertsessie met twee inhoudelijke praktijkexperts uit de veiligheidsregio's zijn op basis van de longlist drie scenario's geselecteerd voor verdere uitwerking.

Bij de selectie van scenario's voor verdere uitwerking is expliciet met de experts uit het veiligheidsdomein getoetst:

- › of een scenario binnen de context van incidentbestrijding voor de reguliere brandweezorg in Nederland valt (relevantie);
- › of de bestrijding met de huidige middelen daadwerkelijk nog niet haalbaar wordt geacht, maar wel mogelijk wordt door extra voorbereiding, middelen en capaciteiten (relevantie).

Zoals in paragraaf 5.2.1 beschreven, hebben de TNO-experts de scenario's al eerder op plausibiliteit en deels op relevantie gevalideerd.

De volgende drie scenario's zijn geselecteerd:

- › Toxische ammoniakwolk met milieuverontreiniging bij overslag in havengebied (scenario 2). Dit scenario heeft aan de ene kant een groot effectgebied met een grote kans op veel ernstig gewonden door blootstelling aan giftige ammoniakdampen en aan de andere kant ontbreekt het de reguliere brandweer aan ervaring met vergelijkbare incidenten. Een recent incident in Oklahoma in de VS (op 12 november 2025)<sup>12</sup> met een truck die 25.000 pounds (ongeveer 16m<sup>3</sup>) vloeibaar ammoniak als meststof vervoerde heeft laten zien welke diepgaande gevolgen een incident met een toxische ammoniakwolk kan hebben [42]. Het incident vond plaats in een kleine stad die niet dichtbevolkt is (12.000 inwoners op een oppervlakte van 19,7km<sup>2</sup>). Een vergelijkbaar incident in de aanzienlijk dichter bevolkte randstad van Nederland zal ernstige gevolgen hebben.
- › Explosie en brand bij opslag van vloeibare waterstof bij tankstation grenzend aan woonomgeving (scenario 4). Dit scenario is geselecteerd vanwege de grote impact op een woonomgeving en de complexiteit van het incident. De experts benadrukten dat de hoofdtaak van de brandweer in dit scenario het redden van mens en dier is, omdat het incident zich afspeelt in een dichtbevolkt gebied. De combinatie van een explosie en brand maakt het scenario zeer risicovol, terwijl de brandweer weinig ervaring heeft met vloeibare waterstof en de specifieke eigenschappen van deze stof, zoals de extreem lage temperatuur en gedrag bij lekkage.

<sup>12</sup> <https://abcnews.go.com/US/dozens-hospitalized-after-ammonia-leaks-tanker-truck-oklahoma/story?id=127501094>

- › Toxische wolk bij instantaan falen van een tankwagen met gekoelde ammoniak nabij een woonomgeving (scenario 7). Net zoals scenario 2 heeft dit scenario aan de ene kant een groot effectgebied, dichtbij een woonomgeving, met een grote kans op veel ernstig gewonden door blootstelling aan giftige ammoniak dampen, en aan de andere kant ontbreekt het de reguliere brandweer aan ervaring met vergelijkbare incidenten. Juist dit scenario zou zich in de toekomst voor kunnen doen op plekken die niet aangesloten zijn op de beoogde Delta Rijn Corridor en waar de reguliere brandweezorg voor een grootdeel uit brandweervrijwilligers bestaat die op moeten treden zonder gespecialiseerde brandweer in (haven)gebieden.

De overige vijf scenario's uit de longlist zijn om verschillende redenen niet geselecteerd. Allereerst zijn enkele scenario's afgevallen omdat ze al bekend zijn en goed beheersbaar met bestaande middelen. Zo lijkt het scenario van een toxische ammoniakwolk bij falen van een decentrale ammoniakkraker (scenario 1) sterk op incidenten met ammoniakkoelinstallaties, zoals die in schaatshallen. Veiligheidsregio's hebben hier al ervaring mee en beschikken over het benodigde handelingsperspectief en middelen. Dit scenario werd daarom als minder vernieuwend en minder urgent gezien.

Daarnaast zijn er scenario's die vooral relevant zijn voor gespecialiseerde bedrijfsbrandweren of industrieclusters, en minder voor de reguliere brandweer. Incidenten zoals een brand en grootschalige lekkage van vloeibare waterstof in een havengebied (scenario 3), of een explosie en brand bij overslag van Liquid Synthetic Methane (LSM) op een industriecluster (scenario 5), vragen vooral om preventieve maatregelen en zijn primair de verantwoordelijkheid van bedrijven. De experts gaven aan dat het handelingsperspectief voor de reguliere brandweer in deze situaties beperkt is, en dat deze scenario's weinig aanknopingspunten bieden om daadwerkelijk het verschil te maken en dat dit ook niet wenselijk is.

Aangezien het om toekomstscenario's gaat, zijn deze per definitie nog niet actueel, daarom ligt de nadruk op preventie. Het scenario van een explosie en brand bij opslag van natriumboorhydride op een bedrijventerrein (scenario 6) kent veel onzekerheid over het gedrag van de stof en het verschil met andere incidenten. Door technologische ontwikkelingen kan dit scenario in de toekomst relevanter worden, maar op dit moment is de rol van de brandweer vooral beperkt tot preventie en het voorkomen van incidenten via automatische installaties.

Tot slot zijn er scenario's die weinig handelingsperspectief bieden voor de brandweer in de acute fase, of vooral een coördinerende rol vragen. Een voorbeeld hiervan is de lekkage van LOHC (DBT/pDBT) op de Rijn, vlak over de grens in Duitsland (scenario 8). Dit scenario vraagt vooral om impactmanagement en een multidisciplinaire aanpak, waarbij de brandweer niet direct het verschil kan maken in de acute fase. De rol van de brandweer is hier vooral coördinerend en communicatief, bijvoorbeeld richting waterbedrijven, en minder gericht op acute incidentbestrijding.

Samenvattend zijn de vijf niet-geselecteerde scenario's vooral afgevallen omdat ze al bekend zijn en goed beheersbaar, vooral relevant zijn voor gespecialiseerde bedrijfsbrandweren of industrie, op dit moment nog onvoorstelbaar worden geacht, of weinig handelingsperspectief bieden voor de brandweer in de acute fase. De uiteindelijke selectie is daarmee gericht op scenario's die vernieuwend zijn, een grote impact kunnen hebben op de woonomgeving, en waar de reguliere brandweer daadwerkelijk het verschil kan maken.

## 5.2.3 Analyseren van scenario's - Workshop

De drie geselecteerde scenario's zijn vervolgens doorlopen in een workshop met vijf praktijkexperts. De workshop is ontworpen als een interactieve sessie van drie uur, waarin drie toekomstscenario's met betrekking tot incidenten met waterstof centraal staan. Het doel van de workshop is om samen met experts uit de veiligheidsregio's inzicht te krijgen in de lacunes binnen de huidige aanpak bij mogelijke toekomstige incidenten met waterstofdragers. Ook is het doel om te inventariseren wat benodigd is om deze lacunes op te vullen binnen de context van deze scenario's. De bevindingen uit de workshop zijn na afloop ter controle bij de deelnemers teruggelegd ter validatie.

### 5.2.3.1 Opzet workshop

De workshop bestond uit een plenaire introductie, drie scenarioanalyses, en een gezamenlijke reflectie en synthese. Voor elk scenario werkten de deelnemers in twee rondes:

› Ronde 1: Huidig handelingsperspectief (Wat kan je / wat mis je?)

Deelnemers bespraken in kleine groepjes hoe zij op dit moment zouden handelen bij het beschreven scenario. Daarbij werd gekeken naar het handelingsperspectief (welke maatregelen kunnen nu worden genomen) en naar wat er ontbreekt in de huidige aanpak.

› Ronde 2: Gewenst handelingsperspectief (Wat heb je extra nodig?)

Vervolgens inventariseerden de deelnemers welke aanvullende middelen, kennis, organisatorische afspraken, samenwerkingen en regels nodig zijn om beter voorbereid te zijn op dergelijke incidenten. Hierbij werd onderscheid gemaakt tussen de preparatiefase (voorafgaand aan een incident) en de repressiefase (acute bestrijding tijdens een incident).

Voor het ophalen van deze informatie zijn werkbladen gebruikt. Deze zijn te vinden in Bijlage B. In de volgende paragrafen worden de opgehaalde bevindingen per scenario beschreven. Deze bevindingen zijn na de workshop nogmaals gecheckt bij de deelnemers van de workshop.

### 5.2.3.2 Scenario 1: Toxische ammoniakwolk met milieuverontreiniging bij overslag in havengebied

#### **Toxische ammoniakwolk met milieuverontreiniging bij overslag in havengebied.**

In het kader van de energietransitie is de import van groene ammoniak sterk toegenomen. In een havengebied in Nederland vindt grootschalige overslag van koude ammoniak (vloeibaar gemaakt door te koelen tot -33°C onder atmosferische druk), van een zeeschip naar een opslagterminal, om van daaruit later verder verwerkt of getransporteerd te worden.

Bij een groot lek in de laadarm waarbij vloeibare (gekoelde) ammoniak vrijkomt, ontstaat een acuut en potentieel gevaarlijk scenario. De ammoniak stroomt uit de beschadigde arm en verspreidt zich snel over de bodem van het laadplatform, waarbij het direct in contact komt met oppervlakken die niet ontworpen zijn om zulke lage temperaturen te weerstaan. Door de verdamping van de vloeistof ontstaat een dikke (witte) dampwolk die zich laag bij de grond verspreidt, aangezien koud ammoniakgas zwaarder is dan lucht. Deze damp kan zich over een aanzienlijke afstand verplaatsen, afhankelijk van windrichting en -snelheid.

Wanneer de ammoniak in contact komt met oppervlaktewater veroorzaakt dit een snelle afkoeling van het wateroppervlak en een onmiddellijke reactie. Ammoniak lost goed op in water, waarbij het de pH verhoogt en het aquatisch leven ernstig kan verstoren of doden. Tegelijkertijd ontstaat er een verhoogd risico op blootstelling voor personeel in de omgeving, vooral via inademing van dampen of huidcontact met de vloeistof of neerslag.

### Huidig handelingsperspectief

Communicatie richting de bevolking is cruciaal, in de praktijk is de standaard om te alarmeren (NL-Alert, WAS-palen), adviseren afstand te nemen, adviseren om te schuilen, evacueren (afhankelijk van tijd-tempo), informeren en op de hoogte houden. Schuilen betekent in dit geval: binnen blijven, ramen en deuren sluiten en mechanische ventilatie uitschakelen. Bij bijvoorbeeld een LNG-incident is de standaardprocedure om de omgeving tot ruime afstand (minimaal 100 meter) te ontruimen. Dit geldt zowel voor zichtbare als niet-zichtbare wolken, omdat het effectgebied onzeker is. Het kantelpunt waarop schuilen niet meer voldoende bescherming biedt, hangt af van de omvang en duur van de dampwolk.

Bij het vrijkomen van ammoniak vinden verschillende reacties plaats: oplosreactie (ammoniak in oppervlaktewater), temperatuurreactie (koud-warm) en (mogelijk) chemische reactie (ammoniak met andere stof). Afhankelijk daarvan ontstaan zowel een ammoniak-dampwolk (risico op blootstelling) als verontreiniging van het oppervlaktewater (milieuschade). Beide processen treden gelijktijdig op.

Preventieve maatregelen zijn essentieel, zoals de snelheid van stoppen van de toevoer van ammoniak (afsluiters, ESD), en beperken van de lek grootte (uitstroming). In veel installaties zijn deze afsluiters al aanwezig, maar het succes hangt af van de (detectie)snelheid en de kwaliteit van de afsluitmogelijkheden. De gevaren van cryogene stoffen, zoals de kans op lekkage als gevolg van spanningscorrosie, vraagt om specifieke eisen aan de materiaalkeuze, want vanwege de lage temperatuur zijn 'reguliere' systemen (tot -10 °C of -20 °C) niet geschikt. De materiaalkeuze moet dus worden afgestemd op de stof en de procescondities. De effectiviteit van de preventieve voorzieningen is maatgevend voor het handelingsperspectief bij een incident.

De brandweer en andere hulpdiensten baseren hun keuzes op wat ze zien en meten: bij zichtbare damp wordt geadviseerd direct te schuilen. De witte "mist" die men soms ziet bij een LNG-lek is meestal geen LNG zelf, maar gecondenseerde waterdamp uit de lucht. Bij incidenten met LNG en ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) beschouwen hulpdiensten een zichtbare witte dampwolk als een direct alarmsignaal. Deze mist ontstaat door gecondenseerde waterdamp, veroorzaakt door het verdampende koude gas. Hoewel de mist zelf geen gas is, markeert het wel het gebied waar het gas zich in hoge concentraties ophoopt. Bij LNG wijst de mist op een explosiegevaar: het gas is kleurloos en reukloos, en kan zich onzichtbaar verder verspreiden. Ontsteking buiten de zichtbare wolk is mogelijk, waardoor hulpdiensten ruime veiligheidsmarges hanteren. Bij  $\text{NH}_3$  duidt de mist op zeer hoge, toxische concentraties. Binnen deze wolk is de ammoniakconcentratie zó hoog dat mensen zonder ademlucht direct ernstige gezondheidsklachten kunnen krijgen (zoals ademnood, hoesten, oog- en keelirritatie) en in extreme gevallen zelfs kunnen bezwijken. De zichtbare mist komt ongeveer overeen met het gebied waar de concentratie boven de levensbedreigende waarde ligt. Buiten de zichtbare  $\text{NH}_3$ -wolk is het gas vaak nog meetbaar en ruikbaar. De geur van ammoniak is al waarneembaar bij zeer lage concentraties, wat betekent dat het gas zich verder kan uitstrekken dan de zichtbare damp. Hulpdiensten houden hier rekening mee bij het bepalen van het effectgebied. Toxiciteitsinschattingen op basis van de zichtbare mist zijn mogelijk: bij  $\text{NH}_3$  is de mist een sterke indicatie van een acuut toxisch gebied.

Bij LNG is toxiciteit geen hoofdgevaar, maar de mist wijst op een brandbaar mengsel boven de onderste explosiegrens (LEL).

### **Gewenst handelingsperspectief**

Wat ontbreekt is duidelijkheid over de precieze concentratie ammoniak in de lucht. Als daar meer kennis over is, dan kunnen er op basis daarvan onderbouwde keuzes gemaakt worden. Er is dus behoefte aan snelle en betrouwbare meting van ammoniakconcentraties, idealiter via meetapparatuur bij de bron. Als de organisatie die met ammoniak werkt meetapparatuur bij de bron heeft, kan daar al data over de concentratie worden gewonnen. Zo kan beter worden bepaald tot waar de dampwolk reikt en waar mensen veilig kunnen vluchten of moeten schuilen.

Naast de bevolking in veiligheid brengen, is effectbeperking een doel van de brandweer. De deelnemers benoemden dat er kennis moet worden opgedaan over de bestrijding van incidenten met koude ammoniak. Er werd geopperd dat praktijkproeven en testen met ammoniakincidenten waardevol zouden zijn om kennis op te bouwen en veiligheidsregio's beter voor te bereiden op toekomstige incidenten. Ook werd gewezen op het belang van het delen van kennis en ervaringen tussen veiligheidsregio's en het leren van internationale voorbeelden. Tot slot is er behoefte aan onderbouwde scenario's, worst-case inschattingen van effectgebieden en concentraties, en specialistisch advies (bijvoorbeeld via een ammoniakhulpplan).

In regio's zonder bedrijfsbrandweer is de beschikbaarheid van middelen en kennis een extra aandachtspunt. Kennis over ammoniak is bij Adviseurs Gevaarlijke Stoffen (AGS'en) goed geborgd, maar het koude-effect en de specifieke risico's van cryogene stoffen zijn minder bekend bij uitvoerende diensten.

Uit de inventarisatie van benodigde aanvullingen blijkt dat de deelnemers vooral een brede mix van extra middelen en kennis noodzakelijk achten, met een duidelijke nadruk op de preparatiefase. Op technologisch vlak is er behoefte aan geavanceerde detectieapparatuur, maar ook aan middelen voor bronbestrijding en effectbeperking, zoals blusmiddelen en ventilatoren. Op het gebied van kennis geven de deelnemers aan dat er grote behoefte is aan inzicht in welke maatregelen effectief zijn tegen ammoniak, hoe effectief schuilen is, scenario-uitwerkingen en kennis van effectgebieden. Ook kennis over koude ammoniak, PGS-richtlijnen en internationale ervaringen wordt als essentieel gezien. Organisatorisch is training van personeel, kennisborging, en het oefenen van scenario's belangrijk, zowel voor de preparatie als de repressie. Samenwerking met andere organisaties (zoals RWS, waterschappen, bedrijven) en het afstemmen van meetstrategieën wordt als cruciaal benoemd.

Tot slot zijn duidelijke regels en procedures nodig, zoals het vastleggen van *Lines of Defense* (LOD's), en het borgen van verantwoordelijkheden bij gebruikers van de stof. Hierbij werd specifiek genoemd dat het zeer nuttig en wenselijk zou zijn als de bedrijven die werken met de ammoniak zelf beschikken over meetapparatuur en dat deze data tijdens een incident direct beschikbaar is voor de hulpdiensten. Opvallend is dat de meeste genoemde behoeften betrekking hebben op de voorbereiding, maar dat er ook voor de acute bestrijding specifieke technologische en organisatorische middelen worden genoemd. De inventarisatie laat zien dat vooral kennisontwikkeling en samenwerking centraal staan in de behoefte van de veiligheidsregio's om beter voorbereid te zijn op incidenten met koude ammoniak.

**Tabel 5.6:** Synthese van de benodigheden om het incidentscenario 'Toxische ammoniakwolk met milieuverontreiniging bij overslag in havengebied' te behandelen.

| Categorie              | Preparatie                                                                                                                                                               | Repressie                                                                                                                |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intelligence / kennis  | Kennis over effect van schuilen, scenario-uitwerking (effectgebieden, duur, omvang), kennis over verdamping en afdekken, trainingsmogelijkheden.                         | Specialistische kennis over blusstoffen, kennis over mogelijkheden en effectiviteit van maatregelen, scenarioherkenning. |
| Technologie / middelen | Detectie- en meetnetwerken (NH <sub>3</sub> -sensoren, drones), automatische lekkagebeveiliging, schuiminstallatie, bekendheid met bedrijven en operationele informatie. | Mobiele detectieapparatuur, stationaire meetsensoren, inzet van robotica, blusmiddelen, ventilatorrobot.                 |
| Organisatie / training | Opleiding en training personeel op grote scenario's, kennis koudkokende plassen.                                                                                         | Inzet van NH <sub>3</sub> -specialist, bedrijfskundige voor uitlezen systemen.                                           |
| Samenwerking           | Vroege afstemming met ketenpartners (RWS, waterschappen, milieudiensten), gezamenlijke monitoring (e-nose).                                                              | Betrekken van ketenpartners bij incidentafhandeling.                                                                     |
| Regels & procedures    | Actualiseren LOD's, scenarioboek Externe Veiligheid, opnemen eisen in PGS-6, bekendheid met rekenbladen en modellering.                                                  | Toegang tot live-modellering, oproepbare specialist, duidelijke afspraken over verantwoordelijkheden.                    |

### 5.2.3.3 Scenario 2: Explosie en brand bij opslag van vloeibare waterstof bij tankstation grenzend aan woonomgeving

#### Explosie en brand bij opslag van vloeibare waterstof bij tankstation grenzend aan woonomgeving.

In het kader van de energietransitie is op een multi-fuel tankstation een demo/pilot uitgevoerd met de verlading en opslag van vloeibare waterstof (LH<sub>2</sub>). Deze vloeibare vorm maakt het mogelijk om grotere hoeveelheden energie op een compacte manier op te slaan en snel te distribueren. De installatie is nieuw en ontworpen voor gebruik in stedelijk gebied, maar de technologie is complex en kent nog weinig praktijkervaring. Om veiligheidsredenen bevindt het tankstation zich aan de rand van het stedelijk gebied.

Op een gegeven moment ontstaat er brand op het tankstation, waarbij warmtestraling de opslagtank met vloeibare waterstof bereikt. Door deze warmtestraling wordt de vloeibare waterstof langzaam opgewarmd, waardoor de druk in de opslagtank oploopt. Dit verhoogt het risico op falen van de opslagtank en een mogelijke explosie.<sup>13</sup> Een explosie zou veel schade kunnen veroorzaken aan het tankstation, naastgelegen objecten en omwonenden in de nabijgelegen woonwijk.

<sup>13</sup> BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion): een fysische explosie van een drukvat dat gevuld is met een vloeistof onder druk, waarbij de vloeistof een temperatuur heeft die hoger is dan het kookpunt bij atmosferische druk. De druk in het vat voorkomt dat de vloeistof gaat koken. Wanneer het vat plotseling openscheurt (bijvoorbeeld door verhitting of mechanische schade), valt de druk weg en gaat de vloeistof direct en heftig koken, waardoor grote hoeveelheden damp ontstaan. Dit veroorzaakt een plotselinge uitzetting en een explosieve overdruk. De explosie ontstaat doordat het vat wordt verhit door een externe brand (warme BLEVE), maar kan ook door mechanische schade (koude BLEVE). Bij een BLEVE kunnen brokstukken van het vat over grote afstand worden weggeslingerd en, als de vrijgekomen damp brandbaar is, is er een kans op een grote vuurbal. Een BLEVE is zeer gevaarlijk voor hulpverleners en omstanders vanwege de drukgolf, rondvliegende delen en eventuele vuurbal.

### **Huidig handelingsperspectief**

De eerste handeling is gericht op het direct koelen van de LH2 tank en andere (kwetsbare) objecten in de omgeving en het blussen van de brand. De tijd om effectief te handelen is vaak kort, waardoor snelle besluitvorming en inzet van middelen essentieel zijn. Indien blussen niet mogelijk is, kan het effect worden beperkt door een combinatie van koeling en plaatsing van een waterscherm. Het plaatsen van vast opgestelde waterschermen is niet verplicht vanuit de huidige wetgeving.

Het gecontroleerd verminderen van de druk in de installatie, bijvoorbeeld door bediening van drukaflaat- of regelkleppen, is een andere al bestaande maatregel om escalatie te voorkomen. Hierbij werd opgemerkt dat het gebruik van onbemande inzet, zoals blusrobots of drones met warmtebeeldcamera's, wenselijk is in gebieden waar het risico op explosie groot is. Personeel wordt bij voorkeur niet ingezet in de directe nabijheid van de installatie zolang er sprake is van actieve blussing of verhoogd risico.

Het meten van explosieve gassen en het monitoren van concentraties is cruciaal voor de veiligheid van eigen personeel en omwonenden. Hiervoor worden handgedragen sensoren gebruikt, zoals LEL- en CO-meters. Sommige CO-meters kunnen reageren op waterstof, omdat waterstof in de sensor kan oxideren tot water, waarbij een signaal ontstaat dat lijkt op CO. Dit is echter geen betrouwbare methode voor het kwantitatief meten van waterstofconcentraties. Het kan hooguit de aanwezigheid van waterstof aantonen, maar geeft geen exacte waarde. In de praktijk wordt een CO-meter soms gebruikt om aan te tonen dat er waterstof aanwezig is, maar deze is niet bedoeld voor het bepalen van veilige of onveilige concentraties.

Een LEL-meter meet het percentage van de onderste explosiegrens (LEL) van brandbare gassen in de lucht. Voor waterstof is 100% LEL gelijk aan 4 vol%. Infrarood LEL-sensoren (LEL IR) werken niet voor waterstof, omdat waterstof geen koolstof bevat en dus niet IR-actief is. De brandweer hanteert 10% LEL als veilige grenswaarde voor explosiegevaar. In de praktijk wordt bij incidenten met waterstof altijd geadviseerd om een explosiegevaarmeter te gebruiken, maar deze is meestal niet geijkt op waterstof. Er zijn nog maar beperkt aantal veiligheidsregio's waarbij enkele eenheden van de brandweer (alleen de AGS of enkele Ovd's) zijn uitgerust met een explosiegevaarmeter die ook specifiek H2 kan meten. De meest gangbare explosiegevaarmeter die nu wordt gebruikt is geijkt op methaan; voor andere gassen wordt een correctiefactor toegepast. Daarmee kun je wel een veilig of onveilig gebied bepalen, maar het geeft geen nauwkeurige meting van de waterstofconcentratie. Er werd benadrukt dat een meetnetwerk, zoals dat ook bij LNG wordt gebruikt, bij voorkeur preventief door het bedrijf zelf geïnstalleerd moet zijn. Als dit niet het geval is, moeten hulpdiensten met eigen meters de situatie in beeld brengen, maar dit kost extra tijd en kan leiden tot vertraging in de respons.

### **Gewenst handelingsperspectief**

Wat in de bestrijding van dit soort incidenten wordt gemist, is vooral de mogelijkheid tot onbemande inzet in explosiegevaarlijke ("ATEX") gebieden, zoals robots voor blussing of afscherming en drones met warmtebeeldcamera's. Sommige regio's beschikken wel over robots en drones, maar die zijn niet overal in het land beschikbaar.

Er is behoefte aan meer kennis over de toepasbaarheid van wet- en regelgeving, technologie, vloeibare waterstof, effectiviteit van preventieve en repressieve maatregelen, en inzichten (zoals door middel van scenario's), inclusief overeenkomsten en verschillen tussen effecten van incidenten met LH<sub>2</sub>, brandbare wolken en LNG.

Het tijdig en betrouwbaar kunnen meten van explosieve gassen, evenals het voorkomen dat vloeibare waterstof in het riool terechtkomt en daar kan verdampen tot een explosief gasmengsel, zijn belangrijke aandachtspunten die verdere uitwerking vereisen. De brandweer beschikt momenteel nog niet over directe, specifiek op waterstof geijkte H<sub>2</sub>-meters. Voor nauwkeurige meting zijn elektrochemische H<sub>2</sub>-sensoren nodig, die waterstof direct kunnen detecteren in ppm of in volume-procent (%VOL), in tegenstelling tot conventionele explosiegevaarmeters die doorgaans op methaan zijn geijkt en slechts via correctiefactoren indicatieve waarden geven.

In de preparatiefase is er behoefte aan detectie- en afschermingsmiddelen, blusvoorzieningen, en specifieke meetapparatuur voor waterstof (zoals H<sub>2</sub>-meters en temperatuurmonitoring). Ook het beschikbaar hebben van ATEX-gecertificeerde communicatie- en blusmiddelen voor onbemande inzet (robots, drones met warmtebeeldcamera) wordt als belangrijk genoemd, met name voor de repressiefase. Organisatorisch wordt vooral de opleiding van repressief personeel genoemd en samenwerking m.b.t. toegang tot informatie (van meetnetten), het afstemmen van preventieve maatregelen tussen bedrijven en hulpdiensten, en samenwerking met kennishouders tijdens incidenten (zoals steunpunten of bedrijven). Qua samenwerking moeten bedrijven zelf een belangrijke rol krijgen in de preventieve fase, bijvoorbeeld door het nemen van maatregelen als waterschermen, brandwerende muren en monitoring.

Een specifieke kennisvraag die opkwam is: is PGS-35 van toepassing op vloeibare waterstof? Welke andere geschikte voorzieningen kunnen worden verplicht op basis van wetgeving of (PGS) richtlijnen: zijn dat generieke eisen b.v. voor 'brandbare en/of cryogene stoffen', of zijn deze specifiek voor vloeibare (diep-gekoelde, koude) waterstof? Op het vlak van regels en procedures is er veel behoefte aan duidelijkheid: zo is het onduidelijk of PGS-35 geschikt is voor vloeibare waterstof, en zijn er vragen over afstanden, preventieve voorzieningen en verantwoordelijkheden.

**Tabel 5.7:** Synthese van de benodigdheden om het incidentscenario 'Explosie en brand bij opslag van vloeibare waterstof bij tankstation grenzend aan woonomgeving' te behandelen.

| Categorie              | Preparatie                                                                                                                                                    | Repressie                                                                                                                                             |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intelligence / kennis  | Inzicht in verschillen en overeenkomsten met LNG.                                                                                                             | Kennis over gedrag LH <sub>2</sub> in incidenten.                                                                                                     |
| Technologie / middelen | (investeren in) H <sub>2</sub> -meetapparatuur, middelen voor detectie, afscherming en blussing.                                                              | Onbemande inzet (robots, drones) voor blussen, afscherming of warmtemetingen, ATEX-gecertificeerde communicatiemiddelen, losse H <sub>2</sub> -meter. |
| Organisatie / training | Opleiding repressief personeel.                                                                                                                               |                                                                                                                                                       |
| Samenwerking           | Afstemming met bedrijven over preventieve maatregelen, gezamenlijke monitoring en informatievoorziening.                                                      | Samenwerking bij incidentafhandeling en informatie-uitwisseling, toegang tot/informatieontsluiting van beschikbare meetnetwerkkarten.                 |
| Regels & procedures    | Duidelijkheid over toepasbaarheid PGS-35, eisen aan afstanden en voorzieningen, verplichtingen voor bedrijven (waterscherm, brandwerende muren, meetnetwerk). |                                                                                                                                                       |

### 5.2.3.4 Scenario 3: Toxische wolk bij instantaan falen van een tankwagen met gekoelde ammoniak nabij een woonomgeving

#### **Toxische wolk bij instantaan falen van een tankwagen met gekoelde ammoniak nabij een woonomgeving.**

Omdat de ADR-regelgeving in de toekomst mogelijk het wegtransport van gekoelde ammoniak toestaat, wordt een proef uitgevoerd met het vervoer van gekoelde (vloeibare) ammoniak in een dubbelwandige, geïsoleerde tankwagen. Tijdens een testrit treedt een technische storing op, waardoor de temperatuur van de ammoniak snel stijgt. Dit leidt tot een snelle drukopbouw in de tank, waarvoor de drukontlasting niet is ontworpen, waardoor – na verloop van tijd – de tank open scheurt en de gehele tankinhoud ineens vrijkomt. Er ontstaat een plas en een toxische wolk die zich, afhankelijk van de windrichting en -snelheid, kan verspreiden richting een nabijgelegen woonwijk met kwetsbare objecten zoals scholen, zorginstellingen en woningen.

#### **Huidig handelingsperspectief**

Dit scenario kan in twee delen worden gesplitst: de dampwolk en de plas. Voor de dampwolk is het belangrijkste om de omgeving te waarschuwen en mensen te laten schuilen of evacueren, omdat er weinig mogelijkheden zijn om het effect direct te beperken. De focus ligt op het snel informeren van de omgeving over de toxische effecten en het inschatten van het effectgebied.

Voor de plas ammoniak die achterblijft, is kennis over gedrag en de emissiesnelheid bepalend voor de verdere aanpak. Het verschil in modaliteit (weg, spoor) heeft invloed op de snelheid van de respons en de gevolgen voor de omgeving, zoals files en vertragingen. De deelnemers benadrukten dat kennis op dat gebied essentieel is, bijvoorbeeld via een ammoniakhulpplan en het delen van expertise tussen veiligheidsregio's en bedrijven. Ook werd het belang genoemd van het ontwikkelen van, of kennis nemen van, vuistregels voor het berekenen van het gedrag van koudkokende plassen ammoniak, zodat hulpdiensten beter kunnen inschatten wat ze kunnen verwachten en welke maatregelen effectief zijn.

Effectbeperkende maatregelen zijn bijv. afdekken met schuim. Het gebruik van schuim (vooral alcoholbestendig schuim zoals AR-AFFF) kan effectief zijn om de verdamping van een ammoniakplas te beperken en zo de vorming van een toxische dampwolk te verminderen.

Er is weinig praktijkervaring met schuim op ammoniakplassen. Alternatieven zoals waterscherm en fysieke afdekking (met zeil of met kaarsvetachtige substanties) zijn ook mogelijk, maar doorgaans minder effectief in het beperken van verdamping.

Voor het opruimen van de plas (salvage) is specialistische kennis en materieel nodig, wat vaak buiten de reguliere brandweer valt. Er werd geopperd dat bedrijven of private partijen kunnen worden opgeleid om deze taak op zich te nemen, of dat een specialistisch team moet worden ingericht. In de praktijk is het nu vaak onduidelijk welk bedrijf ingeschakeld moet worden voor het opruimen, en is er weinig ervaring bij bergers en andere externe partijen. Ook werd opgemerkt dat het opruimen van een koudkokende plas geen standaard taak is van de brandweer, enkel als er sprake is van gevaarstelling zal de brandweer de plas stabiliseren. Het beleggen van deze taak bij externe specialisten of bedrijven werd als mogelijke oplossing genoemd.

### **Gewenst handelingsperspectief**

Er is nog (te) weinig kennis over het gedrag, effecten en handelingsperspectief voor bestrijding van een koudkokende plas c.q. factoren voor de snelheid van verdamping en verspreiding: hoe lang blijft de plas liggen, wat zijn gezondheids- en milieueffecten, wat is het effect van de combinatie van temperatuur en hoeveelheid, wat is het gedrag onder veranderende omstandigheden, welke effectbeperkende maatregelen zijn effectief, hoe kun je zo'n plas het beste opruimen (zoals verpompen, recondensatie of afschermen)? Dat zijn echter geen standaard taken van de brandweer. Echter, zolang de plas blijft verdampen, blijft het incident relevant voor de hulpdiensten.

Een belangrijke aanvulling op de scenario's met gekoelde ammoniak en vloeibare waterstof is het kennisnemen van de verblijftijd, d.w.z. de tijd waarin de temperatuur van het medium oploopt tussen het moment van koud laden en het bereiken van de temperatuur waarbij de ontlastklep opent. Deze verblijftijd is cruciaal voor het inschatten van het risico op drukopbouw en het falen van het vat of de tank. Het correct berekenen en monitoren van deze verblijftijd is verplicht volgens relevante wet- en regelgeving (zoals ADR voor transport en PGS-richtlijnen voor opslag), en vormt een essentieel onderdeel van het handelingsperspectief bij incidenten met cryogene stoffen. De brandweer is niet direct wettelijk verplicht om de verblijftijd zelf te berekenen, maar het is essentieel dat de brandweer deze informatie kent en kan gebruiken bij incidentbestrijding. Door deze tijd te kennen, kunnen hulpdiensten beter anticiperen op het moment waarop een ontlastklep zal openen of een tank kan falen, en zo tijdig maatregelen nemen.

De inventarisatie van benodigde aanvullingen laat zien dat de nadruk sterk ligt op kennisontwikkeling en samenwerking, met daarnaast aandacht voor organisatorische en procedurele aspecten. Met name voor de preparatiefase is er grote behoefte aan diepgaande kennis over het gedrag van koudkokende plassen ammoniak. Te denken valt bijv. aan een handreiking ("witboek"), vuistregels, scenariokaarten en/of inzetprotocollen voor het bestrijden en opruimen van een plas, inzicht in de gezondheids- en milieueffecten en mogelijke maatregelen. Hoewel dergelijke kennis mogelijk al bij bepaalde partijen aanwezig is, is het van groot belang dat deze ook toegankelijk en bekend wordt bij de veiligheidsregio's, zodat zij in de praktijk adequaat kunnen handelen.

Organisatorisch zijn training, middelen, en het betrekken van externe partners essentieel, omdat het daadwerkelijke opruimen van een koudkokende plas vaak buiten de reguliere taken en mogelijkheden van de brandweer valt. Samenwerking met externe partijen (zoals bergers en bedrijven) en het maken van duidelijke afspraken over rollen en verantwoordelijkheden zijn cruciaal, zowel in de preparatie als in de repressie. Opvallend is dat de meeste benoemde behoeften betrekking hebben op kennis, expertise en samenwerking, en dat het daadwerkelijk uitvoeren van opruimwerkzaamheden bij voorkeur wordt belegd bij gespecialiseerde externe partijen.

Tot slot volgde een discussie over de effectiviteit en haalbaarheid van begeleiding en routing van transport van gevaarlijke stoffen, met name als bijv. de frequentie van wegtransport naar decentrale gebieden (zgn. cluster 6 bedrijven) toeneemt.

**Tabel 5.8:** Synthese van de benodigdheden om het incidentscenario 'Toxische wolk bij instantaan falen van een tankwagen met gekoelde ammoniak nabij een woonomgeving' te behandelen.

| Categorie              | Preparatie                                                                                                                                                                                                | Repressie                                                                                                                                                |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intelligence / kennis  | Specialistische kennis over koudkokende ammoniak, en hoe om te gaan met koudkokende plassen (gedrag op verschillende ondergronden en bij verschillende temperaturen, emissietempo), benodigde apparatuur. | Middelen om plasverdamping te beperken (schuim, afdekken), expertise oproepbaar bij incident inzet van externe partners voor opruimen, ammoniakhulpplan. |
| Technologie / middelen | -                                                                                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                        |
| Organisatie / training | Trainingsmogelijkheden om scenario's te oefenen.                                                                                                                                                          | -                                                                                                                                                        |
| Samenwerking           | Procedures en afspraken met externe partijen, voorbereiding op samenwerking met bergers en bedrijven.                                                                                                     | Samenwerking bij opruimen en effectbeperking, duidelijke taakverdeling. Opruimen beleggen bij specialistische teams.                                     |
| Regels & Procedures    | Duidelijke afspraken over transport, routing en parkeren, wetgeving niet versoepelen tot buisleidingen in gebruik zijn.                                                                                   | -                                                                                                                                                        |

## 6 Bestaande en innovatieve oplossingen

In de voorgaande hoofdstukken is duidelijk geworden dat de risico-ontwikkeling voor incidenten met waterstofdragers voor een belangrijk deel wordt bepaald door marktontwikkelingen, technologische vooruitgang en de mate van opschaling en ketencomplexiteit. Veel risico's zijn bekend uit de praktijk met stoffen als ammoniak, methanol en LSM (LNG), maar de energietransitie introduceert ook relatief nieuwe dragers zoals vloeibare waterstof en natrium-/kaliumboorhydride, waarvoor minder praktijkervaring bestaat en de handelingsperspectieven nog in ontwikkeling zijn. In dit hoofdstuk wordt de volgende onderzoeksvraag beantwoord:

**Vraag 3. Welke bestaande en innovatieve oplossingen kunnen bijdragen aan het voorbereiden van de veiligheidsregio's op incidenten met waterstofdragers?**

Dit hoofdstuk bevat de synthese van bestaande en innovatieve oplossingsrichtingen die veiligheidsregio's in staat stellen om adequaat te anticiperen op deze veranderende risico's. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen oplossingen die voortbouwen op bestaande IBGS-principes (bronbestrijding, effectgebied-bepaling, ontsmetting) en innovatieve aanvullingen die inspelen op lacunes in kennis, technologie, organisatie, samenwerking en regelgeving. De informatie is gebaseerd op een analyse van praktijkervaringen, scenario's, workshopresultaten en actuele ontwikkelingen. Hiermee biedt dit hoofdstuk een samenhangend handelingsperspectief voor zowel de voorbereiding (preparatie) als de acute bestrijding (repressie) van incidenten met waterstofdragers.

### 6.1 Uitgangspunten

De voorbereiding op toekomstige incidenten met waterstofdragers vraagt om een aantal fundamentele uitgangspunten die richting geven aan de wijze waarop veiligheidsregio's hun capaciteiten kunnen versterken. Gezamenlijk vormen de volgende uitgangspunten het fundament onder de aanbevelingen in dit rapport. Ze geven richting aan de noodzakelijke versterking van kennis, techniek, organisatie, samenwerking en regelgeving, zodat veiligheidsregio's voorbereid kunnen worden op een toekomst waarin waterstofdragers een belangrijke rol spelen en de aard van incidenten ingrijpend kan veranderen.

#### **Kennisontwikkeling**

Allereerst is voortdurende kennisontwikkeling, training en praktijkervaring noodzakelijk. Incidenten met waterstofdragers onderscheiden zich wezenlijk van veel traditionele gevaarlijke stoffen, onder andere door cryogeen gedrag, hoge toxiciteit, snelle dampvorming of explosiegevoeligheid. De onderzoeksresultaten laten zien dat veiligheidsregio's nog beperkte ervaring hebben met onder meer koudkokende ammoniakplassen, het gedrag van vloeibare waterstof en de inzet van passende effectbeperkende maatregelen. In de workshops komt dit duidelijk naar voren: experts geven aan dat handelingsperspectieven ontbreken zolang kennis over emissiesnelheden, plume-gedrag, maatregelen zoals afdekken of koelen, en scenarioherkenning niet beschikbaar of geoefend is. De analyse van drie

toekomstscenario's bevestigt dat deze kennislacune rechtstreeks leidt tot onzekerheid in besluitvorming en tot beperkingen in de acute inzet.

### **Preventie en bronaanpak.**

Naast kennisontwikkeling staat preventie en bronaanpak centraal, omdat bij meerdere waterstofdragers de directe bestrijdbaarheid in de acute fase beperkt is. Grote toxische ammoniakwolken kunnen zich snel ontwikkelen, terwijl koude ammoniak en vloeibare waterstof bovendien extreme fysische effecten veroorzaken waarmee gangbare bestrijdingsprincipes slechts beperkt effectief zijn. Het onderzoek toont dat de effectiviteit van de respons in hoge mate wordt bepaald door de kwaliteit van preventieve voorzieningen zoals snelle detectie, automatische afsluiters, cryogene-bestendige materialen en compartimentering. In de uitgewerkte scenario's blijkt dit telkens: waar preventieve barrières ontbreken of traag reageren, ontstaat een situatie waarin de brandweer primair moet inzetten op gebiedsafzetting en bevolkingsbescherming in plaats van op bronbeheersing.

### **Snelle en betrouwbare detectie**

Snelle en betrouwbare detectie vormt een derde cruciaal uitgangspunt. Het herkennen van concentraties, effectgebieden en ontwikkelingsrichting van een damp- of gaswolk is essentieel om schuiladviezen, evacuatiebesluiten en inzetstrategieën te onderbouwen. Het onderzoek laat zien dat de huidige detectiemiddelen onvoldoende specifiek of onvoldoende beschikbaar zijn om snel een accuraat situatiebeeld te vormen. Zo blijkt dat H<sub>2</sub>-meting vaak afhankelijk is van CO-meters met beperkte betrouwbaarheid, dat NH<sub>3</sub>-concentraties slechts beperkt bron-nabij worden gemonitord, en dat het ontbreken van stationaire en mobiele detectienetwerken leidt tot vertraging in effectgebiedsbepaling. Dit komt in alle drie onderzochte scenario's terug als een knelpunt dat direct van invloed is op de veiligheid van burgers en hulpverleners.

### **Samenwerking en datadeling**

Een vierde punt is dat samenwerking en datadeling noodzakelijk zijn voor een effectieve respons. Waterstofdragers worden vervoerd, opgeslagen en bewerkt in ketens die meerdere partijen omvatten, waaronder havens, terminals, transporteurs, industrie en veiligheidsregio's. Geen van deze partijen beschikt afzonderlijk over alle benodigde informatie om adequaat te handelen. De scenario-analyses tonen dat directe toegang tot bedrijfsdata, zoals druk- en temperatuurmetingen, status van afsluiters, uitstroomsnelheden en detectiesignalen, bepalend is voor de snelheid waarmee een gedeeld situatiebeeld ontstaat. De experts in de workshop benadrukten dat deze informatie in de praktijk vaak niet automatisch beschikbaar is in de meldkamer, waardoor onder tijdsdruk conservatieve en soms suboptimale beslissingen worden genomen. Het onderzoek adviseert daarom structurele afspraken over datadeling, gezamenlijke monitoring en LOD's.

### **Regelgeving en standaardisatie**

Een vijfde uitgangspunt is dat regelgeving en standaardisatie gelijke tred moeten houden met de technologische en marktontwikkelingen rondom waterstofdragers. De huidige energietransitie voltrekt zich sneller dan de actualisatie van het regelgevend kader, waardoor onduidelijkheid ontstaat over preventieve verplichtingen, ontwerpcriteria, afstanden en inzetmogelijkheden. Dit speelt in het bijzonder bij vloeibare waterstof, koude ammoniak en bepaalde LOHC-systemen, waarvoor richtlijnen nog niet volledig zijn uitgewerkt of onvoldoende aansluiten op de kenmerken van deze nieuwe dragers. Relevant hierbij zijn onder meer de PGS-richtlijnen, waaronder PGS 12 (voor ammoniak), PGS 35 (voor waterstof) en PGS 6 (aanvullende eisen voor ammoniakopslag), die in wisselende mate actualisatie behoeven. Ook de internationale transportregelgeving – ADR (weg), RID (spoor), ADN (binnenvaart) en de maritieme kaders van de IMO, waaronder de Interim Guidelines

for the Safety of Ships using Ammonia as Fuel – bepaalt in belangrijke mate de veiligheidsvoorwaarden voor het vervoer van waterstofdragers. Daarnaast spelen horizontale normen een cruciale rol, zoals de Europese ATEX-richtlijnen voor inzet van apparatuur in explosiegevaarlijke omgevingen, “Safe by Design”-principeafspraken voor het ontwerpen van installaties, en technische vereisten zoals Emergency Shut-Down (ESD)-voorzieningen en redundante detectiesystemen. Tot slot is harmonisatie noodzakelijk van uniforme eisen langs transportcorridors (ADR/ADN/IMO) en van modellen voor effect- en risicoberekeningen, om consistentie in vergunningverlening en incidentbestrijding te borgen. Uit het onderzoek blijkt dat verschillen in toepassing en actualiteit van deze regelgeving direct leiden tot onzekerheid bij veiligheidsregio’s, zowel in de preventieve sfeer als in de acute incidentbestrijding. Het versneld actualiseren, harmoniseren en verduidelijken van deze standaarden is daarom een voorwaarde om de veiligheid in de waterstofketen structureel te kunnen garanderen.

### **Innovatie**

Tot slot fungeert innovatie als katalysator om het handelingsperspectief van veiligheidsregio’s daadwerkelijk te vergroten. Traditionele maatregelen blijken vaak onvoldoende voor scenario’s waarin cryogene lekkages, snelle dampwolken of complexe keteneffecten optreden. Het onderzoek laat zien dat nieuwe technologieën — zoals onbemande inzetmiddelen in ATEX-zones, drones met FTIR-sensoren, geavanceerde H<sub>2</sub>-meters en stationaire detectienetwerken — essentieel zijn om incidenten veilig en effectief te kunnen beheersen. Daarnaast bieden AI-ondersteunde scenario-ontwikkeling, nieuwe materialen voor opvang of neutralisatie, en VR-gebaseerde trainingsprogramma’s concrete mogelijkheden om zowel het situatiebeeld als de operationele inzet te versterken. In de scenario’s is duidelijk zichtbaar dat juist deze innovaties het verschil kunnen maken tussen uitsluitend defensieve inzet en daadwerkelijk gecoördineerde bronaanpak.

## **6.2 Bestaande oplossingen**

Voor een groot deel gaat het bij bestaande oplossingen om bekende risico’s uit transport en distributie van ammoniak, methanol en LSM (LNG). De groei zit vooral in toenemende volumes, nieuwe ketens en daarmee een hogere (maar nog steeds kleine) incidentkans. Tegelijkertijd staan onderdelen van conversie, opslag en transport voor enkele relatief nieuwe dragers (zoals vloeibare waterstof en natrium-/kaliumboorhydride) nog in de kinderschoenen, waardoor risico’s en handelingsperspectieven niet altijd volledig zijn uitgekristalliseerd. Soms zijn bestaande oplossingen beschikbaar om incidenten met de relatief nieuwe waterstofdragers te bestrijden, die in sommige enkele gevallen dan wel geactualiseerd moeten worden.

De synthese van bestaande en innovatieve oplossingen is weergegeven in Tabel 6.1 en Tabel 6.2. In tegenstelling tot Tabel 5.6, Tabel 5.7 en Tabel 5.8, die concreet en scenario-specifiek zijn met praktische voorbeelden en details, zijn deze tabellen juist generiek en thematisch van aard. Ze bevatten overkoepelende categorieën en oplossingsrichtingen, geclusterd tot generieke oplossingen die toepasbaar zijn op alle incidentscenario’s. De tabellen bevatten daarnaast extra strategische en beleidsmatige elementen, zoals landelijke kennisdeling, standaardisatie en instrumentatiestrategie, die niet altijd letterlijk in de tabellen in paragraaf 5.2.3 staan, maar logisch voortvloeien uit de analyse en gericht op structurele implementatie.

**Tabel 6.1:** Synthese bestaande oplossingen.

| Categorie              | Preparatie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Repressie                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intelligence / kennis  | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Actualiseer scenario boeken en vuistregels voor bekende dragers (NH<sub>3</sub>, MeOH, LSM/LNG).</li> <li>› Werk kennisvragen voor cryogene en reactieve stoffen (LH<sub>2</sub>, boorhydriden) uit.</li> <li>› Organiseer landelijke kennisdeling en e-learning.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Real-time scenarioherkenning en specialistisch advies (AGS/LAGS).</li> <li>› Toegang tot gevalideerde effect-/risicomodellen en live-modellering bij incident.</li> </ul>                                                                          |
| Technologie / middelen | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Dubbelwandige vacuümgeïsoleerde tanks met multi-layer insulation.</li> <li>› Quick Connect Disconnect Couplers (QCDC), Emergency Shut-Down (ESD) systemen, Emergency Release Coupling (ERC).</li> <li>› Pressure Safety Valves (PSV) en Boil-Off-Gas (BOG) lijnen.</li> <li>› Bron-nabije detectie en meetnetwerken (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>-specifiek).</li> <li>› ATEX-geschikte onbemande inzet (drones, blusrobots).</li> <li>› Preventieve voorzieningen (waterschermen, compartimentering).</li> <li>› Instrumentatiestrategie voor inzet van bestaande detectiemiddelen, zoals sensoren, meetnetten en detectoren.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Mobiele detectie (H<sub>2</sub>-meters, NH<sub>3</sub>-sensoren), warmtebeeld, ventilatorrobot.</li> <li>› Middelen voor afscherming/afdekken.</li> <li>› Inzetklare protocollen voor gecontroleerd afblazen/koelen bij LH<sub>2</sub>.</li> </ul> |
| Organisatie / training | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Structurele IBGS-trainingen voor cryogeen/toxisch/hoog-energetisch</li> <li>› Interregionale oefeningen (GRIP).</li> <li>› Borging van specialistische teams en bereikbaarheid.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Oproepbare expertise en taakverdeling bij salvage (koudkokende plassen) en bronbestrijding.</li> <li>› Operationele briefing en beslissingsondersteuning.</li> </ul>                                                                               |
| Samenwerking           | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Vroege afstemming met ketenpartners (havens, RWS, waterschappen, bedrijfsbrandweren).</li> <li>› Afspraken over data-deling (bronmeetnet, LOD's) en routing.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Multidisciplinaire incidentafhandeling.</li> <li>› Toegang tot bedrijfsinformatie en meetnetkaarten.</li> <li>› Afstemming met bergers/sanering bij milieu-incidenten.</li> </ul>                                                                  |
| Regels & procedures    | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Versnelde en eenduidige richtlijnen (PGS voor LH<sub>2</sub>/LOHC's).</li> <li>› Heldere afstandseisen en verplichtingen voor detectie/ESD.</li> <li>› Uniforme eisen langs corridors (ADR/ADN/IMO).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Duidelijke operationele procedures voor alarmering, evacuatie en effectbeperking.</li> <li>› Standaard toegang tot live-modellering en verantwoordelijkheden vastgelegd.</li> </ul>                                                                |

De tabel is gebaseerd op de kernprincipes van de IBGS-aanpak: bronbestrijding, effectgebied-bepaling en ontsmetting vormen het fundament voor een systematische en herkenbare aanpak van incidenten met waterstofdragers. Deze principes zijn direct toepasbaar en bieden houvast voor veiligheidsregio's.

Daarnaast zijn communicatie en bevolkingsbescherming (zoals NL-Alert, schuilen/evacueren) ingeburgerde instrumenten, die met name bij ammoniakincidenten het meest effectieve acute handelingsperspectief vormen. Preventieve installatieveiligheid – waaronder detectie van kritieke parameters, ESD-systemen en materiaalkeuze voor cryogene condities – is bekend terrein in industrieclusters en terminals en helpt bij het beperken van lekken en escalaties.

De tabel laat ook zien waar de belangrijkste uitdagingen liggen. Zo is de meet-betrouwbaarheid van explosie- en gasmeters voor  $H_2$  en ammoniak nog niet overal geborgd, wat veilige gebiedsafbakening en inzet belemmert. Cryogene expertise en kennis over koudkokende plassen zijn nog onvoldoende vertaald naar praktische vuistregels en inzetprotocollen. Ook de taakafbakening bij salvage en de samenwerking met externe partijen vragen om verdere standaardisatie. Het ontbreken van specifieke PGS-richtlijnen voor dragers zoals  $LH_2$  en LOHC's leidt tot variabiliteit in de praktijk.

De oplossingsrichtingen in de tabel zijn gericht op het versterken van bronmeetnetten, het uniformeren van procedures en scenarioboeken, en het toepassen van preventieve ontwerpmaatregelen (Safe by Design). Door deze elementen te combineren, ontstaat een samenhangend handelingsperspectief waarmee veiligheidsregio's zich beter kunnen voorbereiden op zowel bestaande als nieuwe risico's in de energietransitie.

## 6.3 Innovatieve oplossingen

De snelheid en richting van de marktontwikkeling zijn onzeker en de keten van productie tot eindgebruik wordt langer en complexer, met meer schakels waar incidenten kunnen optreden. Hoe en wanneer deze risico's zich manifesteren hangt samen met de gekozen transitie-route: ADAPT bouwt voort op bestaande infrastructuur en kent gematigde groei, terwijl TRANSFORM uitgaat van snelle opschaling en innovatie. In beide gevallen bepalen technologiesnelheid, import- en distributieschaal en ketencomplexiteit het risicoprofiel voor de komende decennia.

De innovatieve oplossingen vormen een gerichte aanvulling op de bestaande IBGS-basis (bronbestrijding, effectgebied-bepaling, ontsmetting) en adresseren die lacunes waar de huidige aanpak nog tekortschiet. Concreet gaat het om o.a. geavanceerde detectie ( $H_2$ -specifiek, drone-sensoren), onbemande inzet in ATEX-zones (blusrobots, drones met warmtebeeld, gericht koelen/afschermen), en specifieke blus-/stabilisatiemiddelen voor cryogene en reactieve stoffen (zoals boorhydriden), inclusief stabilisatie en sanering. Deze technologische innovaties worden ondersteund door AI-geholpen scenario-ontwikkeling, kennisplatforms en oefenprogramma's (CBRN/cryogeen), en intensievere standaardisatie en samenwerking met RWS, havendiensten, GHOR, bedrijfsbrandweren en internationale partners (IMO/ADR).

Daarnaast vergt adoptie op schaal versnelde PGS-ontwikkeling voor  $LH_2$  en eventueel LOHC's en validatie van effect-/risicomodellen, zoals voor  $H_2$ -explosies en effectafstanden voor incidenten met ammoniak. De grootschalige inzet van  $LH_2$  hangt bovendien substantieel af van internationale afstemming (IMO/ADR) en uniforme eisen langs corridors. Om implementatie te borgen worden landelijke instrumentatiestrategieën (ATEX-geschikte onbemande systemen;  $H_2/NH_3$ -detectie), een 'witboek' koudkokende plassen/cryogene incidenten (vuistregels, scenariokaarten, inzetprotocollen) en brondata-deling via LOD's en standaard datastromen aanbevolen. De synthese van innovatieve oplossingen is samengevat in Tabel 6.2, gevolgd door een toelichting waarin (per categorie) is beschreven of - en in hoeverre - bepaalde oplossingen al worden ontwikkeld.

**Tabel 6.2:** Synthese innovatieve oplossingen.

| Categorie              | Preparatie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Repressie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intelligence / kennis  | <ul style="list-style-type: none"> <li>› AI-ondersteunde scenario-ontwikkeling.</li> <li>› Periodieke actualisatie van scenariokaarten en vuistregels.</li> <li>› Landelijke experts en kennisplatforms met experimenten.</li> <li>› Gevalideerde rekenmodellen (explosie, cryogeen gedrag, effectafstanden).</li> </ul>                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Live-toegang tot kennishouders en gevalideerde effect/risicomodellen.</li> <li>› Beslissingsondersteuning tijdens incident (inzet van kennishubs/AGS/LAGS).</li> </ul>                                                                                                                                           |
| Technologie / middelen | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Geavanceerde detectie: H<sub>2</sub>-specifieke meters, bron-nabije NH<sub>3</sub>-sensoren, drone-sensoren, optische vezelsystemen en FTIR voor real-time monitoring.</li> <li>› ATEX-geschikte onbemande inzet (blusrobots, warmtebeeld-drones).</li> <li>› Instrumentatiestrategie voor de combinatie van bestaande met innovatie oplossingen, zoals bestaande meet- en detectiemiddelen met data van drones, blusrobots en/of FTIR-apparatuur.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Onbemande inzet voor gericht koelen/afschermen in ATEX-zones.</li> <li>› Stabilisatie van cryogene en/of reactieve stoffen (zoals boorhydriden).</li> <li>› Vaste absorptiematerialen, zoals zirconiumfosfaat voor ammoniak.</li> <li>› Resilience-gebaseerd ontwerpen met Dynamic Bayesian Networks.</li> </ul> |
| Organisatie / training | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Specifieke CBRN/cryogene trainingslijnen voor IBGS-teams.</li> <li>› Interregionale oefeningen met innovatieve middelen.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Oproepbare specialistische teams voor cryogene/reactieve inzet en salvage.</li> <li>› Operationele oefeningen met robots/drones.</li> </ul>                                                                                                                                                                      |
| Samenwerking           | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Intensiveren van afspraken met RWS, havens, GHOR, bedrijfsbrandweren.</li> <li>› Standaardisatie en datadeling (LOD's, bronmeetnet).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Multidisciplinaire incidentafhandeling met toegang tot bedrijfsinformatie en meetnetkaarten.</li> <li>› Gecoördineerde inzet van onbemande systemen.</li> </ul>                                                                                                                                                  |
| Regels & procedures    | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Versnelde PGS-ontwikkeling voor LH<sub>2</sub> en LOHC's.</li> <li>› Validatie van effect/risicomodellen.</li> <li>› Uniforme eisen langs corridors (ADR/ADN/IMO).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>› Duidelijke operationele SOP's voor ATEX-onbemande inzet, alarmering, evacuatie en effectbeperking.</li> <li>› Standaard toegang tot live-modellering.</li> </ul>                                                                                                                                                 |

Diverse van de in bovenstaande tabel weergegeven punten zijn hieronder nader toegelicht.

### Intelligence/kennis

- › AI-ondersteunde scenario-planning wordt reeds actief verkend. In het Innovatieverkenning-programma Crisisbeheersing ontwikkelt TNO een scenariogenerator die met behulp van AI/LLM alternatieve incidentscenario's kan opstellen [40] [43]. Dergelijke tools helpen veiligheidsregio's om systematisch toekomstscenario's te ontwikkelen en kennis van nieuwe risico's paraat te hebben.
- › Scenariokaarten en vuistregels worden up-to-date gehouden door het NIPV. In 2024 is het Scenarioboek Energietransitie uitgebreid met 12 nieuwe scenario's, zodat adviseurs beschikken over actuele handelingsperspectieven [44].
- › Daarnaast groeit het belang van kennisplatforms en "Communities of Practice". Via Europese initiatieven zoals HyResponder (een "train-the-trainer"-programma voor waterstofveiligheid) is (Nederlandstalig) lesmateriaal ontwikkeld. Door nationale en internationale experts structureel bijeen te brengen worden best practices gedeeld en waar nodig experimenteel getoetst [45].

- › Ook aan modelvalidatie wordt gewerkt: in Engeland heeft HSE UK grootschalige proeven gedaan met waterstoflekkages bij tankstations, om explosierisico's beter te begrijpen en veiligheidsafstanden te kunnen verfijnen [46].

### **Technologie/middelen**

- › In het project HyNose (2024–2025) wordt een landelijk Early Warning-netwerk uitgerold dat elektronische neuzen koppelt tot een fijnmazig sensor netwerk. Die e-noses detecteren niet alleen waterstofgas, maar ook waterstofdragers als ammoniak, toluen en methylcyclohexaan. Door live meetdata te delen tussen bedrijven, veiligheidsregio's en omgevingsdiensten kan een lek sneller gelokaliseerd en gemeld worden. Ook wordt geëxperimenteerd met dronesensoren en FTIR-spectrometers, zoals vliegende "snuffelaars" die boven een incident hangen en real-time de samenstelling van een rook- of dampwolk analyseren [47].
- › Ook technologie voor onbemande inzet is in ontwikkeling. Zo beschikken o.a. Veiligheidsregio Rotterdam-Rijnmond en Brandweer Limburg-Noord over blusrobots die op afstand brandhaarden kunnen verkennen, blussen en/of koelen. De robot van de Specialistische Brandbestrijdingseenheid van Brandweer Limburg-Noord werd bijvoorbeeld succesvol ingezet bij een uitslaande industriebbrand in Horst in mei 2025 [48]. Het feit dat enkele regio's reeds over dergelijke middelen beschikken, betekent echter niet dat deze voorzieningen in het licht van toekomstige incidenttypen en de specifieke risico's van waterstofdragers al toereikend zijn. De huidige inzetcapaciteit en technische mogelijkheden van bestaande robots sluiten beperkt aan op scenario's waarin cryogene stoffen, explosiegevaar of toxische wolken een rol spelen.
- › Op gebied van geavanceerde detectie en instrumentatiestrategie wordt door verschillende partijen, waaronder enkele Veiligheidsregio's, gewerkt aan het ophalen en integreren van verschillende soorten data (zoals van e-noses, meteo, dronebeelden) naar een centraal punt (platform of meldkamer), met als doel om een compleet situatiebeeld ("situation awareness") te verkrijgen [49].
- › Voor buisleidingen wordt geavanceerde lekdetectie met optische vezelsystemen genoemd met real-time monitoring met AI voor 'vals-positieven' om temperatuurveranderingen in de bodem langs de leiding continu te meten, waarbij AI helpt om echte lekkages te onderscheiden van valse alarmen [50].
- › Met name door private partijen wordt gekeken naar speciale blus- en stabilisatiemiddelen voor nieuwe stoffen. Voor cryogene lekken (zoals van koude ammoniak) bestaan nog geen pasklare oplossingen. ARISE (Ammonia Response In Sea Emergencies) is een internationaal samenwerkingsproject met als doel de veiligheid en gevolgen van grote ammoniaklekkages in mariene omgevingen grondig te onderzoeken. ARISE zich op kennisontwikkeling over ammoniakgedrag bij (grote) lekkages op zee, het verbeteren van consequentiemodellen, uitvoeren van gecontroleerde lozingen en ontwikkelen van detectie- en mitigatietechnologieën en ontwikkeling van praktische richtlijnen en innovatieve oplossingen voor incidentbestrijding [51].
- › Natriumboorhydride is een vaste, sterk reactieve waterstofdrager die zich nog in een vroege ontwikkelfase bevindt. Er bestaan nog veel onzekerheden over het gedrag in grotere volumes, zoals bij bulktransport. De combinatie van hoge reactiviteit en beperkte praktijkkennis maakt dat incidentbestrijding alleen onder strikte voorwaarden en door gespecialiseerd personeel kan plaatsvinden. Vooralsnog is het handelingsperspectief voor de reguliere brandweer zeer beperkt, wat bestaat uit het afzetten van het incidentgebied, veilige afstand houden en zorgen voor ventilatie om ophoping van waterstof te voorkomen. Alleen gespecialiseerde IBGS-teams kunnen verdere inschattingen maken over reactiviteit en escalatiekansen, en beschikken over de expertise om droge blusmiddelen of inert gemaakte omgevingen veilig toe te passen. In enkele specifieke

situaties kan stabilisatie met natronloog (NaOH-oplossing) de hydrolysesnelheid remmen, maar ook dit vergt specialistische interventie en valt buiten het vermogen van reguliere eenheden.

### Organisatie/training

- › In 2022 werd het HyResponder-project afgerond, waarbij brandweertrainers uit o.a. Nederland, België en Duitsland getraind zijn in waterstofincidenten. Het resultaat is een complete syllabus (theorie, VR-oefeningen en praktijkscenario's) voor incidenten met waterstofvoertuigen en -opslag, opgesplitst naar functie (manschap, bevelvoerder, officier, specialist). Deze is inmiddels in het Nederlands beschikbaar, zodat brandweerscholen het kunnen inbedden in hun opleidingen [52].
- › In eigen land heeft NIPV eind 2024 een kennisbundel "Transport van waterstofdragers" gepubliceerd met alle actuele info voor repressie-eenheden (eigenschappen van LH<sub>2</sub>, ammoniak, LOHC, enz., plus scenario's en tactiek). Dit gaat gepaard met een toolbox lesmateriaal – denk aan aandachtsskaarten, e-learningmodules en zelfs een online e-lab waar men parameters (bv. fakkellengtes, explosie-effecten) kan variëren [53].
- › Ook wordt geëxperimenteerd met robots en drones in oefenscenario's. In Limburg-Noord liet men de blusrobot "meelopen" in een grote oefening, zodat ook de meldkamer en leiding hier ervaring mee opdeden [54].
- › Naast het bovenstaande bestaat er een duidelijke behoefte aan training en kennisontwikkeling van specialisten voor de inzet van IBGS-teams, zoals voor incidenten met vloeibare waterstof en koude ammoniak. Het is belangrijk dat de mogelijkheden om grootschalige incidenten te kunnen beoefenen zo realistisch mogelijk zijn. Virtual Reality (VR) kan daarbij uitkomst bieden om brandpersoneel goed en realistisch te kunnen trainen.

### Samenwerking

- › Buiten oefenverband wordt samenwerking steeds meer geïntensiveerd. Zo maken Veiligheidsregio's o.a. afspraken met Rijkswaterstaat over rolverdeling bij calamiteiten op rivieren en met bedrijfsbrandweren van grote sites, zoals Chemelot of Seveso-inrichtingen, die vaak specifieke expertise in huis hebben.
- › Standaardisatie is een ander speerpunt: samen met het Rijk en normalisatie-instituten zorgen veiligheidsregio's dat regels en protocollen op elkaar aansluiten. Zo is er in 2023 een Global Hydrogen Safety Coalition gevormd waarin NL, DE en BE samenwerken aan eenduidige veiligheidsprincipes voor waterstof [55].
- › Op nationaal vlak werkt de Taskforce Veilige Energietransitie aan samenwerking tussen industrie en overheid, om preventieve info-uitwisseling versneld in te voeren en aan protocollen om bij een GRIP 3/4 met gevaarlijke stoffen naast de brandweer ook GHOR (medisch), politie en eventueel defensie-experts te betrekken in de bronbestrijdingsstaf, zodat de inzet van bijvoorbeeld meetploegen, ontsmettingseenheden en ontruiming soepeler gecoördineerd wordt. De inzet van onbemande systemen zou nader kunnen worden onderzocht en afgestemd, zodat dronebeelden gedeeld kunnen worden.
- › Incidenten op of nabij rivieren en in havens laten zien dat nauwe samenwerking met partijen als de Havendienst, Rijkswaterstaat en bedrijfsbrandweren van grote industriële locaties essentieel is, omdat deze organisaties vaak beschikken over specifieke expertise en middelen die van grote waarde zijn bij de bestrijding van complexe incidenten [56].

### Regels & procedures

- › Een belangrijk actiepunt is het ontwikkelen en/of updaten van (PGS) richtlijnen voor nieuwe waterstofdragers en incident-scenario's, zoals voor koude ammoniak, vloeibare waterstof en bepaalde LOHCs. Zo is een herziene PGS 12 gepubliceerd die rekening houdt met grootschalige ammoniak-import en bunkering. Hierin hebben industrie, overheid

en wetenschap samen technologische innovaties (zoals nieuwe detectiesystemen) vertaald naar concrete veiligheidsafspraken.

- › Voor transport over weg en water lopen internationale trajecten: Nederland pleit binnen ADR/ADN voor uniforme eisen (bijv. dubbelwandige tanks voor gekoelde ammoniak). De IMO heeft intussen Interim Guidelines voor ammonia-fueled ships [57].
- › Naast regels voor preventie zijn duidelijke SOP's (Standard Operating Procedures) nodig voor de incidentbestrijding zelf. Een voorbeeld is het opstellen van landelijke doeleinden voor inzet van onbemande tools in explosiegevaarlijke zones (ATEX): welke robots/drones zijn gecertificeerd, hoe te handelen bij storingen, enz.. Een ander voorbeeld is dat experts aanbevelen om het opruimen van koudkokende plassen (bv. een grote ammoniakplas op -33 °C) niet door de reguliere brandweer te laten doen, maar contractueel bij gespecialiseerde firma's te beleggen. Duidelijke afspraken hierover (in plannen en eventueel in wetgeving) voorkomen vertraging en discussie tijdens een crisis.
- › Onderzoek naar gedrag van vloeibare waterstof en ammoniakwolken is beschreven door PRESLHY (Europees onderzoek naar veiligheid van vloeibare waterstof [58]) en HSE UK (Hydrogen safety research [46]).
- › Tot slot wordt in diverse (Europese) gewerkt aan 'decision frameworks' voor crisisbestrijding (niet voor sec voor waterdragers maar in het algemeen). Door nieuwe denkkaders op te nemen in draaiboeken en te oefenen, is men beter voorbereid om onder tijdsdruk de juiste call te maken, zoals beschreven door het NIPV in Crisisbeheersing en scenariodenken [59] en TNO in Scenariodenken in crisisbeheersing [40].

## 7 Conclusies en aanbevelingen

De centrale vraag van dit onderzoek is als volgt:

*“Hoe kunnen veiligheidsregio’s zich beter voorbereiden op mogelijke toekomstige crises met waterstofdragers?”*

Om adequaat te kunnen optreden bij incidenten met waterstofdragers moeten veiligheidsregio’s hun voorbereiding versterken langs zowel de preventieve als de operationele kant van de veiligheidsketen. Dit vraagt om een combinatie van technologische vernieuwing, specialistische kennisopbouw en structurele samenwerking met bedrijven.

Aan de preventieve zijde speelt het omgaan met de nog aanzienlijke onzekerheden rondom het gebruik, de transportroutes en de volumestromen van waterstofdragers een centrale rol. Deze onzekerheden vragen van veiligheidsregio’s dat zij de ontwikkelingen rondom waterstofdragers expliciet en actief volgen. Door structureel aan te sluiten bij kennisnetwerken, vakinhoudelijke bijeenkomsten en actuele initiatieven blijven veiligheidsregio’s op de hoogte van nieuwe inzichten en ontwikkelingen. Daarnaast is het belangrijk om scenario’s van mogelijke incidenten met waterstofdragers door te spelen om lacunes inzichtelijk te maken en om behoeften aan kennis, hulpmiddelen, opleidingen of andere instrumenten tijdig te signaleren.

Aan de operationele zijde is het noodzakelijk om te investeren in geavanceerde detectie- en responsmiddelen die specifiek zijn toegesneden op cryogene en toxische stoffen, zoals waterstof en ammoniak. Tegelijkertijd vraagt de toegenomen complexiteit van deze incidenten om versterking van de IBGS capaciteit, onder meer door gespecialiseerde opleidingen en interregionale scenario en GRIP oefeningen, zodat grootschalige en multidisciplinaire inzet beter kan worden beheerst.

Een snel en betrouwbaar situatiebeeld vormt een randvoorwaarde voor effectieve besluitvorming. Door afspraken te maken over real time datadeling van exploitanten met de meldkamer ontstaat een gedeeld en actueel beeld van een incident en de bijbehorende risico’s.

Om deze vraag nader te beantwoorden zijn drie deelvragen verder uitgewerkt:

1. *Wat is het mogelijke tijdspad van de risico’s gebonden aan de realisatie van de energietransitie met betrekking tot waterstofdragers?*

Het tijdspad van risico’s hangt sterk samen met de snelheid en aard van de energietransitie. Op korte termijn (5-10 jaar) zijn de risico’s vooral vergelijkbaar met bestaande incidenten, maar nemen de volumes en diversiteit van waterstofdragers toe. Op middellange termijn (10-15 jaar) ontstaan nieuwe logistieke ketens en toepassingen, waardoor de risico’s complexer en grootschaliger worden. Op lange termijn (15-25 jaar) zijn waterstofdragers volledig ingebed in het energiesysteem, met nieuwe typen risico’s en een blijvende noodzaak tot innovatie en kennisontwikkeling. De mate waarin risico’s zich manifesteren, wordt bepaald

door marktontwikkelingen, technologische innovatie en de gekozen route in de energietransitie (ADAPT of TRANSFORM).

*2. Op welke wijze kan inzicht worden verkregen in de ontwikkeling van (toekomstige) risico's gerelateerd aan de (voorgenomen) uitrol van waterstofdragers?*

In dit onderzoek zijn aan de hand van scenario's de belangrijkste lacunes, behoeften en handelingsperspectieven van veiligheidsregio's in kaart gebracht bij drie toekomstige voorbeeldincidenten met waterstofdragers. De in dit onderzoek toegepaste methodiek biedt veiligheidsregio's de mogelijkheid om aanvullende scenario's systematisch te ontwikkelen en uit te werken. Daarbij dienen de vastgestelde scenarioparameters en variabelen als vertrekpunt.

Van belang is dat veiligheidsregio's daarbij de actuele ontwikkelingen rondom het gebruik, de transportroutes en de volumenstromen van waterstofdragers blijven volgen. Nieuwe inzichten op deze terreinen kunnen worden benut om te bepalen welke scenarioparameters in samenhang moeten worden gecombineerd, zodat aanvullende plausibele en relevante scenario's kunnen worden opgesteld. Voor ieder aanvullend scenario kunnen veiligheidsregio's vervolgens beoordelen in hoeverre zij beschikken over voldoende handelingsperspectief, of dat er behoefte bestaat aan aanvullende kennis, hulpmiddelen, opleidingen of andere instrumenten.

Het is essentieel dat deze behoeften tijdig worden gesignaleerd, zodat structurele oplossingen kunnen worden ontwikkeld – onder meer via gerichte kennisprogramma's – om de veiligheid bij incidenten met waterstofdragers te versterken.

*3. Welke bestaande en innovatieve oplossingen kunnen bijdragen aan het voorbereiden van de veiligheidsregio's op incidenten met waterstofdragers?*

Deze onderzoeksvraag richt zich op de vraag welke bestaande en innovatieve oplossingen veiligheidsregio's kunnen helpen zich beter voor te bereiden op incidenten met waterstofdragers. Het antwoord op deze vraag is opgebouwd uit een synthese van praktijkervaringen, scenario's, workshops en actuele ontwikkelingen in beleid en technologie. De antwoorden laten zien dat een effectieve voorbereiding op incidenten met waterstofdragers vraagt om een combinatie van het versterken van bestaande IBGS-principes en het gericht implementeren van innovatieve oplossingen. De bestaande aanpak biedt een solide basis, maar de energietransitie en de introductie van nieuwe waterstofdragers brengen nieuwe risico's en onzekerheden met zich mee. Innovatie is noodzakelijk om lacunes te dichten op het gebied van detectie, onbemande inzet, kennisontwikkeling, samenwerking en regelgeving. Door deze elementen te combineren en structureel te verankeren in beleid, organisatie en praktijk, kunnen veiligheidsregio's adequaat anticiperen op de veranderende risico's van de energietransitie en incidenten met waterstofdragers effectief beheersen.

**Bestaande oplossingen**

De bestaande oplossingen zijn stevig verankerd in de IBGS-aanpak (bronbestrijding, effectgebied-bepaling, ontsmetting) en vormen het fundament voor de huidige incidentbestrijding. Deze aanpak is direct toepasbaar op incidenten met waterstofdragers en biedt een herkenbaar raamwerk voor veiligheidsregio's. Belangrijke elementen zijn:

- › Communicatie en bevolkingsbescherming: Instrumenten als NL-Alert, schuilen en evacueren zijn ingeburgerd en vormen bij ammoniakincidenten vaak het meest effectieve acute handelingsperspectief.

- › Preventieve installatieveiligheid: Detectie van kritieke parameters, ESD-systemen en materiaalkeuze voor cryogene condities zijn bekend terrein in de industrie en helpen bij het beperken van lekken en escalaties.
- › Meet- en detectiemiddelen: LEL-meters, gasdetectie en warmtebeeldcamera's worden operationeel ingezet, maar ijking op H<sub>2</sub> en toepasbaarheid in ATEX-zones zijn niet overal geborgd.
- › Samenwerking en opschaling: Samenwerking met bedrijfsbrandweren en regionale/landelijke opschaling (GRIP, LAGS-advies) zijn gevestigde organisatorische pijlers.
- › Kennisontwikkeling en training: Structurele IBGS-trainingen, interregionale oefeningen en borging van specialistische teams zijn essentieel voor een robuuste voorbereiding.

### **Innovatieve oplossingen**

De innovatieve oplossingen richten zich op het dichten van lacunes waar de bestaande aanpak tekortschiet, en op het vergroten van het handelingsperspectief bij nieuwe risico's en technologieën. De belangrijkste innovaties zijn:

- › Geavanceerde detectie: Inzet van H<sub>2</sub>-specifieke meters, bron-nabije NH<sub>3</sub>-detectie, drone-sensoren en FTIR-technologie voor real-time monitoring van (bij)producten en dampwolken.
- › Onbemande inzet: Blusrobots en drones met warmtebeeldcamera's voor ATEX-zones bij LH<sub>2</sub>-scenario's, inclusief afscherming en gericht koelen op afstand.
- › Specifieke blus- en neutralisatiemiddelen: Ontwikkeling van schuimen en anti-katalytische middelen voor cryogene en reactieve stoffen (o.a. NaBH<sub>4</sub>), en mobiele neutralisatie/sanering.
- › AI-ondersteunde scenario-ontwikkeling en kennisplatforms: Systematische scenario-ontwikkeling, landelijke kennisplatforms, periodieke actualisatie van scenariokaarten en vuistregels, en specifieke CBRN/cryogene trainingen voor IBGS-teams.
- › Samenwerking en standaardisatie: Intensiveren van afspraken met RWS, havendiensten, GHOR, bedrijfsbrandweren en internationale partners (IMO/ADR), standaardisatie van procedures en datadeling (LOD's, bronmeetnet).
- › Versnelde regelgeving en modelvalidatie: Versnelde PGS-ontwikkeling voor LH<sub>2</sub>/LOHC's, validatie van effect- en risicomodellen, uniforme eisen langs corridors (ADR/ADN/IMO).
- › Landelijke instrumentatiestrategie en witboek: Gedeelde catalogus van ATEX-geschikte onbemande systemen en specifieke gasdetectie, praktische vuistregels en inzetprotocollen voor cryogene incidenten, en standaardafspraken voor brondata-deling via bedrijven.

## **7.1 Aanbevelingen**

Het ligt voor de hand om voor het vervolg te focussen op de combinatie van preventie, bronaanpak, snelle en specifieke detectie, onbemande inzet, operationele kennisborging en versnelde standaardisatie. Dit bepaalt of veiligheidsregio's het handelingsperspectief kunnen vergroten in een energiesysteem met waterstofdragers. Deze aanpak volgt de route: versterk wat al werkt, vul de kritieke kenniskloof, en borg regelgeving en instrumentatie, zodat toekomstige incidenten voorstelbaar blijven én beheersbaar worden.

### **Voor beleid & regelgeving:**

1. Betrek de veiligheidsregio's vroegtijdig om hun kennis en behoeften mee te nemen bij het opstellen van beleid en regelgeving.
2. Versnel de ontwikkeling van PGS-richtlijnen voor LH<sub>2</sub>, koude NH<sub>3</sub> en (indien opportuun) bepaalde LOHC's; actualiseer interventiewaarden en effectafstanden en voeg de potentiële impact (effectafstand) op het (aquatisch) milieu toe. Zorg dat regelgeving en

richtlijnen gelijke tred houden met technologische en marktontwikkelingen. Dit biedt duidelijkheid voor vergunningverlening en incidentbestrijding, en dat milieuaspecten worden meegenomen in de veiligheidsafwegingen.

3. Stimuleer standaardisatie en internationale afstemming (ADR/IMO) voor veilig transport en overslag van waterstofdragers. Werk samen met internationale partners aan uniforme eisen en procedures, zodat transport en overslag van waterstofdragers veilig opgeschaald kunnen worden en vergunningseisen helder en consistent zijn.

#### **Voor de veiligheidsregio's en bedrijven - koude kant:**

4. Volg de actuele ontwikkelingen rondom het gebruik, de transportroutes en de volumenströmen van waterstofdragers via kennisnetwerken, vakinhoudelijke bijeenkomsten en actuele initiatieven.
5. Zet een landelijk programma op voor instrumentatie en onbemande inzet ( $H_2/NH_3$ -specifieke detectie, drones/robots, warmtebeeld), inclusief financiering, onderhoud en opleiding. Investeer in moderne detectie- en responsmiddelen en borg structureel onderhoud en training, zodat hulpdiensten snel en veilig kunnen handelen bij incidenten met cryogene stoffen.
6. Prioriteer IBGS-capaciteit door extra opleidingsbudgetten voor cryogene, toxische en hoog-energetische scenario's, en organiseer interregionale scenariotrainingen en GRIP-oefeningen. Versterk de specialistische kennis en vaardigheden van IBGS-teams, zodat zij adequaat kunnen optreden bij complexe incidenten en grootschalige opschaling.
7. Maak afspraken met exploitanten over real-time brondata-delings en LOD's, en integreer operationele object informatie van meetnetten in de meldkamer. Zorg voor directe toegang tot operationele data en meetnetinformatie, zodat het situatiebeeld bij incidenten snel en volledig beschikbaar is voor alle betrokkenen.

#### **Voor de veiligheidsregio's en bedrijven – warme kant:**

8. Beperk de bron door afspraken, richtlijnen of SOP's te ontwikkelen voor compartimentering en inbloksystemen bij buisleidingen. Voorkom grootschalige uitstroming door het product per compartiment te beperken en inbloksystemen toe te passen, en leg dit vast in operationele procedures en ontwerpstandaarden.
9. Implementeer en ontwikkel Safe by Design-maatregelen en stimuleer vroege interventie, bijvoorbeeld door voortzetting en uitbreiding van bestaande initiatieven. Focus op veilig ontwerp van installaties en infrastructuur, en zorg voor vroege lekdetectie en integriteit van veiligheidskritische systemen, zodat incidenten zoveel mogelijk worden voorkomen of direct beperkt.
10. Ontwikkel en implementeer Emergency Shut Down (ESD)-systemen die automatisch ingrijpen en detectiesystemen voor veiligheidskritische parameters redundant uitvoeren. Zorg dat ESD-systemen standaard worden meegenomen in ontwerp en technologie, en dat ze effectief en redundant functioneren bij incidenten met gevaarlijke stoffen.

#### **Voor onderzoek, kennisontwikkeling en innovatie:**

11. Voer modelvalidatie en experimenten uit om het thermodynamisch gedrag bij cryogene lekkages ( $LH_2$ , koude  $NH_3$ ), RPT-grensgevallen,  $H_2$ -explosiemodellen en effectafstanden met hoogte en complex terrein beter te begrijpen. Ontwikkel en toets modellen op basis van praktijkdata en experimenten, zodat effectvoorspellingen en risicobeoordelingen betrouwbaar zijn en aansluiten bij de actuele praktijk.
12. Ontwikkel en actualiseer scenarioboeken, e-learnings, simulaties en VR-trainingen; bundel lessons learned en publiceer praktische 'witboeken' (zoals koudkokende plassen en ammoniakhulpplan). Faciliteer kennisdeling en ervaringsleren door actuele en praktijkgerichte leermiddelen te ontwikkelen en breed beschikbaar te maken voor alle betrokkenen.

13. Ontwikkel en sluit aan bij kennishubs en internationale samenwerkingsplatforms, zoals HyResponder, en stimuleer grensoverschrijdende casuïstiek. Versterk de uitwisseling van kennis en best practices door actief deel te nemen aan bestaande kennishubs en internationale netwerken, en ontwikkel waar nodig nieuwe platforms voor samenwerking en kennisdeling.

# Referenties

- [1] Ministerie KGG, „Kamerbrief over kabinetsvisie waterstofdragers, Kamerstuk 22-11-2024,” 2024. [Online]. Available: <https://open.overheid.nl/documenten/6fd5d27a-b334-4aa2-b8fc-f0edaad4d832/file>.
- [2] NIPV, „Brandweer in Europa,” 2025.
- [3] Veiligheidsberaad, *Reactie op de kabinetsvisie waterstofdragers*, 2024.
- [4] Arcadis, Berenschot en TNO, „Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers,” 2023.
- [5] Ministerie van KGG, „Verdiepingsdocument beoordeling waterstofdragers,” 2024.
- [6] M. Weeda en R. Segers, „The Dutch hydrogen balance, and the current and future representation of hydrogen in the energy statistics” Energy.nl
- [7] L. Eble en M. Weeda, „Kosten voor de productie van hernieuwbare waterstof in Nederland.”
- [8] Hynetwork, „Conceptvoorstel aanpassing uitrolplan; Consultatiedocument,” 2024.
- [9] WITS, „World Integrated Trade Solution,” 2023. [Online]. Available: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/NLD/year/2023/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/290511>. [Geopend 21 januari 2026].
- [10] Advario, „Power2X and Advario to develop world-scale e-SAF hub in the Port of Rotterdam,” 16 October 2024. [Online]. Available: <https://advario.com/power2x-and-advario-to-develop-world-scale-e-saf-hub-in-the-port-of-rotterdam/>. [Geopend 21 januari 2026].
- [11] European Commission, „Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU,” 14 April 2025. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj/eng>. [Geopend 21 januari 2026].
- [12] Nationaal Waterstofprogramma, „Straks 4 waterstoftankstations en ruim 300 voertuigen op waterstof erbij door SWIM-regeling,” 14 oktober 2025. [Online]. Available: <https://www.nationaalwaterstofprogramma.nl/actueel/nieuws/3132318.aspx?t=Straks-4-waterstoftankstations-en-ruim-300-voertuigen-op-waterstof-erbij-door-SWIM-regeling>. [Geopend 21 januari 2026].
- [13] RVO, „Duurzame mobiliteit,” [Online]. Available: <https://duurzamemobiliteit.databank.nl/>. [Geopend 21 januari 2026].
- [14] M. Blom, M. Bongaerts, L. van Cappellen, F. Hesselink en W. van Santen, „Mkba energiehub; Maatschappelijke waarde van twaalf archetypes voor 2.500 energiehub in Nederland,” CE Delft.
- [15] Alliander, „Waterstofpilot Lochem succesvol afgerond waardevolle lessen voor de toekomst,” 13 oktober 2025. [Online]. Available: <https://www.alliander.com/nl/nieuws/waterstofpilot-lochem-succesvol-afgerond-waardevolle-lessen-voor-de-toekomst/>. [Geopend 21 januari 2026].
- [16] WaterstofWijk Wagenborgen, [Online]. Available: <https://waterstofwijkwagenborgen.nl/>. [Geopend 21 januari 2026].

- [17] Offshore Energy, „Suiso Frontier brings world's 1st LH2 shipment to Japan,” 25 February 2022. [Online]. Available: <https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan/>.
- [18] Kawasaki, „Fabrication of Large Liquefied Hydrogen Storage Tank Launched - Toward the Establishment of Liquefied Hydrogen Supply Chain,” 7 August 2025. [Online]. Available: [https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20250807\\_3407](https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20250807_3407). [Geopend 21 januari 2026].
- [19] Japan Suiso Energy, Ltd., Kawasaki Heavy Industries, Ltd, „Contract Signed to Build World's Largest 40,000 m3 Liquefied Hydrogen Carrier,” 6 January 2026. [Online]. Available: [https://global.kawasaki.com/news\\_260106-1e.pdf](https://global.kawasaki.com/news_260106-1e.pdf).
- [20] Foreign Ministry of Oman, „Oman and the Netherlands sign key energy agreements,” 15 April 2025. [Online]. Available: <https://www.fm.gov.om/oman-and-the-netherlands-sign-agreements/>.
- [21] Nationaal Waterstofprogramma - LH2 Kenniscommunity, „ECOLOG Eos Project: World's First Liquid Hydrogen; Import Terminal in the port of Amsterdam (slide 9 - 14),” 29 januari 2025. [Online]. Available: [https://www.nationaalwaterstofprogramma.nl/documenten/handlerdownloadfiles.ashx?i\\_dnv=3012087](https://www.nationaalwaterstofprogramma.nl/documenten/handlerdownloadfiles.ashx?i_dnv=3012087). [Geopend 21 januari 2026].
- [22] A. Biogradlija, „Energy News,” 11 December 2025. [Online]. Available: <https://energynews.biz/bp-exits-omans-duqm-green-hydrogen-project-as-developer-withdrawals-test-gulf-state-strategies/>. [Geopend 21 januari 2026].
- [23] International Fertilizer Association, „Databases and Charts,” [Online]. Available: <https://www.ifastat.org/>. [Geopend 7 december 2025].
- [24] World Integrated Trade Solution, „Netherlands Anhydrous ammonia exports by country in 2023,” 2023. [Online]. Available: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/NLD/year/2023/tradeflow/Exports/partner/ALL/product/281410>. [Geopend 21 januari 2026].
- [25] Chiyoda Corporation, „Hydrogen LOHC-MCH System,” [Online]. Available: <https://www.chiyodacorp.com/en/service/lowcarbon/hydrogen/lohc-mch/>. [Geopend 21 januari 2026].
- [26] Hydrogenious, „Vopak and Hydrogenious LOHC Technologies jointly take hydrogen logistics to the next level,” 4 January 2023. [Online]. Available: <https://hydrogenious.net/vopak-and-hydrogenious-lohc-technologies-jointly-take-hydrogen-logistics-to-the-next-level/>. [Geopend 21 januari 2026].
- [27] A. Ibrahim, M. Paskevicius and C.E. Buckley, „Chemical compression and transport of hydrogen using sodium borohydride,” Sustainable Energy & Fuels (RSC Publishing).
- [28] M. Scheepers, „Toekomst van et Nedelndse energiesysteem. Ontwikkeling energieintensieve-industrie bepalend voor de energietransitie,” TNO, 2024.
- [29] Fraunhofer ISI, „Langfristszenarien; Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands,” [Online]. Available: <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>. [Geopend 7 december 2025].
- [30] Europese Commissie, „Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023,” [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj/eng>.
- [31] Europese Commissie, „Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1184 of 10 February 2023,” 10 July 2024. [Online]. Available: [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_del/2023/1184/oj/eng](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1184/oj/eng).

- [32] Ministerie van Klimaat en Groene Groei, „Wet jaarverplichting hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong in de industrie,” [Online]. Available: <https://www.internetconsultatie.nl/jaarverplichting/b1>.
- [33] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Vijfde voortgangsbrief implementatie RED-III vervoer,” 10 december 2025. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2025/12/10/vijfde-voortgangsbrief-implementatie-red-iii-vervoer>.
- [34] Ministerie van Klimaat en Groene Groei, „Klimaat- en Energienota 2025,” 2025.
- [35] Yara, „Air Products and Yara in Advanced Negotiations to Partner on Low-emission Ammonia Projects,” 8 December 2025. [Online]. Available: <https://www.yara.com/corporate-releases/air-products-and-yara-in-advanced-negotiations-to-partner-on-low-emission-ammonia-projects/>.
- [36] Uniper, „Global hydrogen market: Uniper and thyssenkrupp Uhde sign framework agreement on the use of ammonia cracking technology,” 26 November 2025. [Online]. Available: <https://www.uniper.energy/news/global-hydrogen-market-uniper-and-thyssenkrupp-uhde-sign-framework-agreement-on-the-use-of-ammonia-cracking-technology>.
- [37] J.G. ministerie IenW, „Onderzoeksopdracht Risico's, effecten en handelingsperspectief bij incidenten met waterstofdragers,” 2025.
- [38] „Toekomstverkenningen,” TNO Vector, [Online]. Available: <https://vector.tno.nl/expertises/systeemanalyse/toekomstverkenningen/>. [Geopend 3 December 2025].
- [39] K. Cordova-Pozo en E.A. Rouwette, „Types of scenario planning and their effectiveness: A review of reviews,” *Futures*, Mei 2-23.
- [40] TNO, „Scenariodenken voor nationale crisisbesluitvorming (P102). Uitdagingen, behoeften en toegevoegde waarde. TNO 2023 R12430,” 2023.
- [41] M. Luesink en C. Boin, „Trainen in scenariodenken binnen veiligheidsregio's: Een eerste inventarisatie,” 2023.
- [42] CNN, „Ammonia gas leak from a tanker truck in Oklahoma sickens dozens and forces evacuations,” [Online]. Available: <https://edition.cnn.com/2025/11/13/us/oklahoma-gas-leak-ammonia>. [Geopend december 2025].
- [43] J. Weitering, E. Vullings, W. Verdaasdonk, I. Bastings en G. Beentje, „Scenariodenken in crisisbeheersing. Verkenning van kansen ter verdieping van de methode Innovatieverkenning Crisisbeheersing op nationaal niveau,” TNO, Den Haag, 2025.
- [44] „Twaalf nieuwe scenarios energietransitie beschikbaar,” NIPV, 2024. [Online]. Available: <https://nipv.nl/nieuws/twaalf-nieuwe-scenarios-energietransitie-beschikbaar/>.
- [45] HyResponder, „European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders,” 2025. [Online]. Available: <https://hyresponder.eu/>.
- [46] H. UK, „Hydrogen safety research,” 2025. [Online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/horizons/hydrogen.htm>.
- [47] S. Bootsma, „HyNose - eNose netwerken voor real-time detectie van waterstof en waterstofdragers, waaronder ammoniak,” Comon Invent, 2023. [Online]. Available: <https://www.rvo.nl/safety-deals/hynose>.
- [48] „Van idee tot inzet: de innovatieve blusrobot van Brandweer Limburg-Noord,” BrandweerNL, 2025. [Online]. Available: <https://www.brandweer.nl/nieuws/nieuwe-blusrobot-limburg-noord/>.

- [49] RVO, „HyNose. eNose netwerken voor real-time detectie van waterstof en waterstofdragers, waaronder ammoniak (HyNose),” Comon Invent, 2023. [Online].
- [50] A. e. Wittenveen+Bos, „Veiligheid transport van ammoniak door buisleidingen,” 2024.
- [51] „ARISE,” 2025. [Online]. Available: <https://www.arise-partnership.org/>.
- [52] N. Rosmuller, „Verslag Community-of-Practice Waterstof,” NIPV, 15-03-2022. [Online]. Available: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/03/Verslag-Community-of-Practice-Waterstof-15-maart-2022.pdf>.
- [53] NIPV, „Kennisbundel Transport van waterstof(dragers),” 2024.
- [54] A. Hubers, „Blusrobot krijgt vuurdoop bij grote brand Horst,” 2025. [Online]. Available: <https://www.l1nieuws.nl/nieuws/2912098/blusrobot-krijgt-vuurdoop-bij-grote-brand-horst>.
- [55] C.H. Partnership, „Het initiatief van de Global Hydrogen Safety Coalition wordt genoemd in de context van internationale normalisatie,” <https://www.clean-hydrogen.europa.eu/>, 2025.
- [56] V. Zuid-Limburg, „Brandweer VRZL en Chemelot bundelen krachten,” 2025. [Online]. Available: <https://www.vrzi.nl/actueel/brandweer-vrzi-en-chemelot-bundelen-krachten>.
- [57] IMO, „Interim Guidelines for the Safety of Ships using Ammonia as Fuel,” [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/03-ammonia.aspx>.
- [58] PRESPLY, „Europees onderzoek naar veiligheid vloeibare waterstof,” 2025. [Online]. Available: [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects/2020/presply\\_en](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects/2020/presply_en).
- [59] NIPV, „Crisisbeheersing en scenariodenken,” 2025. [Online]. Available: <https://www.nipv.nl/onderwerpen/crisisbeheersing>.

## Bijlage A

# Longlist van scenario's

## A.1 Toxische ammoniakwolk bij falen van een decentrale ammoniakkraker.

Een energiebedrijf heeft een project gerealiseerd voor het decentraal kraken van vloeibare ammoniak op een bedrijventerrein. Het doel is om waterstof te produceren voor kleinere industriële gebruikers die buiten bereik liggen van het (nog te ontwikkelen) landelijke waterstofnetwerk. De installatie is compact, modulair en ontworpen voor lokale inzet, maar de technologie is nieuw en operationele ervaring is beperkt.

Door technisch falen blijft een afsluiter onbedoeld dicht, waardoor de druk ongecontroleerd oploopt tot boven de ontwerpdruk. De drukbeveiliging, die normaal gesproken de overdruk zou moeten afvoeren, werkt niet naar behoren. Door de aanhoudende overdruk ontstaat er een scheur, waardoor vloeibare ammoniak vrijkomt. Deze ammoniak vormt een plas op de grond en verdampt deels, wat leidt tot de vorming van een toxische dampwolk. De wolk verspreidt zich over het bedrijventerrein en beweegt zich, afhankelijk van de weersomstandigheden, richting een nabijgelegen woonwijk. Dit levert direct gevaar op voor personeel en omwonenden, met risico's op ademhalingsproblemen, chemische brandwonden en mogelijke evacuatie's.

| Menselijke impact                                                                                          | Milieu impact                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Dodelijke slachtoffers in de directe omgeving van de installatie                                           | Lichte/lokale verontreiniging van lucht en bodem |
| Ernstig gewonden met ademhalingsproblemen, risico op chronische luchtwegproblemen en chemische brandwonden |                                                  |

## A.2 Toxische ammoniakwolk met milieuverontreiniging bij overslag in havengebied.

In het kader van de energietransitie is de import van groene ammoniak sterk toegenomen. In een havengebied in Nederland vindt grootschalige overslag van koude ammoniak (vloeibaar gemaakt door te koelen tot -33°C onder atmosferische druk), van een zeeschip naar een opslagterminal, om van daaruit later verder verwerkt of getransporteerd te worden.

Bij een groot lek in de laadarm waarbij vloeibare (gekoelde) ammoniak vrijkomt, ontstaat een acuut en potentieel gevaarlijk scenario. De ammoniak stroomt uit de beschadigde arm en verspreidt zich snel over de bodem van het laadplatform, waarbij het direct in contact komt met oppervlakken die niet ontworpen zijn om zulke lage temperaturen te weerstaan. Door de verdamping van de vloeistof ontstaat een dikke (witte) dampwolk die zich laag bij de grond

verspreidt, aangezien koud ammoniakgas zwaarder is dan lucht. Deze damp kan zich over een aanzienlijke afstand verplaatsen, afhankelijk van windrichting en -snelheid.

Wanneer de ammoniak in contact komt met oppervlaktewater veroorzaakt dit een snelle afkoeling van het wateroppervlak en een onmiddellijke chemische reactie. Ammoniak lost goed op in water, waarbij het de pH verhoogt en het aquatisch leven ernstig kan verstoren of doden. Tegelijkertijd ontstaat er een verhoogd risico op blootstelling voor personeel in de omgeving, vooral via inademing van dampen of huidcontact met de vloeistof of neerslag.

| Menselijke impact                                       | Milieu impact                                                                                   |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ernstige gewonden door blootstelling aan ammoniakdampen | Middelsterke/ regionale verontreiniging van bodem en/of oppervlaktewater en mogelijk grondwater |

## A.3 Brand en grootschalige lekkage van vloeibaar waterstof in havengebied.

In het kader van internationale energietransitieprojecten arriveert een zeeschip met een lading vloeibare waterstof (LH<sub>2</sub>) in een Nederlandse haven. De waterstof is onder extreem lage temperatuur (-253°C) vloeibaar gehouden. Voor het eerst wordt een directe overslag uitgevoerd van het zeeschip naar een binnenvaartschip, zonder tussenopslag of conversie. Om boil-off zoveel mogelijk te voorkomen wordt gestreefd naar zo min mogelijk verpompen en over zo kort mogelijk afstand, waardoor deze vorm van overslag, zonder buffering of opslag voorstelbaar is.

Tijdens de overslag ontstaat een leidingbreuk. Een grote hoeveelheid koude (vloeibare) waterstof stroomt ongecontroleerd uit en komt in contact met het oppervlaktewater van de haven. Wanneer dit in contact komt met water, zal het snel verdampen door de warmte van het water, wat kan leiden tot een plotselinge toename van het volume van waterstofgas. Waterstofgas is zeer brandbaar en als het gas zich vermengt met lucht en er een ontstekingsbron aanwezig is, kan dit leiden tot een explosie of brand. Het contact van vloeibare waterstof met water kan leiden tot bevrozing van het wateroppervlak en de omgeving, wat schade kan veroorzaken aan materialen en structuren. De snelle verdamping van waterstofgas kan de zuurstof in de lucht verdringen, wat kan leiden tot verstikking in afgesloten ruimtes.

| Menselijke impact                                         | Milieu impact                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dodelijke slachtoffers in de directe omgeving van het lek | Middelsterke/regionale verontreiniging van bodem en/of oppervlaktewater en mogelijk grondwater |
| Ernstig gewonden door blootstelling aan ammoniakdampen    |                                                                                                |

## A.4 Explosie en brand bij opslag van vloeibare waterstof bij tankstation grenzend aan woonomgeving.

In het kader van de energietransitie is op een multi-fuel tankstation een demo/pilot uitgevoerd met de verlading en opslag van vloeibare waterstof (LH<sub>2</sub>). Deze vloeibare vorm maakt het mogelijk om grotere hoeveelheden energie op een compacte manier op te slaan en snel te distribueren. De installatie is nieuw en ontworpen voor gebruik in stedelijk gebied, maar de technologie is complex en kent nog weinig praktijkervaring. Om veiligheidsredenen bevindt het tankstation zich aan de rand van het stedelijk gebied.

Op een gegeven moment ontstaat er brand op het tankstation, waarbij warmtestraling de opslagtank met vloeibare waterstof bereikt. Door deze warmtestraling wordt de vloeibare waterstof langzaam opgewarmd, waardoor de druk in de opslagtank oploopt. Dit verhoogt het risico op falen van de opslagtank en een mogelijke explosie. Een explosie zou veel schade kunnen veroorzaken aan het tankstation, naastgelegen objecten en omwonenden in de nabijgelegen woonwijk.

| Menselijke impact                                                                                                   | Milieu impact                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Dodelijke slachtoffers door de explosie                                                                             | Lichte/lokale verontreiniging van lucht en bodem |
| Ernstig gewonden door brandwonden, explosie-impact en met risico op chronische luchtwegproblemen door dampinhalatie |                                                  |

## A.5 Explosie en brand bij overslag van LSM op industriecluster.

In het kader van de verduurzaming van de mobiliteitssector is besloten tot de herintroductie van spoortransport van Liquid Synthetic Methane (LSM), een synthetische brandstof, vergelijkbaar met vloeibaar aardgas (LNG), die onder lichte overdruk (ca. 1,25 bar) en bij lage temperatuur wordt vervoerd.

Tijdens een overslagoperatie tussen een ketelwagen en een opslag-terminal op en industriecluster schiet de koppeling los door mechanische spanning of een fout in de bevestiging, waardoor een grote hoeveelheid LSM onder druk vrijkomt. Het afsluitsysteem faalt en sluit niet af zoals bedoeld. Hierdoor ontstaat een ongecontroleerde lekkage van damp en vloeistof. Door de aanwezigheid van een ontstekingsbron – bijvoorbeeld een warme motor, vonk of statische elektriciteit – ontbrandt het gasmengsel, wat leidt tot een explosie. De explosie veroorzaakt een brand die zich snel uitbreidt over het overslaggebied en overslaat naar nabijgelegen installaties.

| Menselijke impact                                                                                                                                    | Milieu impact                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Dodelijke slachtoffers in directe omgeving van de overslag                                                                                           | Lichte/lokale verontreiniging van lucht en bodem |
| Ernstig gewonden door brandwonden en inhalatie van verbrandingsproducten en met risico op chronische luchtwegproblemen door blootstelling aan dampen |                                                  |

## A.6 Explosie en brand bij opslag van natriumboorhydride op bedrijventerrein.

Op een bedrijventerrein is een loods ingericht voor de opslag van natriumboorhydride ( $\text{NaBH}_4$ ), een vaste stof die onder bepaalde omstandigheden waterstof kan vrijmaken. De stof is reactief en kan bij contact met water of vochtige lucht heftig reageren. Door aanhoudende regen ontstaat een lekkage in het dak van de loods boven een pallet met natriumboorhydride. De stof reageert direct, waarbij waterstofgas vrijkomt. Kort daarop volgt een explosie, gevolgd door een brand in het opslaggedeelte van de loods.

| Menselijke impact                                          | Milieu impact                                                                                   |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dodelijke slachtoffers in directe omgeving van de explosie | Lichte/lokale verontreiniging van lucht en bodem door verbrandingsproducten en chemische resten |
| Ernstig gewonden met brandwonden en ademhalingsproblemen   | Geen grootschalige verspreiding, maar bodem- en luchtmetingen noodzakelijk                      |

## A.7 Toxische wolk bij instantaan falen van een tankwagen met gekoelde ammoniak nabij een woonomgeving.

Omdat de ADR-regelgeving in de toekomst mogelijk het wegtransport van gekoelde ammoniak toestaat, wordt een proef uitgevoerd met het vervoer van gekoelde (vloeibare) ammoniak in een dubbelwandige, geïsoleerde tankwagen. Tijdens een testrit treedt een technische storing op, waardoor de temperatuur van de ammoniak snel stijgt. Dit leidt tot een snelle drukopbouw in de tank, waarvoor de pressure relieve valve niet is ontworpen, waardoor – na verloop van tijd - de tank open scheurt en de gehele tankinhoud ineens vrijkomt.

Er ontstaat een plas en een toxische wolk die zich, afhankelijk van de windrichting en -snelheid, verspreidt richting een nabijgelegen woonwijk met mogelijk kwetsbare objecten zoals scholen, zorginstellingen en woningen.

| Menselijke impact                                                                 | Milieu impact                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Ernstig gewonden met ademhalingsproblemen, risico op chronische luchtwegproblemen | Lichte/lokale verontreiniging van bodem door ammoniaklekkage |

## A.8 Lekkage van LOHC (DBT/pDBT) op de Rijn, vlak over de grens in Duitsland.

Een binnenvaartschip vervoert Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC), in dit geval DBT/pDBT, op de Rijn van Duitsland richting een industriële verwerkingslocatie in Nederland. Tijdens de vaart ontstaat, vlak over de grens in Duitsland, een scheur in een opslagtank door een constructiefout of externe impact (bijvoorbeeld aanvaring met een kade-element). Hierdoor lekt een aanzienlijke hoeveelheid LOHC in het oppervlaktewater.

De stof verspreidt zich snel in het water, vormt een laag op het wateroppervlak en verspreidt zich via de stroming over de landsgrens heen naar Nederland. Hoewel er geen directe menselijke slachtoffers vallen, is er sprake van ernstige milieu-impact door de giftige eigenschappen van de stof en de moeilijkheid van verwijdering uit het ecosysteem.

| Menselijke impact                                                                                       | Milieu impact                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Geen directe menselijke slachtoffers                                                                    | Sterke verontreiniging van oppervlaktewater, via stroming over landsgrens heen |
| Wel risico op secundaire blootstelling bij bergingswerkzaamheden en langdurige blootstelling aan dampen | Risico op bio-accumulatie en schade aan aquatisch leven                        |
|                                                                                                         | Complexe sanering vereist, mogelijk langdurig en kostbaar                      |

## Bijlage B

# Werkbladen workshop

Wat kan je doen als dit scenario zich voordoet? Handlingsperspectief?

Wat mis je in de bestrijding van dit incident?

TNO innovation for life

**Figuur B.1:** Werkblad 1. Gebruikt tijdens de workshop om uit te vragen wat de deelnemers zouden doen als een incidentscenario zich voordoet en welke capaciteiten ze momenteel missen in de bestrijding.

Technologie (middelen)

Intelligence (kennis)

Organisatie (interne training)

Samenwerking (met andere organisatie)

Regels & procedures (voorwaarden)

Andere aspecten...

Preparatie

Repressie

TNO innovation for life

**Figuur B.2:** Werkblad 2. Gebruikt tijdens de workshop om uit te vragen welke benodigdheden de deelnemers nodig achten om een incidentscenario in de toekomst goed te kunnen behandelen.

---

# Distributielijst

ONGERUBRICEERD Releasable to TNO and MinJenV › TNO 2025 R12458

***De distributielijst is als separaat bestand bijgevoegd.***

**Defence, Safety & Security**

Oude Waalsdorperweg 63  
2597 AK Den Haag  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)