



Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers

Eindrapport

65256

4 oktober 2021

Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers

4 oktober 2021

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
1. Introductie	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Vraagstelling	7
1.3 Afbakening en werkwijze	7
1.4 Leeswijzer	9
2. Typering van de dragers	10
2.1 Welke waterstofdragers bestaan in waterstofland?	10
2.2 Beschrijving verschijningsvormen en ketens	11
2.3 Basisvergelijking waterstofdragers	13
2.4 Beschrijving individuele ketens: Waterstof	15
2.5 Beschrijving individuele ketens: LOHC	19
2.6 Beschrijving individuele ketens: Ammoniak	21
2.7 Beschrijving overige ketens	23
2.8 Trechtering	25
2.9 Ketenoverzicht analyse	26
3. Analyse van kansen en aandachtspunten per keten	28
3.1 Analyse methode	28
3.2 Overzicht ketens	28
3.3 Algemene constatering	31
3.4 Vergelijkingen ketens	31
3.5 Epiloog	36
4. Verwijzingen	37
4.1 Literatuurlijst geraadpleegd voor totstandkoming van tabellen in bijlage C	37
5. Lijst met afkortingen en begrippen	39
6. Bijlagen	40

Managementsamenvatting

Achtergrond

Samen met andere maatschappelijke actoren werkt de Nederlandse overheid aan het volledig verduurzamen van de energievoorziening. In het kielzog van de energietransitie gaan duurzame waterstofdragers naar verwachting een grote rol spelen. Deze dragers kunnen – in principe eenvoudiger dan elektriciteit – worden opgeslagen en getransporteerd over lange afstanden en hebben toepassingen in ons dagelijks leven en in de industrie. Wel zijn er potentiële veiligheidsrisico's, onder andere rond omgevingsveiligheid. Deze veiligheidsrisico's kunnen spelen over de gehele keten van de productie tot eindgebruik. Het is belangrijk inzicht te hebben in deze veiligheidsaspecten, zodat deze bij het maken van beleidskeuzes kunnen worden meegewogen.

Doel en vraagstelling

Arcadis en Berenschot hebben in dat kader samen voor het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) dit onderzoek uitgevoerd met als doel om inzicht te geven in de veiligheidsaspecten van kansrijke duurzame waterstofdragers, zodat de veiligheidsaspecten in de toekomst goed kunnen worden meegewogen binnen nieuw of aangepast beleid. Hiervoor was een eenduidig overzicht nodig van de verschillende duurzame waterstofrijke energiedragers en de kansen en uitdagingen die deze met zich meebrengen ten aanzien van veiligheid. In dit onderzoek stonden drie hoofdvragen centraal:

1. Welke duurzame waterstofrijke energiedragers worden al toegepast of zijn in ontwikkeling, en wat is hun perspectief voor de nabije toekomst?
2. Welke transportketens zijn daarvoor al in beeld, en lijken voor de toekomst relevant?
3. Welke veiligheidsrisico's zijn er per keten, en welke ruimtelijke consequenties zijn daaraan verbonden?

Methode

Binnen dit onderzoek hebben wij verschillende stappen uitgevoerd om alle informatie die al voorhanden is te trechteren tot dit rapport:

- Stap 1 – Het verkennen en beschrijven van dragers en transportketens.
- Stap 2 – Het selecteren van relevante combinaties van dragers en transportmodaliteiten.
- Stap 3 – Opstellen van kwalitatieve analyses van de ketens op het onderwerp (omgevings)veiligheid.
- Stap 4 – Het samenvatten (trechteren) van de ketens tot de belangrijkste aspecten.
- Stap 5 – Het maken van een analyse van kansen en uitdagingen voor de toekomst per keten.

Het trechteren van informatie is iets wat wij veel hebben moeten doen om op een leesbare manier van algemene technische beelden tot specifieke inzichten te komen. De reden hiervoor is dat over het hoofdthema heel veel ideeën, beelden en informatie voorhanden is, maar dat deze informatie vaak niet logisch is gestructureerd om een goed overzicht te vormen van de kansen en uitdagingen van de verschillende ketens en stoffen. Daarom is er in overleg met de opdrachtgever voor gekozen om via tussenstappen te werken van algemene technische beelden en informatie naar specifieke kennis in een rapportage die ook voor niet-technisch ingevoerden leesbaar is.

Ketens

In dit rapport onderscheiden wij op dit moment de volgende kansrijke verschijningsvormen van waterstof (andere ketens worden ook aangestipt in hoofdstuk 2 van dit rapport):

- Pure waterstof in gasvorm (standaard onder hoge druk).
- Pure waterstof in vloeibare vorm (sterk gekoeld).
- Vloeibare organische waterstofdragers (LOHC's).
- Ammoniak (als molecuul NH_3) onder druk of gekoeld tot vloeistof.

Deze verschijningsvormen van waterstof zijn aan de hand van twee criteria verder uitgewerkt: 1) Welke duurzame waterstofrijke energiedragers worden nu al toegepast of zijn in ontwikkeling, en 2) Wat is hun perspectief voor de nabije toekomst? Hiervoor kijken wij niet alleen naar de stof op zich, maar naar de gehele keten (dus ten aanzien van productie, conversie, opslag, verlading en transport over weg, water, spoor en door buisleidingen) en de gehele cyclus (waardeketen) van productie tot eindgebruik. Voor elk ketenonderdeel hebben wij naast algemene overwegingen bij de keten ook de volgende aspecten beschouwd: veiligheid/ ruimtelijke consequenties in directe en ruimere omgeving, uitstoot en restproducten, maatschappelijke consequenties en mogelijke mitigerende maatregelen.

Uitkomsten

In algemene zin zien wij dat:

- De transportmodaliteiten weg en spoor elkaar niet ontlopen qua omgevingsveiligheid, maar wel dat voor alle ketens geldt dat transport over spoor een significant aandachtspunt heeft, namelijk dat de risicoplafonds in het basisnet spoor snel overschreden dreigen te worden.
- Gasvormige waterstof de enige geschikte drager is voor gebruik in de gebouwde omgeving.
- De beschouwde ketens, behalve gasvormige waterstof, alleen in aanmerking komen voor transport tussen min of meer industriële locaties. Dit heeft onder andere met de toepassingen van deze dragers te maken en dat omzetting naar gasvormige waterstof in een min of meer industriële omgeving moet plaatsvinden.
- Buisleidingen qua veiligheid de optie zijn met de minste ruimtelijke en sociale impact voor transport en distributie van gasvormige waterstof naar de gebouwde omgeving.
- Transport via buisleidingen over het algemeen de minste aandachtspunten heeft op het gebied van veiligheid.
- De LOHC-ketens relatief weinig significante aandachtspunten hebben wanneer deze worden toegepast in industriële omgeving. Daarnaast zijn de risicocontouren voor opslag relatief klein wat het geschikt maakt voor opslag van grotere volumes.

Verder zien wij de volgende uitkomsten bij de behandelde ketens:

Waterstof

De verwachting is dat in eerste instantie (komende 5-10 jaar) de waterstofketen nog geen grote vlucht zal nemen. De eerste jaren zal er wel groei zijn, met name van het vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg (omwille van de bevoorrading van multi fuel tankstations). Op langere termijn (10 jaar en verder) is de kans groot dat deze door buisleidingen (kleinschalige leidingen) bevoorrad worden, of dat de productie van waterstof hier lokaal zal gaan plaatsvinden. Ten aanzien van opslag en transport zijn er voor zowel gasvormig als vloeibare waterstof veel significante aandachtspunten, die ten opzichte van elkaar verschillen. Vloeibare gekoelde waterstof mag bijvoorbeeld niet over binnenwater vervoerd worden en kan niet door buisleidingen door de fysische eigenschappen. Gasvormige waterstof wordt onder hoge druk getransporteerd en bij transport over de weg zijn meer transporten nodig dan bij gekoeld waterstof voor dezelfde hoeveelheden. Gasvormig heeft op het gebied van transport op de langere termijn betere vooruitzichten dan vloeibare waterstof, en op het gebied van opslag zijn er meer mogelijkheden. Op dit moment zijn nog weinig veiligheidsvergrotenende maatregelen concreet te maken en moet vooral gedacht worden aan het toepassen van bestaande wet- en regelgeving rondom omgevingsveiligheid en transportmodaliteiten, zoals Europese richtlijnen rond weg-, water- en spoortransport (ADR, ADN en RID) en nationale wetgeving rond het Basisnet en BRZO-bedrijven.

LOHC

LOHC's (met name Tolueen – Methylcyclohexaan) zijn bekende stoffen in de chemische industrie waar al veel ervaring mee is. Opslag is relatief eenvoudig en kan met weinig extra risico's. Veel veiligheidsbevorderende richtlijnen staan al beschreven in de zogeheten PGS-reeks, waarop aangesloten kan worden. Wanneer de LOHC-variant DBT-PDBT een grote ontwikkeling doormaakt, is de productie van tussenproduct DBT een belangrijk aandachtspunt; hiervoor is namelijk ook chloor vereist. Wanneer de productie van DBT in Nederland plaatsvindt betekent dit dat chloor op productielocaties moet komen en chloortransporten zullen plaatsvinden. Dit is in het verleden altijd onwenselijk gevonden, waardoor chloortransporten een gereguleerd regime kennen. Wanneer de productie van DBT niet in Nederland plaatsvindt of wanneer Tolueen – Methylcyclohexaan wordt toegepast, is LOHC een serieuze optie. Voor transport over weg, water en spoor zijn geen grote verschillen tussen de beide LOHC-ketens geconstateerd. Transport via spoor loopt echter mogelijk tegen de risicoplafonds van het basisnet aan. Transport via de weg heeft een beperkt aantal aandachtspunten en transport over water zal naar verwachting helemaal geen problemen opleveren. Omdat LOHC's ook een retourstroom vragen van een LOC-stroom (vrij vertaald is dit de stof waar de waterstofmoleculen 'uitgehaald' zijn), zal het aantal transportbewegingen van gevaarlijke stoffen verdubbelen, en de risicoplafonds van de basisnetten weg en spoor sneller kunnen bereiken. Tolueen – Methylcyclohexaan kan echter ook via buisleidingen worden getransporteerd (ook via een retourstroom) en brengt weinig aandachtspunten met zich mee.

Ammoniak

De verwachting is dat op korte termijn de ammoniakketen al op gang komt door grootscheepse import. Na aankomst in de zeehavens zal het verder getransporteerd worden naar industriële locaties. Voor productie, conversie, verlading en opslag zijn de aandachtspunten op het gebied van veiligheid vergelijkbaar voor onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak en gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak.

Door de hogere druk van onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak is kans op een ongeluk en de impact bij een ongeluk groter. Gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak wordt onder lagere drukken opgeslagen, waardoor de impact in veel gevallen kleiner is. Onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak kan over lange afstanden door buisleidingen getransporteerd worden. Voor gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak voorzien wij dit alleen in korte buisleidingen op industriële locaties.

De rijksoverheid werkte naar aanleiding van de Ketenstudies uit 2004 al lange tijd aan het uitbannen van ammoniaktransport over de weg en het spoor, om zo de risico's van deze stof te beperken. Ammoniak is immers net als chloor zeer toxisch en heeft effecten tot op grote afstanden van een incident. Een mogelijke intensivering van deze stromen over weg en spoor lijkt daarom haaks op vigerend beleid te staan, waarin transporten ontmoedigd worden en gezocht wordt naar het bij elkaar brengen van productie- en gebruikslocaties van ammoniak. De ontwikkelingen rond ammoniak kunnen zorgen dat heroverweging van dit beleid moet plaatsvinden, óf dat ammoniak niet de voorkeur zal hebben als waterstofdrager in de energietransitie. Mocht ammoniak in de energietransitie een grote vlucht nemen, dan zal de rijksoverheid een uitspraak moeten doen over de wenselijkheid van ammoniak en hier, indien nodig, nieuw beleid rond formuleren.

Mitigerende maatregelen zijn complex om specifiek te maken, omdat deze van de context afhangen. Bij groei van de ammoniakvraag is het aan te raden om productie, opslag en gebruik op zoveel mogelijk dezelfde locatie plaats te laten vinden. Het mitigeren van risico's door de constructieve veiligheid van de tankwagens te vergroten kan in principe ook, maar vraagt aanpassing van internationale afspraken en zal zeer veel tijd vergen om aan te passen, en is daarmee niet reëel. Overige maatregelen zitten met name in het toepassen van bestaande wet- en regelgeving rondom omgevingsveiligheid en transportmodaliteiten, zoals Europese richtlijnen rond weg-, water- en spoortransport (ADR, ADN en RID) en nationale wetgeving rond het Basisnet en BRZO-bedrijven.

Onderlinge vergelijking van de waterstofdragers

Wanneer waterstof, ammoniak en LOHC's onderling met elkaar vergeleken worden, dan kennen alle drie de ketens voordelen en uitdagingen ten opzichte van elkaar. Zo kan voor waterstof (gasvormig) een deel van de buisleidinginfrastructuur hergebruikt worden. Voor LOHC's en ammoniak zou dit nieuw moeten worden aangelegd. Daarnaast heeft waterstof minder transportbeperkingen en is het niet toxisch zoals ammoniak. Waterstof hoeft in zuivere vorm niet gebonden of ontbonden te worden van andere stoffen, zoals bij LOHC's en ammoniak wel het geval is. Uitdagingen van waterstof zijn het explosieve karakter van de stof en dat transport over weg, water en spoor uitdagingen kent.

LOHC's zijn weliswaar brandbaar en kunnen toxisch zijn, maar zijn veel minder toxisch dan ammoniak en veel minder brandbaar dan waterstof. Veiligheidsaspecten rond transport en opslag zijn hierdoor kleiner. Vrijkomen van de stof bij een incident is nog altijd ongewenst en kan tot milieuschade leiden. Alle transportmodaliteiten zijn geschikt voor LOHC's, met uitzondering van buisleidingen voor DBT-PDBT.

Van de waterstofdragers is ammoniak wel verreweg de meest toxische. Ammoniak is daarnaast brandbaar en explosief, maar in veel mindere mate dan waterstof. Ammoniak heeft als voordeel dat het op korte termijn al vrij groot kan worden als waterstofdrager. Ook kan de stof zelf gebruikt worden als energiedrager zonder dat er CO₂ vrijkomt, maar in dat geval is er wel NO_x als restproduct.

Tot slot

Het is niet de bedoeling van dit onderzoek om aan te geven welke van de verschillende waterstofketens de 'goede', 'betere' of 'beste' is. Die invulling hangt vanzelfsprekend ook af van heel andere factoren, zoals kosten, investeringen, politieke gevoeligheden en toekomstige ontwikkelingen die wij op dit moment nog niet (kunnen) voorzien. Het is de bedoeling van dit onderzoek om de voordelen en uitdagingen van de verschillende waterstofketens aan te geven en op overzichtelijke wijze aan te geven welke veiligheidsaspecten hierbij horen. Voor een goede en complete afweging van de kansen en uitdagingen rondom de energietransitie, is het belangrijk dat die veiligheidsoverwegingen een plek kunnen krijgen in toekomstige besluiten. Dankzij de uitkomsten die in dit rapport staan opgenomen is dat vanaf nu mogelijk.

1. Introductie

1.1 Achtergrond

Samen met andere maatschappelijke actoren werkt de Nederlandse overheid aan het volledig verduurzamen van de energievoorziening. In die energievoorziening gaan duurzame waterstofrijke energiedragers een grote rol spelen. Deze dragers kunnen – eenvoudiger dan elektriciteit – worden opgeslagen en getransporteerd over lange afstanden en hebben toepassingen in de industrie. Wel zijn er potentiële risico's, onder andere voor de externe veiligheid. Deze veiligheidsrisico's kunnen spelen over de gehele keten van de productie tot eindgebruik. Daarom is het belangrijk inzicht te hebben in deze risico's, zodat dit bij het maken van beleidskeuzes kan worden meegewogen.

1.2 Vraagstelling

Arcadis en Berenschot hebben samen voor het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) dit onderzoek uitgevoerd met als doel om inzicht, ondersteuning, advies en richting te kunnen geven, zodat de omgevingsveiligheid goed kan worden meegewogen binnen nieuw of aangepast beleid. Onder externe veiligheid verstaan wij: de kans dat personen in de omgeving van een activiteit waar met gevaarlijke stoffen wordt gewerkt of waar deze stoffen worden getransporteerd, slachtoffer worden van een ongeval met die stoffen. Anno 2021 wordt de term omgevingsveiligheid veel meer gebruikt voor het duiden van risico's rond de productie, transport en opslag van gevaarlijke stoffen. In het vervolg van dit rapport zullen we het daarom hebben over omgevingsveiligheid. Mocht ergens toch externe veiligheid gebruikt worden, dan moet dat gezien worden als synoniem voor omgevingsveiligheid. Hiervoor is een eenduidig overzicht nodig van de verschillende duurzame waterstofrijke energiedragers, de transportopties en welke kansen en uitdagingen deze met zich meebrengen ten aanzien van veiligheid. Op basis van het overzicht dat in dit rapport gegeven wordt, kan een helder beeld gevormd worden van de effecten van bepaalde energiedragers op de omgevingsveiligheid.

In dit onderzoek stonden drie hoofdvragen centraal:

1. Welke duurzame waterstofrijke energiedragers worden al toegepast of zijn in ontwikkeling, en wat is hun perspectief voor de nabije toekomst?
2. Welke transportketens zijn daarvoor al in beeld, en lijken voor de toekomst relevant?
3. Welke veiligheidsrisico's zijn er per keten, en welke ruimtelijke consequenties zijn daaraan verbonden?

1.3 Afbakening en werkwijze

1.3.1 Doel

Zoals aangegeven is het doel van dit onderzoek om voor de mogelijke energiedragers een overzicht te geven van de kansen en uitdagingen, die deze rond omgevingsveiligheid hebben. Daarnaast was het doel om de informatie ook leesbaar te houden voor technisch minder of niet ingewijden. Wij geven in dit onderzoek naar de verschillende waterstofketens geen oordeel over welke keten de 'goede', 'betere' of 'beste' keten is. Die invulling hangt ook af van andere factoren, zoals kosten, investeringen, politieke gevoeligheden en toekomstige ontwikkelingen die wij op dit moment nog niet (kunnen) voorzien. Dit rapport is opgezet om wat betreft het aspect veiligheid een overzicht te geven, die de keuze voor een keten of een onderdeel van een keten mogelijk maakt. Het kiezen van een eventuele voorkeursvariant is aan de lezer na het afwegen van alle aspecten, waaronder het aspect veiligheid.

1.3.2 Methode

Dit rapport geeft de belangrijkste inzichten weer van een uitgebreid syntheseonderzoek, waarbij allerlei bestaande bronnen geanalyseerd en verwerkt zijn. Binnen dit onderzoek hebben wij verschillende stappen uitgevoerd om alle informatie die al voorhanden is, te trechteren tot dit rapport. Trechteren van informatie is iets wat wij veel hebben moeten doen om op een leesbare manier van algemene technische beelden tot specifieke inzichten te komen. De reden hiervoor is dat over het hoofdthema heel veel ideeën, beelden en informatie voorhanden zijn, maar vaak niet logisch gestructureerd zijn, om een goed overzicht te vormen van de kansen en uitdagingen van de verschillende ketens en stoffen. Daarom is, in overleg met de opdrachtgever, een begeleidingscommissie en een klankbordgroep, ervoor gekozen om via tussenstappen te werken aan algemene technische beelden en informatie naar specifieke kennis, die ook voor niet-technisch ingevoerden leesbaar is. Vandaar dat in dit rapport ervoor gekozen is om uitgebreide bijlagen op te nemen van de tussenstappen die wij gezet hebben, om van algemene informatie (inclusief soms enkele technische termen, vergelijkingen en informatie) naar specifieke kennis te komen. Deze trechtering zal ook in hoofdstuk 3 nog een keer toegelicht worden.

In algemene zin hebben wij volgens onderstaande stappen gewerkt om tot dit rapport te komen.

Stap 1 – Verkennen & beschrijven van dragers en transportketens

De eerste stap die wij hebben gezet had als doel een volledig en helder overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen in de Nederlandse waterstofmarkt (nu en in de toekomst met een scope van grofweg 30 jaar) te schetsen. Om tot dit overzicht te komen, hebben wij eerst gekeken naar de verschillende vormen waarin waterstof als duurzame energiedrager kan worden ingezet. Hiervoor hebben wij veel literatuur beschouwd en met een groot aantal stakeholders en betrokken partijen gesproken (vooral in de vorm van een begeleidingscommissie en een klankbordgroep, maar ook een aantal gesprekken) om van hen beelden en ideeën te krijgen over de kansen en uitdagingen van de ketens (zie hoofdstuk 2).

In dit onderzoek beperken we de behandeling van ketens tot Nederland. Wij zien natuurlijk ook dat ontwikkelingen in een breed internationaal domein plaatsvinden. Gegeven de snelheid en de variëteit van de ontwikkelingen is een scherpe en brede blik op het buitenland onmisbaar. We benadrukken in deze stap daarom wel de import en export van waterstof, juist ook omdat de behoefte aan deze energiedrager zienderogen zal toenemen en er voor de komende decennia een wereldhandel inclusief concurrentie tussen landen tegemoet wordt gezien.

Stap 2 – Selecteren relevante combinaties van dragers en transportmodaliteiten

Het doel van deze tweede stap was het uitsélectioneren van relevante combinaties van waterstofvariant en modaliteit. Omdat de ene technisch-chemische en/of economische ontwikkeling kansrijker is dan de andere en omdat er mondiaal grote behoefte bestaat aan massaproductie én flexibiliteit voor de waterstofketen mocht de trechtering niet te rigoureus uitpakken. De waterstofketens zijn daarom beoordeeld naar de huidige stand van zaken, waardoor nu nog prille initiatieven en ideeën die over vijf jaar grote innovaties zouden kunnen zijn, hier niet beoordeeld zijn. Hier hebben wij de gezamenlijke kennis van ons als de uitvoerenden, respondenten uit het veld en een begeleidingsgroep¹ gebruikt om tot een zestal logische ketens te komen. Vanzelfsprekend kan hierover van mening verschild worden, maar momenteel zien wij dit als de meest kansrijke ketens, met de afbakening dat dit niet als dé voorspelling van de toekomst moeten gezien worden, maar als mogelijke toekomst scenario's. In paragraaf 2.2 - 2.7 werken wij de keuzes die hier gemaakt zijn verder uit.

¹ In bijlage F hebben wij een overzicht van geconsulteerde partijen opgenomen. Namen, rollen en functies staan er om privacy redenen niet in.

Stap 3 – Kwalitatieve analyse ketens op (omgevings)veiligheid

In stap 3 hebben wij een kwalitatieve analyse van de ketens gemaakt op het aspect veiligheid. Hiervoor hebben wij een algemene omschrijving van de activiteit (de 'overwegingen') gegeven, maar lag de nadruk in grote mate op omgevingsveiligheid in de nabijheid (denk aan 10-30 meter van de activiteit) en verder weg van de activiteit (tot maximaal enkele kilometers). Ook hebben wij de maatschappelijke consequenties, percepties, uitstoot en restproducten en de mogelijkheid tot mitigerende maatregelen belicht. Deze inspanningen zijn in bijlage C opgenomen.

Stap 4 – Samenvatten ketens

Bijlage C hebben wij vervolgens samengevat in een nieuwe tabel. Hierin zijn de belangrijkste inzichten uit bijlage C verzameld en hebben wij aangegeven of een onderdeel van de keten weinig, gemiddeld of veel aandachtspunten heeft, door middel van een neutrale kleurcodering. Deze samenvattingen zijn opgenomen in bijlage D. De leerpunten van de samenvattingen hebben wij in hoofdstuk 3 opgenomen met de overwegingen en aandachtspunten, én wat daarbij ons inzicht is over wat die keten qua veiligheid typeert. In hoofdstuk 3 geven wij deze methode van trechters ook weer in een figuur ter verduidelijking.

Stap 5 – Analyse kansen en uitdagingen per keten

Tot slot hebben wij alle informatie gestructureerd om per keten aan te kunnen geven wat de kansen en uitdagingen zijn rondom de keten zelf, en de veiligheidsaspecten die daarbij komen kijken. In hoofdstuk 3 hebben wij de ketens tegen elkaar afgezet om deze onderling te vergelijken. Wij trekken hierbij geen conclusies over welke ketens wat ons betreft de voorkeur zouden hebben, dit laten wij aan de lezer.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 gaan wij in op de typering van de verschillende waterstofdragers. Wij geven daar aan hoe de ketens eruitzien, welke kansrijk zijn en welke wij uiteindelijk behandelen in hoofdstuk 3. In dat hoofdstuk geven wij een overzicht van de kansen en uitdagingen bij de ketens die kansrijk zijn. Daarnaast is een voorname rol weggelegd voor de bijlagen C en D waar een groot deel van de inhoudelijke uitwerking is opgenomen. Deze zijn als naslagwerk toegevoegd voor de inhoud die in hoofdstuk 2 en 3 is opgenomen.

Mocht u vragen hebben over dit rapport, de aanpak, uitkomsten of iets anders, dan kunt u contact opnemen met Vincent van der Vlies via 06-55364831 of v.vandervlies@berenschot.nl.

2. Typering van de dragers

De eerste stap die wij hebben gezet, heeft als doel het schetsen van een ruim en helder overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen in de Nederlandse waterstofmarkt, nu en in de nabije toekomst. Paragraaf 2.1 beschrijft op globaal niveau de belangrijkste ontwikkelingen. Paragraaf 2.3 gaat dieper in op de verschillende vormen waarin waterstof als duurzame energiedrager kan worden ingezet. Voor deze verschillende verschijningsvormen beschrijven wij beknopt de manier van produceren, de fysische en chemische eigenschappen, de belangrijkste toepassingen en de waardeketen.

2.1 Welke waterstofdragers bestaan in waterstofland?

Voordat de individuele waterstofdragers en bijbehorende ketens geschetst worden, geven we eerst een algemeen overzicht van de globale waterstofmarkt, die momenteel een ongekende groei meemaakt in omvang en diversiteit. 'Waterstofland' is hier de fictieve naamgeving voor de groep van stoffen en technische middelen die – in de keten 'van wieg tot graf' – in gebruik zijn voor, of in de aandacht staan van, het toepassen van waterstof (het molecuul H_2) als energiedrager, of als grondstof. Omdat waterstof zowel energiedrager als grondstof kan zijn, maken we dit onderscheid wanneer dit relevant is. Als energiedrager zijn er twee hoofdstromen; waterstof wordt omgezet in elektriciteit (in een brandstofcel), of waterstof wordt rechtstreeks als brandstof ingezet (in reactie met zuurstof). Als grondstof kent waterstof vele toepassingen.

Omdat waterstof (als molecuul H_2) niet vrij in de natuur voorkomt (afgezien van de enorme hoeveelheid in het heelal, denk bijvoorbeeld aan de zon), is voor het toepassen van waterstof een eerste stap (productie, synthese, productie) nodig om het te maken. Eenmaal gemaakt is het in veel gevallen aan de orde om de stof op te slaan en/of te transporteren, om het vervolgens op een gegeven moment en op een bepaalde plaats toe te passen. Waterstof zal dan in een zekere verschijningsvorm voorkomen. Aangezien de randvoorwaarden zoals de chemische, fysische en biologische eigenschappen, de milieu- en veiligheidsaspecten, de economische factoren en de wet- en regelgeving medebepalend zijn voor de gekozen verschijningsvorm van waterstof, kent Waterstofland verscheidene 'bewoners'. Juist in deze tijd met grote ontwikkelingen rondom de energietransitie, is niet alleen pure waterstof aan de orde, maar ook een aantal H-dragers met een andere identiteit. Momenteel zijn vooral ammoniak (NH_3), de zogeheten LOHC's (*liquid organic hydrogen carriers*), metaalhydriden en enkele losse, organische moleculen (met name mierenzuur en methanol) in beeld als (tijdelijke) waterstofdragers. Deze verbindingen lichten wij in de volgende paragraaf uitgebreid toe.

Op dit moment wordt grofweg de helft van de totale energievraag van Nederland geïmporteerd (EBN, 2021). Het merendeel van deze import betreft (aard)olie(producten). Door de afbouw van de aardgaswinning zal Nederland de komende jaren nog meer afhankelijk worden van de import van energie. De verwachting is dat Nederland richting 2050 ook niet zelfvoorzienend zal zijn op het gebied van energie. Het ligt dus voor de hand dat er ook op grote schaal waterstof (of -dragers) geïmporteerd zal worden uit het buitenland. Op internationaal niveau begint er steeds meer consensus te komen, welke dragers geschikt zijn om waterstof intercontinentaal te transporteren. De belangrijkste kandidaten zijn sterk gekoelde, vloeibare waterstof, of waterstof gebonden in een andere stof, zoals een LOHC of ammoniak. Voor transport en distributie over kortere afstanden (tot 1000km) lijken buisleidingen (voor gasvormige waterstof) de meest geschikte optie. Daarnaast vervullen de zeehavens een doorvoerfunctie naar de rest van Europa. Een aannemelijk scenario is dat waterstof deels in eigen land geproduceerd wordt en deels per schip geïmporteerd wordt uit andere landen en continenten in één van de eerdergenoemde verschijningsvormen. De zeehavens blijven dan als een energiehub dienen.

Eenmaal in een haven aangekomen zijn verscheidene vervolgactiviteiten denkbaar, waaronder overslag, opslag of direct gebruik. Met andere woorden, de stof wordt ofwel verder vervoerd naar industrie of het achterland (vooral België en Duitsland), dan wel tijdelijk opgeslagen of omgezet in gasvormige waterstof en via buisleidingen gedistribueerd door Nederland.

Ondanks dat de genoemde transportmodaliteiten en verschijningsvormen de meest voor de hand liggende opties lijken, sluiten we andere vormen niet bij voorbaat uit. Waterstofland is nog volop in ontwikkeling en het is nog niet met zekerheid te zeggen welke kant het op zal bewegen. Daarnaast kan het ook zo zijn dat op nationaal niveau, andere vormen wel kansrijk zijn of dat de vraag naar een bepaalde verschijningsvorm of drager vanuit het buitenland ontstaat. Juist ook het meewegen van veiligheid als criterium kan de keuzes beïnvloeden.

2.2 Beschrijving verschijningsvormen en ketens

2.2.1 Algemene beschrijving ketens

In waterstofland zien wij op dit moment de volgende verschijningsvormen van waterstof:

- Pure waterstof in gasvorm (standaard onder hoge druk)
- Pure waterstof in vloeibare vorm (sterk gekoeld)
- Vloeibare organische waterstofdragers (LOHC's)
- Ammoniak (als molecuul NH_3) in gasvorm of als vloeistof (gekoeld)
- Mierenzuur
- Metaalhydriden
- Synthetische brandstoffen (niet bedoeld om waterstof uit vrij te maken).

Wij werken deze verschijningsvormen van waterstof onderstaand verder uit, mede aan de hand van twee facetten:

1. Welke duurzame waterstofrijke energiedragers worden nu al toegepast of zijn in ontwikkeling?
2. Wat is hun perspectief voor de nabije toekomst?

Hiervoor kijken wij niet alleen naar de stof op zich, maar naar de gehele keten. Hieronder verstaan wij de hele cyclus (waardeketen) van productie tot eindgebruik, zoals hieronder weergegeven (waarbij onderdelen van de ketens meer dan eens en ook op andere plaatsen terug kunnen komen):



Figuur 1: algemene waardeketen van waterstof

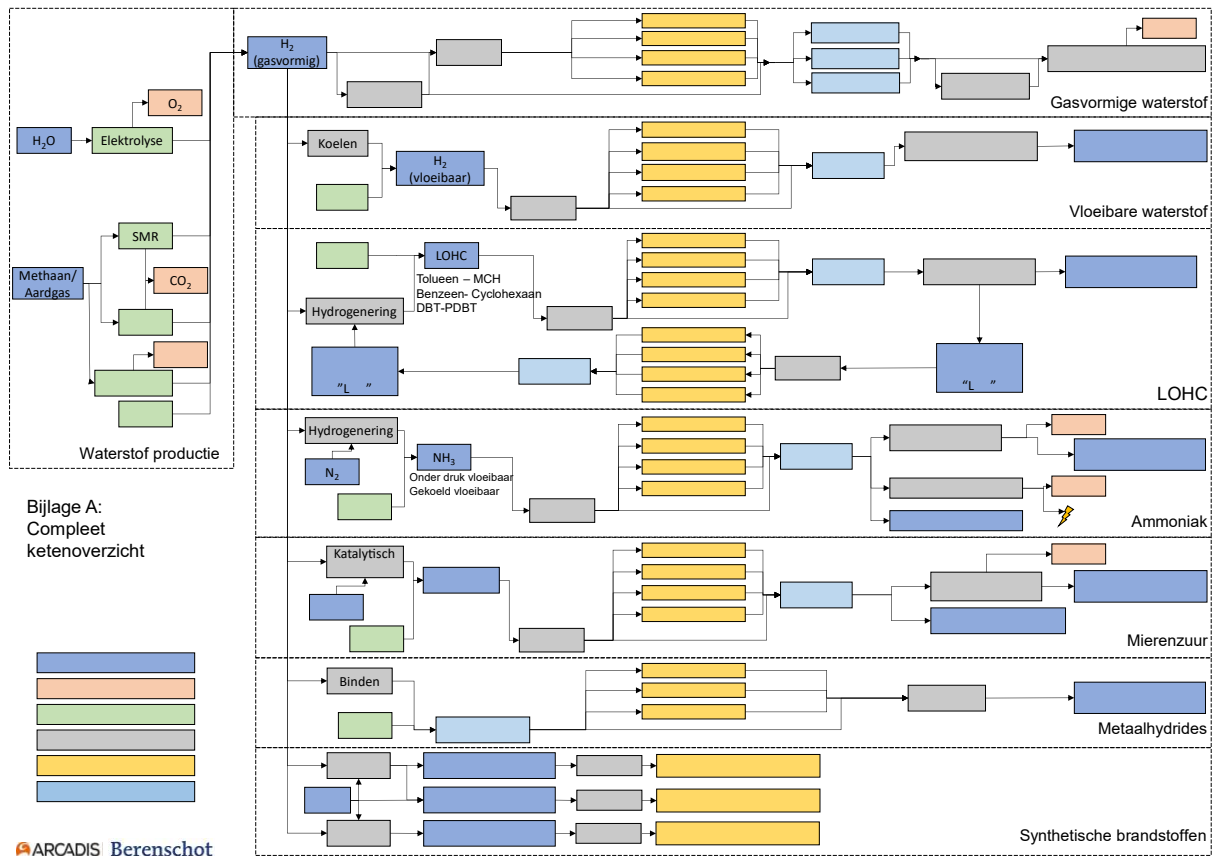
Onder de verschillende onderdelen van de keten verstaan wij het volgende:

- **Productie:** hieronder verstaan wij de productie (grijs, blauw en groen) van waterstof of invoer van waterstof of één van de (bouwstenen voor de) andere verschijningsvormen.
- **Conversie of bewerking:** in veel gevallen is een conversiestap nodig, bijvoorbeeld het koelen tot vloeibare waterstof, het hydrogeneren van een verbinding tot een LOHC of het produceren van ammoniak. Aan het einde van de keten is vaak een omgekeerde stap nodig om de waterstof vrij te maken (NB: omzetting kan meer dan eens in de keten plaatsvinden).
- **Verlading:** het verladen van de waterstofdrager van een opslag naar een transportmodaliteit of van de ene transportmodaliteit naar de andere.
- **Transport:** verschillende transportmodaliteiten per verschijningsvorm. Hierbij worden de volgende modaliteiten beschouwd die meer dan eens in de keten kunnen voorkomen:
 1. Transport door middel van buisleidingen
 2. Transport via het wegennet
 3. Transport over het spoor
 4. Transport over water

- **Opslag/Buffering:** In afwachting van het gebruik is in vele gevallen buffering nodig. Denk hierbij niet alleen aan terminals en opslagtanks voor vloeistoffen (zoals LOHC's) of gasen, maar ook aan ondergrondse opslag in bijvoorbeeld zoutcavernes en lokale opslag (bijvoorbeeld bij multi fuel tankstation).
- **Voorbereiding eindgebruik:** het feitelijke eindgebruik behoort niet tot de (transport)keten, de eventuele omzettingen wel. De eindgebruiker is meestal (grotendeels) onafhankelijk van de gekozen transportmodaliteit en is vooral geïnteresseerd in het benutten van de waterstof (als energiedrager of als grondstof).

2.2.2 Totale ketenoverzicht

In algemene zin zien de ketens voor alle waterstofdragers er als volgt uit.



Figuur 2: Totaaloverzicht beschouwde waterstofketens. Zie bijlage A voor dit schema op groter formaat.

Niet elke vorm doorloopt de volledige keten of in de geschetste volgorde. Gasvormige waterstof hoeft bijvoorbeeld niet omgezet te worden en buffering kan ook plaatsvinden op de locatie van de eindgebruiker. Daarnaast kan het ook voorkomen dat meerdere ketens gecombineerd worden.

Bijvoorbeeld: LOHC wordt geïmporteerd vanuit het buitenland en in de haven opgeslagen in tanks. Vervolgens wordt het op deze locatie via dehydrogenatie waterstof ontbonden van de drager en vervolgens getransporteerd via een pijpleiding naar de eindgebruiker. Deze combinaties van ketens zijn niet opgenomen in het overzicht omdat de individuele schakels al in beeld zijn. Mogelijke relevante combinaties van ketens zullen wel in dit hoofdstuk toegelicht worden.

Niet elke keten is even kansrijk. Om deze ketens te waarderen in hoeverre deze een relevante ontwikkelingen kunnen zijn, behandelen wij deze eerst afzonderlijk in de volgende paragraaf.

2.3 Basisvergelijking waterstofdragers

Het is voor een zuivere vergelijking, tussen waterstof in pure vorm en waterstof in gebonden vorm, relevant om de chemische invalshoek te beschouwen, omdat deze in hoge mate objectief is en veelzeggend voor de mogelijkheden en onvermijdelijke consequenties van het toepassen van dragers. Het gaat om eigenschappen die niet te veranderen zijn en daarom een hoofdrol spelen in de uiteindelijk te maken afwegingen.

Wanneer je waterstof op één of andere manier *maakt*, produceer je het molecuul H_2 , bestaande uit twee waterstofatomen. Wanneer je waterstof wilt *gebruiken*, is het noodzakelijk om hetzelfde molecuul H_2 beschikbaar te hebben, want anders gebruik je geen waterstof, maar een andere chemische stof. Dit onderscheid is belangrijk, omdat het de kern vormt van deze studie.

In een chemisch gebaseerde benadering kijk je voornamelijk naar de elementaire formules, de molaire standaarden en de atoommassa's. We kijken onderstaand niet alleen naar de stoffen, maar tegelijkertijd naar een fictief transport over een vaste afstand en de schaalconsequenties die daarbij komen kijken (in tonnage). Deze technische uitleg is wat ons betreft nodig, om aan te geven dat niet elke keten evenveel kans heeft om groot op in te zetten, omdat daar negatieve schaalconsequenties in te voorzien zijn.

Een chemische, theoretische vergelijking als voorbeeld

Naast een bepaalde hoeveelheid, in dit geval **1 ton H_2** als basiseenheid, is voor een theoretische eenheid ook de af te leggen afstand een nuttig ingrediënt. Een afstand van **100 km** is gekozen als standaard. Samen leidt dit tot de volgende basiseenheden:

- 1 ton H_2 (ofwel 1000 kg H_2) => kent in deze beschouwing **1 t H_2** als eenheid/symbool.
- 1 ton H_2 vervoeren over afstand van 100 km (stel S) = 1 t H_2 *S

Voor pure waterstof (zowel gasvormig, onafhankelijk van de druk, als vloeibaar) $\approx$ 1 t H_2

De andere dragers van waterstof, zoals ammoniak, zijn te relateren aan deze eenheden:

- 1 ton ammoniak (NH_3) levert in het ideale geval, gegeven de reactie $2 NH_3 \rightarrow N_2 + 3 H_2$, een hoeveelheid van 0,176 ton H_2 . In de gegeven schrijfwijze: 0,176 t H_2 . Men moet dus **5,66 ton** ammoniak transporteren, om daar 1 ton waterstof uit vrij te kunnen maken.
- 1 ton ammoniak levert in de praktijk (met incalculeren van productie-/opbrengstverliezen) $\alpha(0,176)$ ton H_2 , waarbij $\alpha < 1$. Dus in praktische zin is ruim 5,66 ton ammoniak nodig om daaruit 1 ton H_2 vrij te maken.

Hetzelfde kunnen we als voorbeeld doen voor natriumboorhydride:

- 1 ton natriumboorhydride ($NaBH_4$) levert in het ideale geval, gegeven de reactie: $NaBH_4 + 2 H_2O \rightarrow NaBO_2 + 4 H_2$, een hoeveelheid van 0,212 ton H_2 . Men moet dus **4,73 ton** natriumboorhydride transporteren, om daar 1 ton waterstof uit vrij te kunnen maken.
- Het zij opgemerkt, dat er een bijproduct $NaBO_2$ (natrium metaboraat) als reactieproduct vrijkomt, dat bij voorkeur kan worden benut (om opnieuw $NaBH_4$ te maken, of anderszins wordt toegepast).

Tot slot nog eenzelfde vergelijking voor methylcyclohexaan en perhydropdibenzyltolueen:

- 1 ton methylcyclohexaan (MCH) levert in het ideale geval een hoeveelheid van 0,061 ton H_2 , ofwel men moet **16,33 ton MCH** transporteren voor 1 ton H_2 .
- Voor perhydropdibenzyltolueen (PDBT) geldt dat het per ton maximaal 0,066 ton H_2 oplevert, en omgekeerd is 15,11 ton PDBT nodig voor 1 ton waterstof. Bovendien moet voor het 'retourtransport' (NB: zie hoofdstuk 2 voor een uitleg over het retourtransport) van DBT naar de locatie van hydrogeneren dus 14,11 ton DBT worden vervoerd, zonder rechtstreeks profijt qua energiebron/waterstof, het is een noodzakelijk onderdeel van de keten.

Deze vergelijkingen zijn hier niet bedoeld om te integreren in de veiligheidsconsequenties en -complicaties, maar om het besef te versterken dat er vanwege het lage gewicht van waterstof bij transport, inherent een andere schaalgrootte aan de orde komt bij het toepassen van waterstofdragers. Bij transport kan dat diverse gevolgen hebben. Terwijl buisleidingen in dit opzicht redelijk ongevoelig zijn voor eigenschappen als gewicht of volume, is dat anders voor het vervoer over spoor, weg en water. Denk bijvoorbeeld aan toenemende hoeveelheden transport op het spoor: grotere hoeveelheden betekent meer transport, wat tot meer drukte op het spoor leidt en grotere kans op ongevallen en daarmee grotere risico's voor de omgeving. Dit heeft ook invloed op het aantal tankauto's dat je nodig zult hebben. Hierbij betekent meer vervoer over de weg ook een grotere kans op ongevallen en dus een groter risico. Daarom is voor een transport over 100 km ook niet zomaar altijd dezelfde afweging te maken als over 1, 10 of 1000 km, gelet op vervoermiddel en niet te vergeten, gelet op de daadwerkelijke route met zijn (bebouwde) omgeving.

De (on)veiligheid van het transporteren over 100 km kent twee cruciale parameters, de bron en de omgeving. In de bron (weg, water, spoor, buisleiding) kunnen risico's variëren, afhankelijk van onder meer de lokale infrastructuur en verkeersdrukte; deze komen tot uiting in het PR (plaatsgebonden risico). In de omgeving kunnen de risico's variëren, afhankelijk van de bevolkingsdichtheid en de aard van de objecten en bestemmingen; deze komen tot uiting in het GR (groepsrisico) in de huidige wetgeving, en worden visueel zichtbaar in de aandachtsgebieden in de toekomstige wetgeving. De betrokkenen bij een transport, in het geval dat men 1 ton H_2 (of x ton waterstofdrager) op locatie A heeft, en die men op 100 km afstand bij locatie B wil benutten in de vorm van opnieuw 1 ton H_2 , heeft dus velerlei vraagstukken te beoordelen dan louter veiligheid. Wij richten ons nu echter vooral op dat laatste aspect.

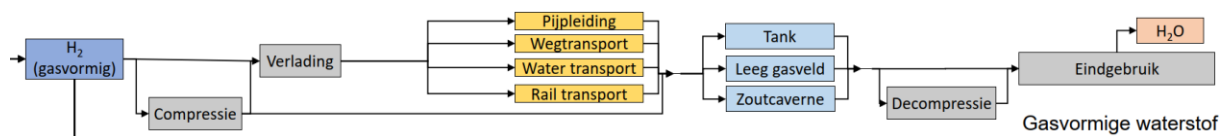
In het bovenstaande is een objectivering gemaakt voor het vervoeren van equivalente gewichten van *de lading* als zodanig; de lading is de vorm/identiteit van waterstof. Dit is niet de enige manier om vergelijkingen te maken. Het vervoermiddel en de daarbij toegepaste tank(s), cilinders of andere colli's bepalen mede de te transporteren gewichten. Omdat staal en andere metalen relatief zwaar zijn, en omdat hoge drukken sterkere constructies (wanddiktes) vergen, zou een vergelijking inclusief het complete vervoermiddel een andere verhouding tussen de diverse waterstof(dragers) geven.

Daarnaast is het mogelijk, om niet naar gewichten te kijken, maar naar energie-inhoud. Bureau Panteia heeft in twee recente rapporten (Panteia, 2020) (Panteia & Movares, 2020) een dergelijke exercitie uitgevoerd, echter niet in een onderlinge vergelijking van de waterstofdragers, maar in een vergelijking tussen waterstof enerzijds, en twee traditionele brandstoffen (benzine en diesel) anderzijds. In het ene rapport [november 2020] komt men tot de uitslag, dat er vijf vrachtauto's met waterstof nodig zijn, ten opzichte van één vrachtauto met benzine of diesel. In het andere rapport [december 2020], waarin dezelfde analyse wordt uitgewerkt, komt men tot de vaststelling dat er een verhouding van drie vrachtauto's waterstof ten opzichte van één vrachtauto benzine of diesel geldt. Aangezien er getalsmatig geen volledig correcte formules zijn getoond, valt deze informatie niet rechtstreeks over te nemen.

2.4 Beschrijving individuele ketens: Waterstof

2.4.1 Gasvormige waterstof

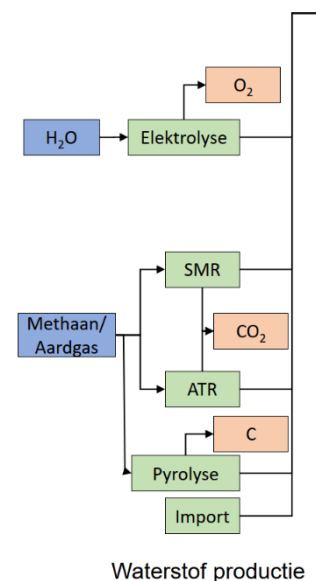
Waterstof komt niet vrij in de natuur voor en zal dus altijd geproduceerd moeten worden. Waterstof kan op verschillende manieren geproduceerd worden, wat grofweg is op te delen uit productie op basis van fossiele brandstof of hernieuwbare bronnen. Wanneer waterstof geproduceerd wordt op basis van fossiele bronnen zoals aardgas, waar CO₂ bij vrijkomt, spreekt men van grijze waterstof. Wanneer deze CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen spreekt men van blauwe waterstof. Waterstof geproduceerd uit hernieuwbare bronnen en op basis van duurzame energie, noemt men groene waterstof. Duurzame energie verkrijgt men bijvoorbeeld via windturbines, zonnepanelen of biomassa. Binnen dit onderzoek onderscheiden wij de volgende keten voor gasvormig waterstof:



Figuur 3: Gasvormige waterstofketen

Bij deze keten zien wij de volgende technieken als de meest gangbare voor gasvormige waterstofproductie:

- **Elektrolyse:** met elektriciteit als energiebron wordt uit puur² water (met waterstof en zuurstof als producten), of uit water met een opgeloste stof waterstof gewonnen. Een bekend, grootschalig voorbeeld van het laatste is de elektrolyse van NaCl in water, waarbij chloor (Cl₂) het bedoelde hoofdproduct is en waterstof het nuttige bijproduct. Over de elektrolyse als techniek verschijnen in de actualiteit rapporten en zijn al veel industriële plannen in Nederland en andere landen in ontwikkeling (FME & TNO, 2020). De wijze van de stroomproductie (op basis van wind, zon of conventioneel) bepaalt de 'kleur' (blauw, groen of grijs) van de waterstof.
- **SMR: (Steam methane reforming):** Hierbij reageert hogedruk stoom (H₂O) met aardgas (CH₄), via het intermediair syngas (waarin zich koolmonoxide, CO, bevindt) met als eindresultaat waterstof (H₂) en CO₂. In Nederland wordt momenteel op deze manier ongeveer 800.000 ton waterstof geproduceerd waarvoor vier miljard m³ aardgas wordt gebruikt.
- **Autothermal Reforming (ATR):** variant van SMR waarbij minder externe hitte nodig is. De ATR-technologie wordt veel gebruikt op locaties waar op grote schaal syngas nodig is. In tegenstelling tot SMR heeft ATR een significant opschaalvoordeel. Voor het ATR-proces geldt dat er pure zuurstof nodig is. Voor de besproken katalytische processen, SMR en ATR, geldt dat de feedstock deels ontdaan moet worden van zwavel.
- **Pyrolyse:** van methaan (uit aardgas of biogas). Naast waterstof produceert het proces geen CO₂, maar waardevolle vaste koolstof, ofwel C. Men spreekt wel van 'turquoise waterstof'. Bij deze technologie wordt bij hoge temperatuur (rond 900 °C), bijvoorbeeld in een gesmolten metaallegering, methaan gesplitst tot waterstof en pure koolstof. De toepassingen van de verkregen vaste koolstof zijn divers, zoals een additief voor staal, vulmiddel in autobanden, of als kleurstof.



Figuur 4: Productie keten van waterstof

² Er zijn ook ideeën en initiatieven om zeewater als bron te gebruiken; dat vergt wel een andere technische aanpak.

De huidige productie van waterstof is met name bedoeld voor de procesindustrie waar waterstof als grondstof dient voor bijvoorbeeld kunstmest (via de tussenstap ammoniak) of bij de raffinage van olie. Deze waterstof is veelal 'grijs' en wordt door middel van SMR, het kraken van aardgas, geproduceerd. Productie van waterstof vindt vooral plaats bij de industrieclusters waar waterstof ook lokaal weer afgenomen wordt. Omdat 'groene' waterstofproductie op het moment nog kostbaar is, lopen er meerdere initiatieven om nieuwe productielocaties te realiseren waar blauwe waterstof wordt geproduceerd, op basis van aardgas waar de vrijgekomen CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen in gasvelden onder de zeebodem. Deze initiatieven concentreren zich op het moment rond de haven van Rotterdam. Deze CO₂ stromen maken geen deel uit van deze studie.

Voor de bouw van nieuwe, grote elektrolysevoorzieningen ten behoeve van waterstofproductie zijn verscheidene plannen bekend, waaronder in Rotterdam, Amsterdam, Eemshaven en Vlissingen. Door kostendalingen en het vergroenen van de elektriciteitsmix in Nederland, zal er in de toekomst naar verwachting steeds meer groene waterstof geproduceerd worden. Omdat grootschalige elektrolyse een hoog elektrisch vermogen vraagt, is het waarschijnlijk dat de grootschalige elektrolyseproductielocaties zich niet dicht bij de grote afnemers zullen bevinden, zoals nu het geval is, maar dicht bij productielocaties van (groene) elektriciteit om vergaande uitbreidingen van de elektrische infrastructuur te voorkomen (TenneT & Gasunie, 2020). Denk bij dit soort locaties aan aanlandingspunten van wind op zee, wind op land of knooppunten in het hoogspanningsnet.

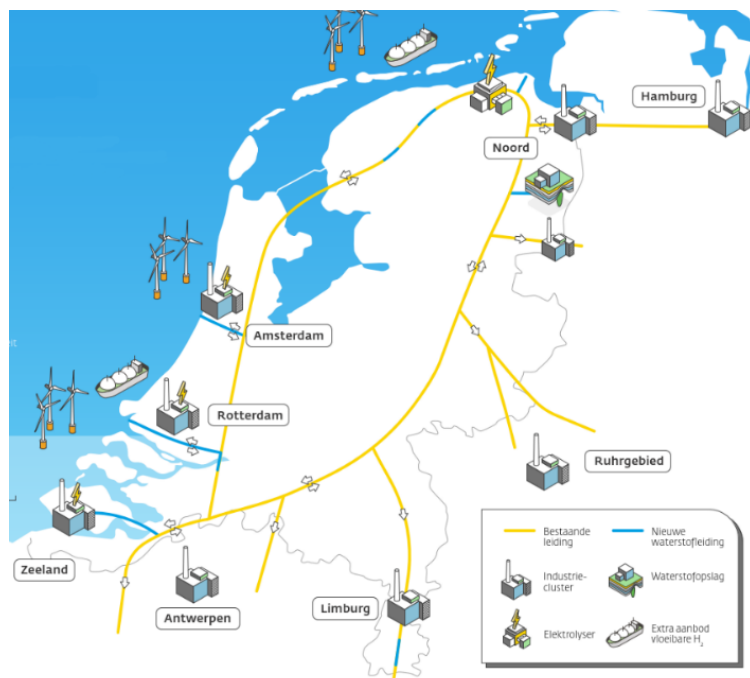
Een andere mogelijkheid is dat waterstof geïmporteerd wordt van buiten de landsgrenzen. Import van gasvormige waterstof zal op termijn met name via de geplande Europese waterstof backbone zijn. Op kleinere schaal is het nog mogelijk dat dit via tubetrailers geïmporteerd wordt. Het is waarschijnlijker dat waterstof op grote schaal geïmporteerd zal worden van buiten het continent als vloeibare waterstof, ammoniak of LOHC. In de havens kan het opgeslagen en verder getransporteerd worden of omgezet worden naar gasvormige waterstof.

Transport van gasvormige waterstof is mogelijk via alle vier de transportmodaliteiten die aan bod komen in deze studie. Op het moment wordt waterstof voornamelijk vervoerd via tube trailers, waar waterstof gasvormig onder (hoge) druk in tanks is opgeslagen of via pijpleidingen op en tussen industriële locaties. Transport via tube trailers is met name geschikt om kleinschalige toepassingen te bevoorraden zoals bijvoorbeeld tankstations. De totale volumes zijn nu nog laag, maar de verwachting is dat deze stromen via de weg zullen toenemen in de nabije toekomst (en dus in aantallen tube trailers).

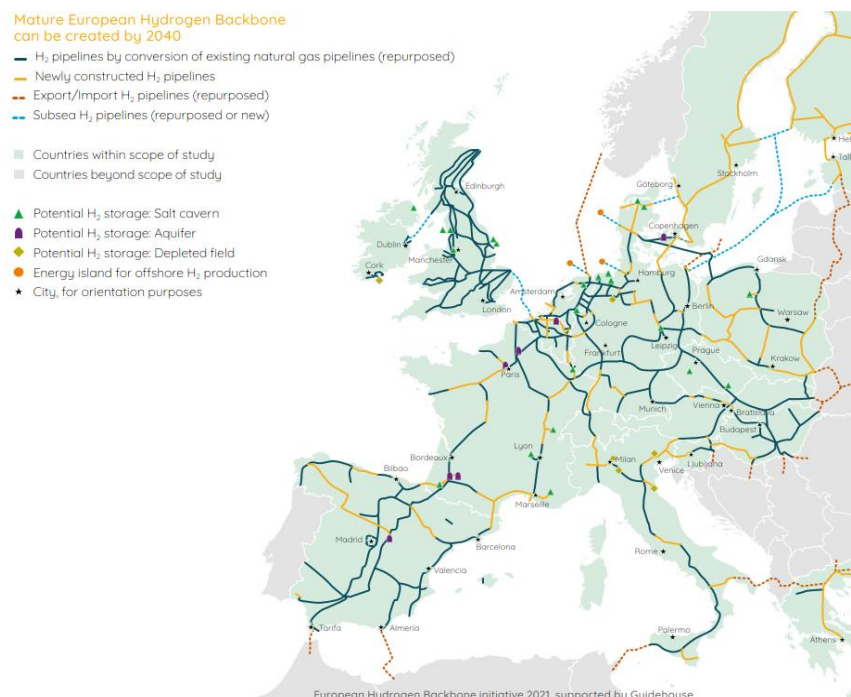
Grootschalig transport en distributie van gasvormige waterstof via pijpleidingen, lijkt een kansrijk alternatief voor transport over de weg via tubetrailer op de langere termijn. Nederland beschikt over een zeer uitgebreid aardgasnetwerk dat hergebruikt zou kunnen worden voor het transport van waterstof. Zo bestaan er particuliere waterstofnetwerken zoals de pijpleiding van Air Liquide tussen Rotterdam, Zeeland en Antwerpen. Ook is er in Zeeland tussen Yara en Dow Chemical een transportpijplijn (in beheer bij Gasunie) die waterstof transporteert tussen beide bedrijven. Daarnaast zijn er meerdere haalbaarheidsstudies uitgevoerd die het omvormen van het aardgasnetwerk naar een waterstofnetwerk getoetst hebben. Zo bleek uit onder andere de onderzoeken HyWay27 (PWC, 2021), Integrale infrastructuurverkenning 2030-2050 (Netbeheer Nederland) en Verkenning waterstofinfrastructuur (DNV GL) dat het hoofdtransport op hoofdlijnen geschikt is voor het transport van waterstof. Uit onderzoek van KIWA (KIWA, 2018) blijkt dat dit voor het distributienet ook het geval is. Dit betekent echter niet dat de netten van de ene op de andere dag over te zetten zijn naar een waterstofnet. Hier zijn diverse aanpassingen nodig. Naast de haalbaarheidsstudies worden ook de eerste praktijktesten uitgevoerd met transport en distributie van waterstof door het aardgasnetwerk. Zo wordt op de GreenVillage op de TU Delft een waterstof distributienet aangelegd en lopen er projecten in Hoogeveen en Stad aan 't Haringvliet.

Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, TenneT en Gasunie onderzoeken samen onder welke voorwaarden een deel van het bestaande gasnet kan worden ingezet voor het transport van waterstof.

Dit onderzoek, HyWay 27, moet een besluit opleveren over de realisatie van infrastructuur voor transport en opslag van waterstof vanaf 2027³. Dit net zal de locaties van waterstofproductie, -opslag en -afname (industriecusters) met elkaar verbinden. Daarnaast zal het landelijke net ook aan Duitsland gekoppeld worden. Aanvullend zijn er plannen voor een Europese waterstofbackbone die internationale transport van waterstof mogelijk moet maken (zie figuur 5 en 6).



Figuur 5: Waterstofbackbone Gasunie. Bron: <https://www.gasunie.nl/expertise/waterstof/waterstofbackbone>



Figuur 6: Plannen voor een Europese waterstof backbone Bron: <https://gasforclimate2050.eu/ehb/>

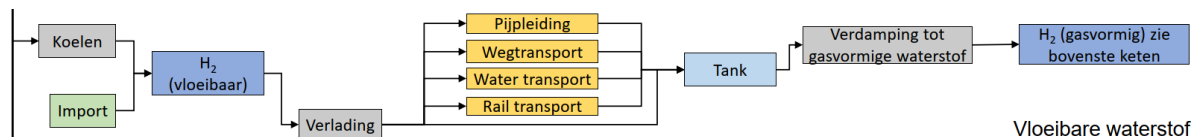
³ <https://www.gasunie.nl/expertise/waterstof/waterstofbackbone>

Het is mogelijk om gasvormige waterstof in hogedruktanks via het spoor te transporteren. Op het moment van schrijven zijn er geen transportroutes van gasvormige waterstof bekend. We achten het niet aannemelijk dat transport van gasvormige waterstof over het spoor een grote vlucht zal nemen, wanneer een landelijk waterstof leiding netwerk gerealiseerd zal worden in Nederland. Gasvormige waterstof kan ook via het water vervoerd worden. Tanks met waterstof onder (hoge) druk kunnen als containers vervoerd worden. Op dit moment zijn er nog weinig initiatieven voor grootschalig transport op deze wijze. Voor intercontinentaal transport lijkt vloeibare waterstof via schip en andere modaliteiten meer voor de hand te liggen. Voor afstanden korter dan 1000 km lijkt transport via pijpleidingen geschikter (IEA, 2019). Dit neemt niet weg dat er enkele initiatieven zijn en dat de eerste binnenvaartschepen aangedreven door waterstof in de vaart genomen worden, waardoor de vraag van gebruikers toe zal nemen. De verwachting is dat in eerste instantie (komende 5-10 jaar) de waterstofinfrastructuur nog geen grote vlucht zal nemen, maar dat dit op langere termijn (dus meer dan 10 jaar) wel kan gebeuren. De verwachting is dat de groei zal komen door het vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg (met name voor bevoorrading van multi fuel tankstations). Op nog langere termijn is de kans groot dat deze door buisleidingen (kleinschalige leidingen) bevoorradat worden, of dat de productie van waterstof hier lokaal zal gaan plaats vinden.

Vanwege de lage energiedichtheid op basis van volume wordt waterstof voor veel toepassingen onder hoge druk opgeslagen. In personenauto's wordt waterstof op 700 bar opgeslagen en in het zwaar vervoer worden drukken van 350 bar gehanteerd. Voor stationaire grootschalige opslag worden lagere drukken gehanteerd. Gasvormige waterstof kan ook grootschalig opgeslagen worden in zoutcavernes of lege gasvelden, waarbij opslag in zoutcavernes de voorkeur geniet, vanwege het formaat en de ondoordringbaarheid van waterstof door de wanden van de cavernes. Gasunie is van plan om op de locatie in Zuidwending de eerste grootschalige waterstofopslaglocatie in Nederland te ontwikkelen. Noord-Nederland biedt een groot opslagpotentieel voor waterstofopslag in zoutcavernes.

2.4.2 Vloeibare waterstof

De keten voor vloeibare waterstof verschilt van de gasvormige keten op een paar vlakken die wij hier zullen toelichten:



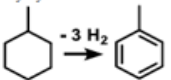
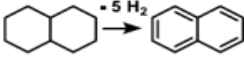
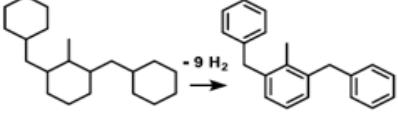
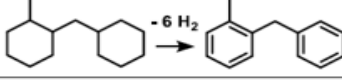
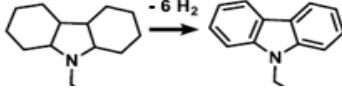
Figuur 7: Vloeibare waterstofketen

Waterstof heeft een zeer laag kookpunt. Bij atmosferische druk wordt waterstof pas vloeibaar bij een temperatuur van -253°C . Om waterstof vloeibaar op te slaan zijn er goed geïsoleerde tanks nodig en is er veel energie nodig om waterstof te koelen en het gekoeld te houden. Vloeibare waterstof wordt daarom ook wel aangeduid als cryogene waterstof. Het koelen tot vloeibare waterstof kan tot bijna de helft van de energie kosten ten opzichte van hoeveelheid energie die het in zich draagt. Bij het opslaan van vloeibare waterstof zijn er ook altijd "Boil-off losses". Dit is waterstof die verdampt door de opwarming in de opslag. Dit dient direct gebruikt of afgevoerd te worden. Een grote tanker die vloeibare waterstof vervoert, kan bijvoorbeeld deze waterstof gebruiken als brandstof. Het voordeel van vloeibare waterstof is dat de dichtheid op basis van volume erg hoog is, zeker vergeleken met gasvormige waterstof. Het aantal toepassingen voor vloeibare toepassingen is nog beperkt. De verwachting is dat het voornamelijk gebruikt zal worden voor opslag en transport op grote schaal en over lange afstanden. Verschillende fabrikanten hebben in het verleden geëxperimenteerd met vloeibare waterstof voor personenauto's in combinatie met een verbrandingsmotor maar dit bleek niet efficiënt. Inmiddels zijn er weer nieuwe initiatieven aangekondigd. Een goed voorbeeld daarvan is de zakelijke overeenkomst tussen Daimler Truck en Linde, om een vrachtwagenaandrijving op basis van vloeibare waterstof te gaan produceren.

Vloeibare waterstof kan *niet* direct geproduceerd worden. De keten zal altijd beginnen met import van buiten de landsgrenzen of gasvormige waterstof wordt door koeling vloeibaar gemaakt. Import van vloeibare waterstof vindt op dit moment nog niet plaats maar het is de verwachting dat vloeibare waterstof, LOHC en ammoniak de dragers worden voor intercontinentaal transport van waterstof (IEA, 2019) (Agung Tri Wijayanta, 2019). Het is aannemelijk dat vloeibare waterstof op grote schaal getransporteerd wordt en via de zeehavens binnen de landsgrenzen komt. Daar dient het opgeslagen te worden om vervolgens verder getransporteerd te worden of omgezet te worden naar een andere verschijningsvorm. De verwachting is ook dat de omzetting met name in (zee)havens zal plaatsvinden of op industriële locaties. Omdat het koelen van waterstof veel energie kost, en het verdampen van waterstof veel energie oplevert, is het wenselijk om dit te combineren met andere activiteiten die de koude kunnen leveren of benutten. Vanwege de lage temperatuur is het onwaarschijnlijk dat sterk gekoelde waterstof via pijpleidingen getransporteerd zal worden. Het is wel mogelijk om gekoelde waterstof via tankwagens, via het spoor of per zeeschip te vervoeren. Transport via binnenvaartschip zou een mogelijkheid kunnen zijn voor doorvoer naar het buitenland. Hier moet de kanttekening geplaatst worden dat het vervoer van gekoelde/cryogene waterstof in ingebouwde scheepstanks Europees niet is toegestaan (conform de ADN richtlijn). Transport in andere 'verpakkingen' zoals tankcontainers is wel toegestaan.

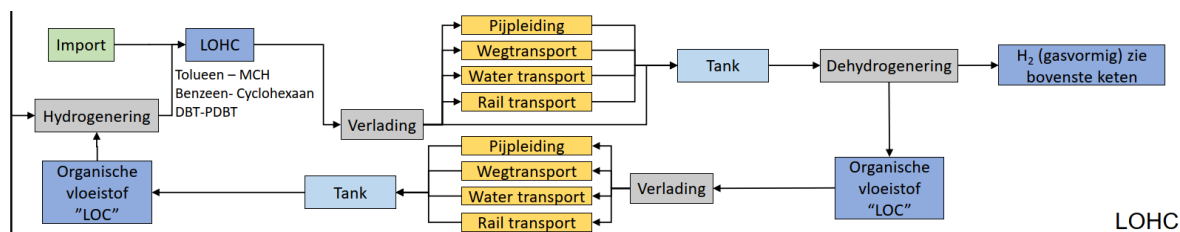
2.5 Beschrijving individuele ketens: LOHC

Sinds de aandacht voor waterstof als cruciale component in de energietransitie, is een groep van stoffen in beeld geraakt die als waterstofdrager zouden kunnen fungeren en die chemisch gezien onder de zogenaamde organische verbindingen vallen. Ze staan bekend als LOHC's (*liquid organic hydrogen carriers*). In de praktijk zijn twee subgroepen aan de orde. Enerzijds kleinere moleculen, met name methanol en mierenzuur, anderzijds grotere verbindingen als methylcyclohexaan, naftaleen en perhydrodibenzyltolueen. Mierenzuur en methanol worden in respectievelijk paragraaf 2.7.1 en 2.7.3 beschreven. Wanneer waterstof chemisch wordt gebonden aan een daarvoor geschikte organische verbinding, liefst een vloeistof, levert dit een LOHC op. Het kenmerk van LOHC's is dat wanneer het waterstofmolecuul benodigd is deze ontbonden kan worden van de drager, waarna de oorspronkelijke organische vloeistof overblijft (LOC). Deze LOC kan vervolgens weer opgewaardeerd worden tot een LOHC en als het ware hergebruikt worden. Een LOHC kan relatief eenvoudig opgeslagen en getransporteerd worden. In de academische wereld zijn al veel verbindingen voor dit doel aangestipt en er is een groot aantal onderzoeken uitgevoerd, dat qua perspectief gericht is op de commerciële introductie van LOHC's. Onder meer de volgende stoffen zijn in beeld (geweest).

LOHC System	H ₂ Capacity (wt%)	Enthalpy (kJ/mol H ₂)	Melting Point (°C)		Boiling Point (°C)		Flash Point (°C)	
			H ₂ -Rich	H ₂ -Lean	H ₂ -Rich	H ₂ -Lean	H ₂ -Rich	H ₂ -Lean
Methylcyclohexane → toluene 	6.2	68.3	-126	-95	101	111	-3	6
Decalin → Naphthalene 	7.3	63.9	-37	79	189	218	57	80
Perhydro-dibenzyltoluene → dibenzyl toluene 	6.2	65.4	NA	-34	NA	398	NA	190
Perhydro-benzyl toluene → benzyl toluene 	6.2	63.5	NA	-30	270	280	NA	NA
Dodecahydro-N-ethyl carbazole → N-ethyl carbazole 	5.8	50.6	-85	70	NA	166	NA	186

Figuur 8: Voorbeelden van potentiële LOHC's. Bron: (Minyoung, 2020)

Schematisch ziet de keten voor LOHC er als volgt uit:



Figuur 9: LOHC-keten

De meeste aandacht gaat momenteel uit naar *methylcyclohexaan* (hierna: MCH) en naar *perhydrodibenzyltolueen* (hierna: PDBT). We zijn ons ervan bewust dat er meerdere verschijningsvormen zijn waarvan *cyclohexaan* een belangrijke is. We hebben besloten om deze niet mee te nemen in de analyse vanwege het zeer toxische karakter. Zie hiervoor ook paragraaf 2.8.

MCH vormt in deze context een combinatie met toluene; toluene is een breed toegepaste, eenvoudig verkrijgbare verbinding, die industrieel op grote schaal in gebruik en voorradig is. De vervaardiging van MCH vindt primair plaats door de hydrogenatie van toluene. De aantrekkelijkheid van deze stofcombinatie als LOHC ligt vooral in de sfeer van schaalgrootte (lees: verkrijgbaarheid), aggregatietoestand (het is een vloeistof) en prijspeil. Toluene en MCH zijn beide brandbare (en tevens toxische stoffen), qua brandbaarheid en vluchtigheid zijn ze vergelijkbaar met benzine en passen ze in dezelfde categorie voor omgevingsveiligheidsberekeningen LF2 (weg en water), resp. C3 (spoor).

De tweede vertegenwoordiger, de combinatie perhydrodibenzyltolueen (PDBT/H18-DBT) /dibenzyltolueen (DBT) dankt zijn huidige status als serieuze kandidaat aan twee kenmerken. Ten eerste is de stof de bron voor het vrijmaken van 9 moleculen H_2 per molecuul LOHC (een complete aromatisering), ten tweede is deze LOHC nu al volwaardig op de markt. Met volwaardig is hier bedoeld dat er een leverancier is die zich heeft toegespitst op het hele pakket, dat wil zeggen de omzettingen, de installaties, het transport en de infrastructuur en de noodzakelijke knowhow (firma Hydrogenious uit Erlangen (D)). PDBT en DBT zijn visceuze, brandbare (en tevens toxische) stoffen, qua brandbaarheid redelijk vergelijkbaar met diesel. DBT wordt gemaakt met chloor. Chloor is een stof met zeer hoge toxiciteit ('acuut toxisch') en heeft daarom de nodige veiligheidseffecten (zie hiervoor hoofdstuk 3).

Een belangrijk vraagstuk bij deze variant in Waterstofland is de rol van de waterstofarme drager, de aromatische partner. Want die drager (toluene of dibenzyltolueen) is na het vrijmaken van de waterstof een bijproduct dat je ofwel elders wilt gebruiken, ofwel wilt terugbrengen naar de waterstofbron. Die terugrit heeft het nadeel dat het al gauw lijkt op een verspillende manier van vervoer. We komen hier op terug in de analyse, maar geven hieronder alvast weer hoe die cyclus er grofweg uitziet.



Figuur 10: LOHC cyclus. Bron: Hydrogenious

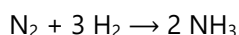
Veel van de door ons bestudeerde documenten noemen de LOHC's als een groep dragers die zeker meetellen als toekomstige kandidaten voor opslag en/of transport. Tegengeluiden zijn minder sterk te horen. Dat brengt ons tot de verwachting dat ze een aandeel zullen krijgen op zowel de kortere als de langere termijn. De techniek en de inzichten schrijden voort en net als bij de andere dragers zal dat betekenen dat de nadelen kleiner worden, en de voordelen groter.

Ook bij deze dragers is het de verwachting dat deze geïmporteerd worden vanuit andere delen van de wereld per schip. De verlading zal dus bij de zeehavens plaatsvinden. Het ligt het meest voor de hand dat de LOHC in de havens wordt 'ontladen' (de juiste term hiervoor is 'gedehydrogeneerd') en waterstof verder getransporteerd wordt, of dat de LOHC verder getransporteerd wordt naar gebruikers in het buitenland of in de industriële clusters. Het is daarbij ook de verwachting dat de 'ongeladen' LOC niet in Nederland geproduceerd zal worden. De LOHC's kunnen getransporteerd worden via de weg, water, pijpleiding of het spoor. Transport over het spoor en over het water liggen het meest voor de hand. De volumes zullen waarschijnlijk te hoog zijn om uitsluitend over de weg te transporteren en een pijpleiding infrastructuur is nog niet aanwezig en zal dus aangelegd moeten worden. Voor de mix van DBT-PDBT is het niet mogelijk om deze via een pijpleiding te transporteren vanwege de hoge viscositeit van de beide stoffen.

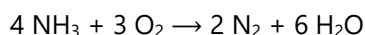
2.6 Beschrijving individuele ketens: Ammoniak

Ammoniak, met de formule NH_3 , is een verbinding die al heel lang bekend is en op zeer grote schaal wordt gemaakt, onder meer als halffabrikaat voor de kunstmestindustrie. Het grootste deel van de ammoniakproductie dient voor de vervaardiging van kunstmestmaterialen, in de vorm van ammoniumzouten (NH_4^+ -zouten) en ureumderivaten. Een andere toepassing is het gebruik als koelmiddel in grote installaties voor bijvoorbeeld voedselbedrijven en ijsbanen. In de huiselijke sfeer is de stof eveneens breed bekend, namelijk als schoonmaakmiddel. In dat geval gaat het niet om de pure stof, maar om de oplossing in water. Het is in die toepassing (bekend in plastic flacons van meestal ca. 1 liter) dus een mengsel van NH_3 en water. Wereldwijd zijn er talloze fabrieken die de stof maken, en ook in Nederland is er een aantal productie-eenheden, zoals in Geleen en Sluiskil.

Het algemene proces om ammoniak te produceren is de hydrogenering van stikstof uit de lucht onder hoge druk met behulp van een katalysator. Oftewel, voor de productie van ammoniak wordt waterstof verbruikt. Ammoniak wordt in Nederland, en ook internationaal, veruit het meest geproduceerd via het zogeheten Bosch-Haber-proces uit (grijs) waterstof en stikstof uit de lucht:

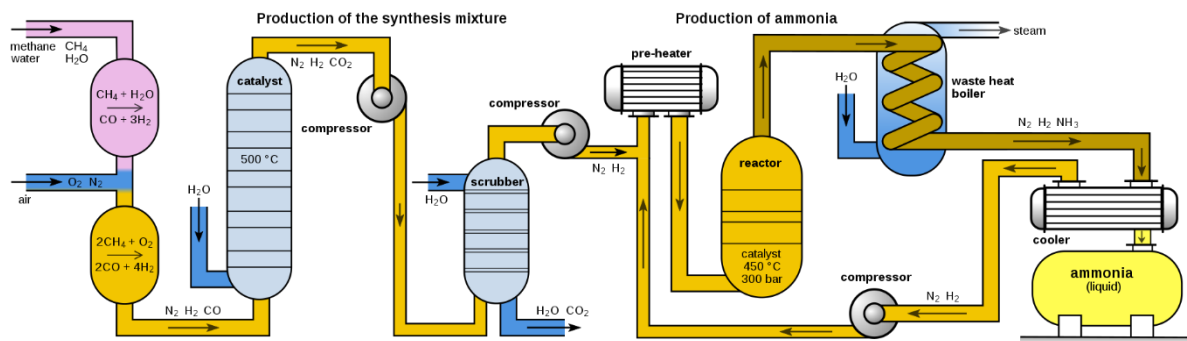


Deze synthesesmethode dateert al uit 1909 en heeft zijn nut meer dan bewezen. Ammoniak is onder de juiste omstandigheden bruikbaar als (motor)brandstof en levert daarbij geen CO_2 of stikstofoxiden⁴:



Zoals aangegeven in Figuur 11 is het eindproduct in vloeistofvorm te verzamelen. Dat kan onder druk zijn (8-10 atmosfeer), of bij lage temperatuur (bij -33°C [kookpunt] : 1 atmosfeer).

⁴ Hier komen echter wel stikstofoxiden (NO_x) bij vrij.



Figuur 11: Ammoniak synthese proces.

Ammoniak kan dienen als drager, waar waterstof later uit de ammoniak onttrokken wordt. Dit is geen gangbaar industrieel proces en voordat het eventueel grootschalig zal worden toegepast, is nog veel kennisopbouw nodig. Wel is bewezen, dat de reactie uit te voeren is, o.a. met katalysatoren en bij hoge druk, of met puur natrium waarbij weer andere veiligheidsaspecten komen kijken.

Ketenstudies en beleidseffecten

Ammoniak is een in het oog springende keten. Omdat de stof enerzijds al heel lang en grootschalig in de industrie wordt toegepast, en anderzijds gevaarlijk is vanwege de hoge toxiciteit, is in het verleden reeds een ketenstudie verricht naar ammoniak (KPMG, TNO, ECORYS, 2004)⁵. Doel van het project Ketenstudies was het inventariseren en analyseren van de EV-problematiek rond ammoniak, chloor en LPG in Nederland en het selecteren van oplossingen voor gesignaleerde knelpunten. De Ketenstudies concentreerden zich op die drie stoffen, omdat ze een aanzienlijk maatschappelijk en economisch nut hebben, maar ook risico's met acute effecten met zich meebrengen, ondanks alle maatregelen die overheden en bedrijven al hadden genomen. Chloortransport werd vlak na het uitvoeren van het project afgeschaft (chloor convenant met Akzo) vanwege de effecten van een ongeval met chloor en de maatschappelijke impact daarvan. Het project Ketenstudies was in die zin ook bedoeld, om de externe veiligheid ten aanzien van LPG en ammoniak te vergroten door knelpunten weg te nemen. Niet om productie, transport en opslag onmogelijk te maken (er zit immers ook een aanzienlijk maatschappelijk nut en een flinke economische waarde aan deze stoffen), maar wel om de risico's te verkleinen.

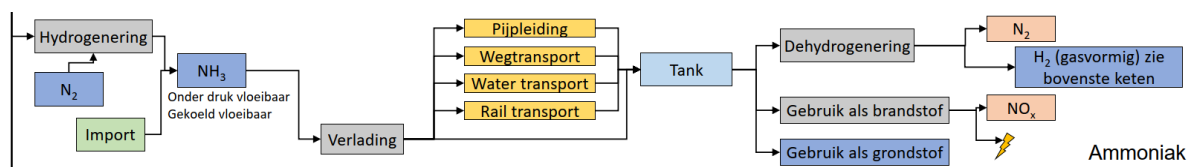
Doordat ammoniak vergelijkbare toxische effecten heeft als chloor, is het beleid hier sindsdien op gericht geweest om gebruik en transport van ammoniak zo veel mogelijk te ontmoedigen of te concentreren op locaties. Zo heeft de rijksoverheid zich in het verleden bijvoorbeeld uitgesproken tegen spoortransport van ammoniak, met als doel de veiligheid te vergroten: *'... De Rijksoverheid heeft, met het oog op risicobeheersing en ten behoeve van de bescherming van het milieu, belang bij het beëindigen van de ammoniaktransporten zoals die thans in opdracht van DSM Agro tussen de vestiging van DSM Agro op de Locatie te Geleen en de vestiging van DSM Agro in IJmuiden per spoor worden uitgevoerd, in die zin dat wordt gestreefd naar evenwicht tussen productie en verwerking van ammoniak op lokaal niveau'* (Minister van VROM, DSM en Provincies Limburg en N-Holland, 2009).

Voor het aantal transporten over de weg, het spoor en het water zijn er indirecte beperkingen voor ammoniak binnen de wetgeving van het Basisnet. Het Basisnet reguleert echter niet per individuele stof, maar over het geheel van vervoerde stoffen door middel van zogeheten 'risicoplafonds'. Ammoniak is bij weg en water ingedeeld in categorie GT3 (subgroep van de toxische gassen) en bij spoor in B2 (toxische gassen). Via alle drie

⁵ Wij verwijzen daarom ook naar die studie als informatiebron, maar achten het rapport wel gedateerd en niet geheel passend bij de huidige inzichten ten aanzien van de actuele economische en logistieke situatie van de stof, omdat de afgelopen 17 jaar hierin veel veranderd is. De veiligheidsaspecten zijn echter nog altijd actueel.

modaliteiten vinden in Nederland momenteel transporten plaats van onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak (met als uniek nummer UN 1009).

De ammoniak keten is een al bestaande keten. De stromen in de keten zullen echter veranderen en volumes zullen waarschijnlijk fors toenemen. Nu dient ammoniak voornamelijk als grondstof voor de industrie, bijvoorbeeld voor de productie van kunstmest. In de toekomst komen hier stromen bij waar ammoniak als waterstofdrager zal dienen en ammoniak kan ook als brandstof gebruikt worden. De huidige ammoniak productie is 'grijs' waar CO₂ bij vrijkomt.



Figuur 12: Ammoniak keten

Zoals ook al bij andere verschijningsvormen is aangegeven is de verwachting dat ammoniak, LOHC en gekoelde waterstof de verschijningsvormen zullen zijn waarmee grote hoeveelheden waterstof intercontinentaal getransporteerd zullen worden. Het havenbedrijf Rotterdam verwacht bijvoorbeeld dat ammoniak op de korte termijn een enorme vlucht zal maken, in eerste instantie om de 'grijze' ammoniak te vervangen, maar ook omdat ammoniak de bestbekende techniek is die op korte termijn beschikbaar is voor grootschalig waterstoftransport en installaties 'off the shelf' beschikbaar zijn. Uit gesprekken bleek ook dat de kans groot is dat in eerste instantie (komende 5-10 jaar) een meer dan aanzienlijke groei komt in de hoeveelheid import van ammoniak en dat later LOHC's en gekoelde waterstof een grotere rol gaan spelen in de energietransitie. Dit vraagt van de rijksoverheid dat zij nu al na zal moeten gaan denken over de positie die zij in het verleden heeft ingenomen en vooral in de toekomst wil innemen over het gebruik en transport van ammoniak. Het ontmoedigen van ammoniak in het verleden en de toekomst is logisch verklaarbaar vanuit het oogpunt van risicobeheersing, maar vraagt wel om een nieuwe afweging als vanuit marktoverwegingen en vooral duurzaamheidseffecten ammoniakgebruik en -transport een vlucht kan gaan nemen.

Ammoniak zal waarschijnlijk via de zeehavens het land inkomen en daar opgeslagen en verladen worden. Het kan omgezet worden in (gasvormige) waterstof of getransporteerd worden naar industriële locaties of het achterland. Daarnaast is de verwachting dat op den duur de grijze ammoniakproductie vervangen zal worden voor groene ammoniak. Wanneer ammoniak geïmporteerd wordt zal dit additioneel transport tot stand brengen. Daarnaast kan deze groene ammoniak ook in Nederland geproduceerd worden.

In technisch opzicht zijn alle transportmodaliteiten mogelijk, behalve gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak door een pijpleiding. Over lange afstanden is dit niet mogelijk omdat ammoniak teveel zal opwarmen. Transport van gekoelde ammoniak over de weg en het spoor is niet toegestaan op dit moment.

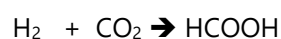
2.7 Beschrijving overige ketens

2.7.1 Mierenzuur

Mierenzuur (HCOOH) is het meest eenvoudige carbonzuur en kan worden omgezet in waterstof en kooldioxide door katalytische splitsing:

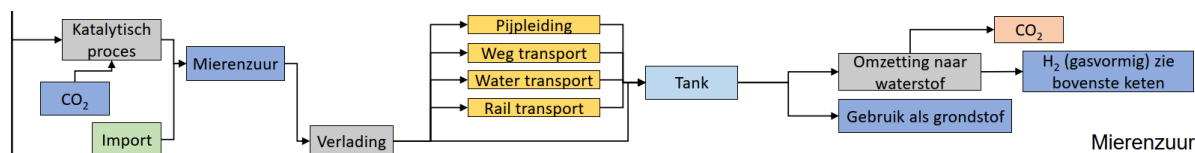


Het ogenschijnlijke nadeel van de vorming van kooldioxide valt te rechtvaardigen uit de wetenschap, dat de omgekeerde reactie de bron van het mierenzuur kan zijn, oftewel:



Aldus kan mierenzuur als intermediaire drager van waterstof fungeren. Mierenzuur heeft voor- en nadelen. Zo is het voordeel dat het een vloeistof is en daardoor goed op te slaan en te vervoeren. De stof is echter zeer (huid)corrosief (nadeel voor installaties én personeel), brandbaar en vermoedelijk hormoonversturend. Het is niet noodzakelijk om voor toepassingen waterstof te vormen en afzonderlijk te zuiveren, op te slaan en te gebruiken. Er zijn technieken ontwikkeld om dit direct in één doorgaand proces te doen. Het Team FAST van de TU Eindhoven heeft bijvoorbeeld een installatie gebouwd, waarop een bus kan worden aangedreven dankzij een mierenzuurtank, de katalytische omzetter (waterstof en kooldioxide) en de brandstofcel binnen één constructie.

De keten van mierenzuur ziet er als volgt uit:



Figuur 13: Keten mierenzuur

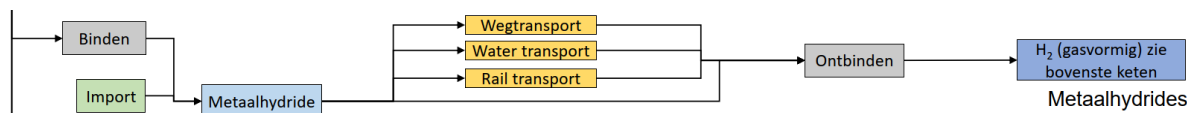
De keten is vergelijkbaar met de keten van bijvoorbeeld ammoniak. Mierenzuur is via alle vier de transportmodaliteiten te vervoeren die in deze studie geanalyseerd worden. Mierenzuur kan ofwel gebruikt worden als grondstof in de industrie of het kan omgezet worden in (gasvormige) waterstof. Bij deze omzetting komt CO_2 vrij.

2.7.2 Metaalhydride

De term metaalhydride is een verzamelnaam en slaat terug op minstens twee afzonderlijke groepen van verbindingen en materialen. In de ene groep is de waterstofeenheid [als atoom (H) of als molecuul (H_2)] in lichte mate chemisch gebonden aan andere elementen; waterstof is dan aan het oppervlak of in het rooster van een vaste stof diffuus geabsorbeerd. De materialen waarin waterstof zo kan worden opgenomen of opgesloten zijn doorgaans metalen (of – al deels – metaalhydrides, zie tweede groep), bijvoorbeeld palladium, titanium, nikkel, magnesium of ytterbium.

De tweede groep is ook een familie van stoffen, met hydride (H^-) als (enkelvoudig of meervoudig) aanwezig negatief ion en een ander element als positief geladen element (o.a. Li, B, Na, K of Al). De stoffen reageren eenvoudig en meestal heftig met water (onder vorming van H_2). Er zijn simpele hydriden met slechts één ander element (LiH , NaH , MgH_2 etc.), en complexere hydrides met twee elementen. Daarvan is vaste stof NaBH_4 veel voorkomend, populair vanwege zijn relatieve stabiliteit en rustige reactiegedrag. Echter, deze stof is recent aangewezen als ZZS (zeer zorgwekkende stof) en productietoename is hierdoor ongewenst en complex. Op synthese-laboratoria, waar kleinschalige chemische reacties plaatsvinden, is met name ook LiAlH_4 veel in gebruik vanwege het effectieve reactiegedrag.

Nadelen van de metaalhydrides is het hoge gewicht (ongeveer 2% van het gewicht in geladen toestand bedraagt waterstof) en het traag opnemen en afstoten van waterstof (Agung Tri Wijayanta, 2019). Het aantal toepassingen voor metaalhydrides is nog gering. De meeste initiatieven zijn op vervoersoplossingen gericht. De keten voor metaalhydriden ziet er als volgt uit:



Figuur 14: Keten metaalhydrides

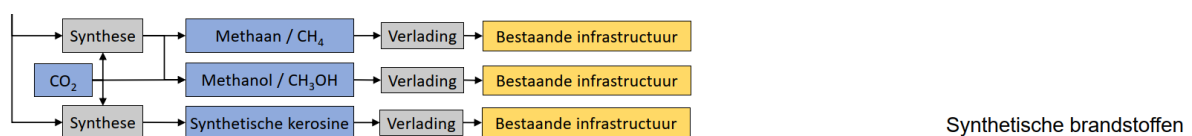
De keten van de metaalhydrides ziet er daarmee iets anders uit dan bij de andere verschijningsvormen. Waar de andere dragers gasvormig of vloeibaar zijn is een metaalhydride een vaste stof. Een opslag is in de meeste

gevallen daarom geen extra vereiste, de metaalhydride is al een 'container' waar waterstof in opgeslagen wordt. Gasvormige waterstof kan gebonden worden in de vaste stof. Na de binding kan de metaalhydride vervoerd worden of als een 'batterijachtige' opslag dienen voor transporttoepassingen. Logischerwijs valt transport via een pijpleiding af. Een metaalhydride kan wel vervoerd worden via de andere transportmodaliteiten. Vanwege de stand van techniek en prognoses in de literatuur verwachten we niet dat het gebruik van metaalhydrides een grote vlucht zal nemen op de korte en lange termijn.

2.7.3 Synthetische brandstoffen

De wereld draait nog grotendeels op fossiele brandstoffen. Het gebruik van deze koolwaterstoffen resulteert in de emissie van CO₂. Het is ook mogelijk om deze brandstoffen te maken met waterstof en CO₂ als grondstof. Dit worden synthetische brandstoffen genoemd. CO₂ wordt onttrokken voor de productie en komt weer vrij bij verbranding van deze brandstoffen wat resulteert in een CO₂ neutrale cyclus. De meest kansrijke synthetische brandstoffen zijn synthetische kerosine, methaan (aardgas) en methanol.

De ketens voor deze brandstoffen zullen niet veranderen, enkel het productieproces wordt anders. We verwachten dat de synthetische koolwaterstoffen de fossiele variant zullen vervangen en dat er geen extra stromen tot stand komen. Daarmee is de verwachting dat de vraag naar deze brandstoffen in zijn algemeen zal verminderen, doordat de wereld op de lange termijn zal overstappen op duurzame energiedragers en bronnen.



Figuur 15: Globale ketens synthetische brandstoffen

2.8 Trechtering

In paragraaf 2.4-2.7 zijn de mogelijke verschijningsvormen voor waterstof, de transportmodaliteiten en bijbehorende ketens beschreven. Deze ketens zijn getrechterd om tot de definitieve ketens te komen voor de verdere analyse. De ketens zijn getoetst op haalbaarheid, volwassenheid en toepasbaarheid. Hierdoor zien wij dat de volgende ketens logischerwijs minder kans van slagen hebben op dit moment en niet verder behandeld zullen worden in dit rapport.

Metaalhydrides

De techniek is niet volwassen genoeg en lijkt dat voorlopig ook niet te worden. Er zijn op dit moment ook geen initiatieven om metaalhydrides op grote (internationale) schaal toe te passen. Daarnaast is het lastig om deze hydride op zeer grote schaal op te slaan, omdat dit om grote volumes van groot gewicht gaat. Het voorbeeld van natriumboorhydride in paragraaf 2.3 maakt ook duidelijk dat voor 1 ton waterstof een aanzienlijk tonnage metaalhydride nodig is. Dit wil niet zeggen dat opslag of gebruik in deze vorm geen kans van slagen heeft. Voor kleinschalige oplossingen in bijvoorbeeld transport biedt het zeker potentie maar de schaal hiervan is te klein voor deze studie.

Mierenzuur

Ook voor mierenzuur is de techniek nog niet volwassen genoeg om op grote schaal ingezet te worden. Het maken van mierenzuur is nu nog geen bestaand proces, maar in wetenschappelijk onderzoek wel gelukt uit methanol (dus niet met waterstof). Een groot nadeel is dat als nevenproduct CO₂ vrijkomt en het als stof niet in zuivere vorm bestaat. In combinatie met het corrosieve, toxische en brandbare karakter van mierenzuur is het onwaarschijnlijk dat deze techniek aantrekkelijk genoeg is om de vraag ernaar een grote vlucht te laten nemen.

Tijdens onze inventarisatie zijn wij geen signalen tegengekomen dat dit wel zo zal zijn. Om deze reden wordt mierenzuur niet meegenomen in de verdere analyse.

LOHC, duo Benzeen - Cyclohexaan

In de (inter)nationale berichtgeving over LOHC's is ook het duo stoffen *benzeen- cyclohexaan* met enige regelmaat terug te vinden. Het principe is vergelijkbaar met MCH-tolueen, namelijk het hydrogeneren van de benzeenring. Echter, de toxiciteit van benzeen is veel hoger dan die van tolueen, en daarom is het erg aannemelijk dat er zeker binnen Nederland, maar ook binnen de overige EU-lidstaten, geen motivatie en rechtsgrond is om benzeen grootschalig in te zetten in de waterstofeconomie. Benzeen is in Nederland formeel ingedeeld als ZZS (zeer zorgwekkende stof) en daarom niet meegenomen in de verdere analyse. Ook is de chemische formule zoals in paragraaf 2.3 weergegeven een reden dat er voor 1 ton waterstof een veel groter tonnage MCH nodig is (factor 16 verschil) wat deze stof minder aantrekkelijk maakt.

Synthetische brandstoffen

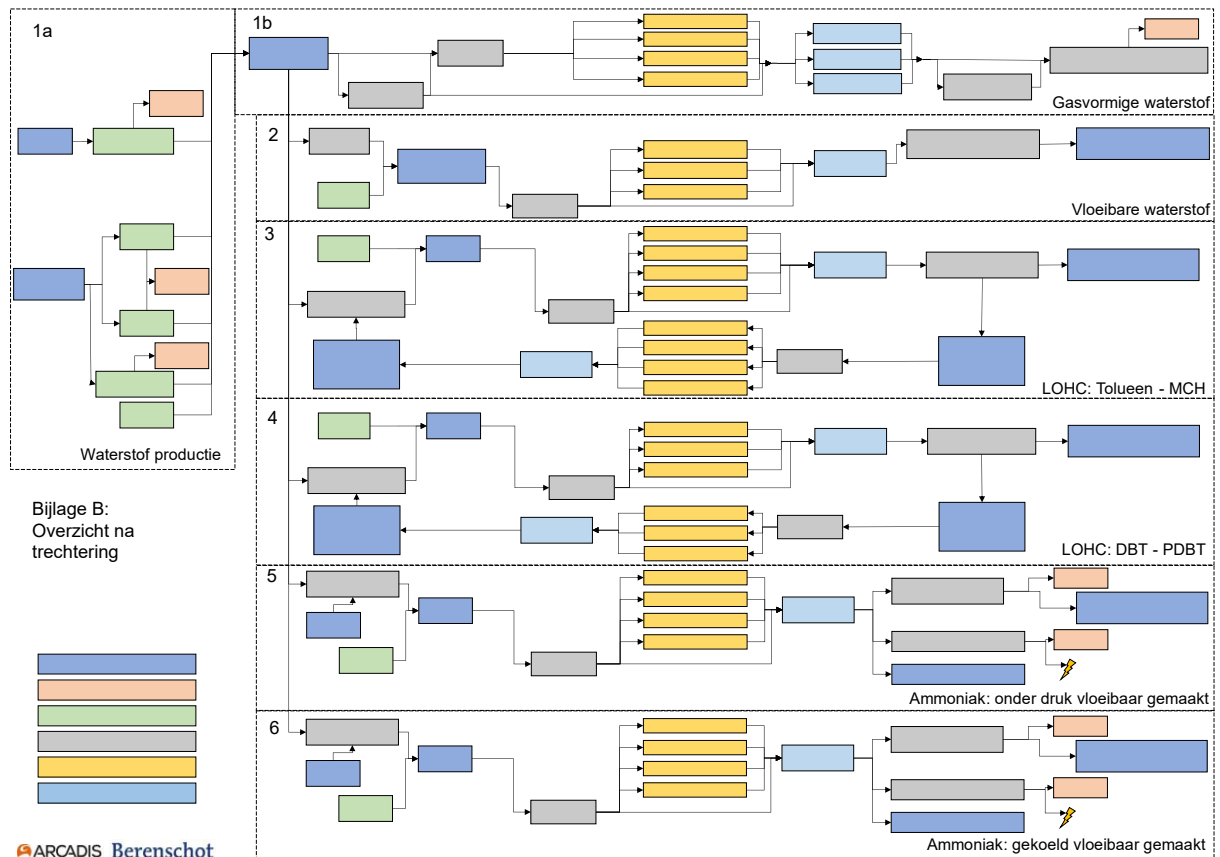
Synthetische brandstoffen zijn brandstoffen die niet uit de grond gehaald worden, maar door middel van een scheikundig proces geproduceerd worden. Veel genoemde synthetische brandstoffen zijn synthetische methaan, kerosine en methanol. De samenstelling van deze brandstoffen is niet anders dan de fossiele tegenhanger, enkel de productie is anders. Voor de drie genoemde brandstoffen is de infrastructuur al beschikbaar en is er al een grote markt. Zeker als het gaat om methaan (aardgas) en kerosine.

Voor synthetische methaan zal alleen het productieproces verschillend zijn. Vervoer kan plaatsvinden via het bestaande buisleidingnetwerk. De verwachting is dat de totale vraag naar methaan/aardgas zal afnemen in de toekomst en dat er alleen een kleine restvraag overblijft richting 2050, voor toepassingen die technisch lastig zijn over te zetten naar emissieloze alternatieven. Het scenario voor synthetische kerosine is vergelijkbaar met methaan. Het zal een vervanger zijn voor fossiele kerosine en zal richting 2050 steeds verder afnemen. Het is onwaarschijnlijk dat er nieuwe toepassingen zullen zijn waar synthetische kerosine gebruikt wordt. Voor methanol geldt dat het vooral zal blijven dienen als grondstof en niet als waterstofdrager. De verwachting is dan ook dat enkel het productieproces zal vergroenen, op basis van groene waterstof, en de keten nauwelijks zal veranderen.

Deze brandstoffen worden wel gemaakt uit onder andere waterstof maar hebben niet als doel om aan het einde van de keten weer omgezet te worden in waterstof. De verwachting is dat de synthetische brandstoffen de fossiele brandstoffen niet zullen aanvullen maar vervangen. Deze stoffen zullen daarom concurrerend zijn met waterstof en daarom zijn zij niet meegenomen in deze studie.

2.9 Ketenoverzicht analyse

De trechtering resulteert in onderstaand overzicht van ketens die geanalyseerd zullen worden in de volgende stap. Het overzicht is in bijlage B op groter formaat bijgevoegd. Om ook de verschillen tussen de twee LOHC ketens inzichtelijk te maken is deze keten opgesplitst. Hetzelfde geldt voor onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak en gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak.



Figuur 16: Overzicht beschouwde ketens analyse. Zie bijlage B voor dit schema op groter formaat.

3. Analyse van kansen en aandachtspunten per keten

3.1 Analyse methode

Op basis van de aanpak in hoofdstuk 2.4 worden in dit hoofdstuk per keten de kansen en aandachtspunten belicht. Hieraan liggen de analysetabellen in bijlagen C en D ten grondslag. Om de verhoudingen aan te geven in de trechtering die wij hier toepassen is het goed om dat nog een keer toe te lichten aan de hand van de volgende figuur. Hierin hebben wij letterlijk een trechter weergegeven die ons pad van algemene informatie naar specifieke kennis weergeeft. Bovenin de trechter zit een weergave van bijlage C die wij gecomprimeerd hebben in bijlage D dat de volgende stap in de trechter vormt. Bijlage D is een tabel waarin de hoofdpunten van veiligheid per keten in opgenomen zijn. In paragraaf 3.2 hebben wij de samenvatting per keten opgenomen. Hierin staan de voornaamste overwegingen, aandachtspunten en ons inzicht ten aanzien van die ketens. Het gaat om de volgende zes ketens:

1. Pure waterstof, zowel in gasfase (standaard onder hoge druk) en vloeibaar (sterk gekoeld)
2. LOHC: zowel toluene – methylcyclohexaan en DBT-PDBT
3. Ammoniak, zowel onder druk vloeibaar gemaakt en gekoeld vloeibaar gemaakt

Voor elk van deze ketens is in deze tabellen ingegaan op de volgende ketenonderdelen: productie, conversie opslag, verladen en transport. Voor elk ketenonderdeel zijn vervolgens de volgende aspecten beschouwd: algemene overwegingen, veiligheid/ ruimtelijke consequenties in directe omgeving, veiligheid/ ruimtelijke consequenties in ruimere omgeving, uitstoot en restproducten, maatschappelijke consequenties en mogelijke mitigerende maatregelen.

In de tabellen is in de beschouwing dus ingegaan op de beschikbare feitelijke informatie, zonder hier een waardeoordeel aan te koppelen. Op basis van deze feitelijke informatie zijn echter wel kansen en aandachtspunten te identificeren, en is het mogelijk om de verschillende ketens, ketenonderdelen of aspecten op bepaalde punten met elkaar te vergelijken. Deze hebben wij vervolgens in paragraaf 3.3 en 3.4 uitgewerkt tot de kansen en uitdagingen van de verschillende ketens.

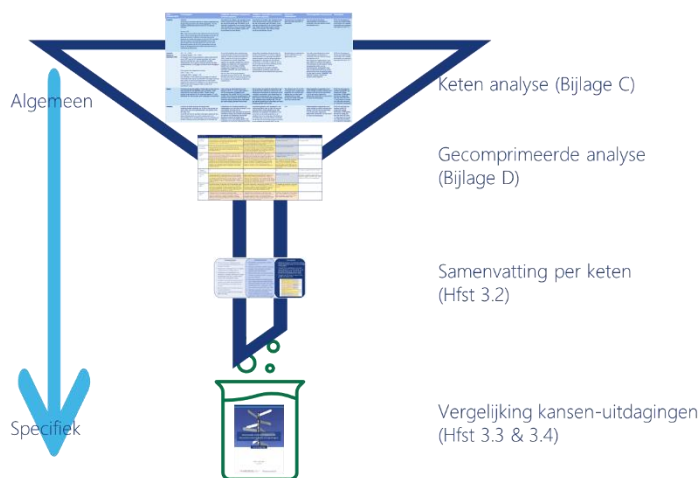
3.2 Overzicht ketens

Hieronder geven wij per keten weer wat de overwegingen zijn, wat de aandachtspunten zijn en wat ons inzicht is. Dit is stap 3 uit de trechtering van Figuur 18. Het screenshot bij 'Ons inzicht' is een beeld dat weergeeft welke relatieve kleur (aandachtspunten) de keten heeft volgens de analyse in bijlage D. De kleuren zijn als volgt te lezen:

Weinig tot geen aandachtspunten	Een aantal belangrijke aandachtspunten	Veel significante aandachtspunten
---------------------------------	--	-----------------------------------

Figuur 18: Uitleg kleuren bijlage D

Een overwegend grijs figuur betekent dat er weinig tot geen aandachtspunten zijn bij die keten. Hoe meer oranje, hoe meer aandachtspunten er zijn. Aandachtspunt is hier overigens geen synoniem voor onveiligheid of risico en moet gelezen worden in de zuivere zin van het woord, namelijk dat er punten zijn die aandacht behoeven. Die specifieke invulling staat in de cellen van bijlage D. Het aantal aandachtspunten is ook niet bepalend voor de (on)wenselijkheid van een keten.



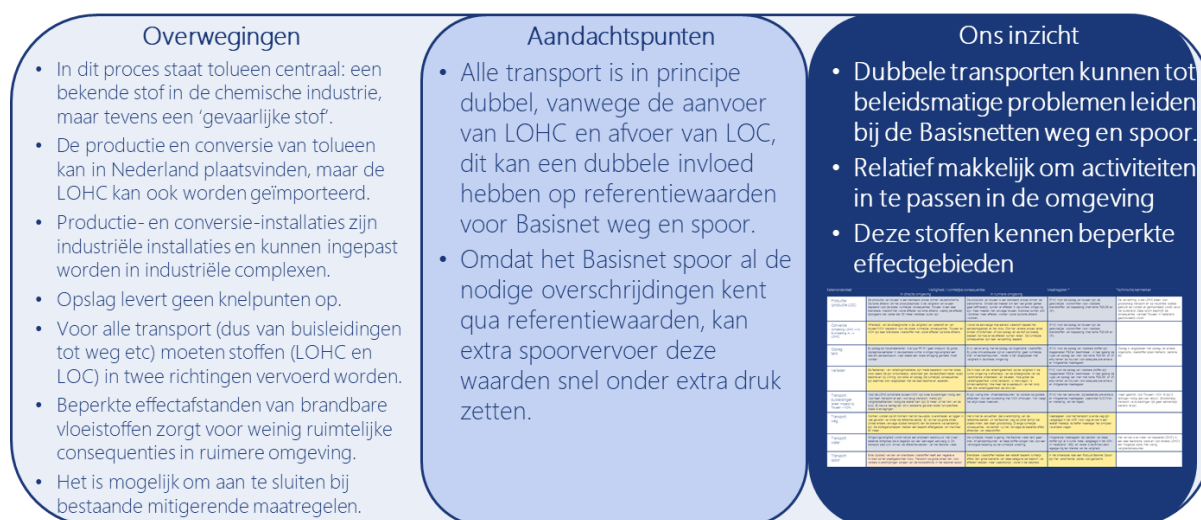
Figuur 17: schematische weergave proces van trechtering



Figuur 19: Samenvatting keten Waterstof gasvormig



Figuur 20: Samenvatting keten Waterstof gekoeld



Figuur 21: Samenvatting keten LOHC - Tolueen - Methylocyclohexaan



Figuur 22: Samenvatting keten LOHC - DBT - PDBT



Figuur 23: Samenvatting keten Ammoniak onder druk vloeibaar gemaakt



Figuur 24: Samenvatting keten Ammoniak gekoeld vloeibaar gemaakt

3.3 Algemene constatering

Deze studie focust op veiligheidsaspecten, maar dit betekent niet dat op basis hiervan een keuze moet worden gemaakt voor de waterstoftoepassing met de minste veiligheidsaandachtspunten. De keuze zal mede door de markt gemaakt worden, waarbij aspecten als economische haalbaarheid en internationale ontwikkelingen een grote invloed hebben, en door de politiek die een rol heeft in het bepalen welke ketens de voorkeur hebben, op basis van een brede maatschappelijke afweging. Daarnaast constateren wij wel dat:

- De transportmodaliteiten weg en spoor elkaar niet ontlopen qua omgevingsveiligheid, maar dat voor alle ketens geldt dat transport over spoor een significant aandachtspunt heeft, namelijk dat de risicoplafonds in het basisnet spoor snel nog meer overschreden dreigen te worden.
- De beschouwde ketens, behalve gasvormige waterstof, alleen in aanmerking komen voor transport tussen industriële locaties. Dit heeft onder andere met de toepassingen van deze dragers te maken en dat omzetting naar gasvormige waterstof in een industriële omgeving moet plaatsvinden. Gasvormige waterstof is ook als enige van de onderzochte ketens geschikt voor gebruik in de gebouwde omgeving.
- Buisleidingen qua veiligheid de optie met de minste ruimtelijke en maatschappelijke impact zijn voor transport en distributie van gasvormige waterstof naar de gebouwde omgeving.
- Transport via buisleidingen over het algemeen de minste aandachtspunten heeft op het gebied van veiligheid. Kanttekening is dat wanneer er nieuwe buisleidingen aangelegd moeten worden dit tot lokale afwegingen zal leiden en NIMBY overwegingen op kan roepen.
- De LOHC-ketens relatief de minst significante aandachtspunten hebben wanneer deze worden toegepast in industriële omgeving. Daarnaast zijn de risicocontouren voor opslag klein wat het geschikt maakt voor opslag van grote volumes. Kanttekening hierbij is dat bij het gebruik DBT-PDBT, de productie van DBT elders of zonder chloor plaatsvindt, omdat transport van chloor ongewenst is vanwege de grote potentiële veiligheidseffecten.

3.4 Vergelijkingen ketens

In deze vergelijkingen worden veiligheidsaspecten van de verschillende dragers met elkaar vergeleken. Technische en economische voordelen zijn geen onderdeel van deze vergelijking. In dit vergelijk worden mitigerende maatregelen genoemd om de risico's te reduceren. In bijlage E is een niet-limitatief overzicht gegeven van mitigerende maatregelen.

3.4.1 Waterstof – Gas onder hoge druk en Vloeibaar sterk gekoeld

Voordelen waterstof - gas onder hoge druk ten opzichte van waterstof vloeibaar – sterk gekoeld:

- *Waterstof - gas onder hoge druk* kan via buisleidingen getransporteerd worden, voor *waterstof vloeibaar – sterk gekoeld* is dit transport via buisleidingen geen optie. Transport via buisleiding zal ook voor *waterstof - gas onder hoge druk* naar verwachting nog niet in nabije toekomst toepasbaar zijn wanneer de bestaande aardgasinfrastructuur wordt hergebruikt, en vereist bij uitbreiding van de infrastructuur nader te bepalen investeringen.
- *Waterstof - gas onder hoge druk* transporteren over water heeft weinig significante veiligheidsaandachtspunten, voor *waterstof vloeibaar – sterk gekoeld* zijn er wel aandachtspunten, vanwege de cryogene eigenschappen voor zowel personen als installaties. Ook kan dit niet binnen huidige regelgeving, en aanpassen van deze regelgeving heeft een lange doorlooptijd.

Voordelen waterstof vloeibaar – sterk gekoeld ten opzichte van waterstof – gas onder hoge druk:

- *Gekoelde waterstof* wordt onder significant lagere drukken opgeslagen waardoor de uitstroomkans kleiner is. Door de hoge druk van *gasvormige waterstof* is kans op uitstroming bij een ongeluk en de impact groter.
- De energiedichtheid van *gasvormige waterstof* is lager dan die van *gekoelde waterstof*. Dit betekent dat bij transport over de weg meer transporten nodig zijn, wat de kans op een ongeluk en daarmee het risico iets vergroot.

Algemene constatering:

- Ten aanzien van opslag zijn er voor zowel gasvormig als *vloeibare waterstof* veel significante aandachtspunten, die ten opzichte van elkaar verschillen.
- Voor *gasvormige waterstof* zijn de werkelijke veiligheidseffecten nog niet vertaald naar de rekenmethodieken (het RIVM werkt hier wel aan). De rekenmethodieken kunnen hierdoor nog niet accuraat aangeven hoe groot risico's zijn, waardoor besluitvorming op correcte informatie bemoeilijkt wordt. Daarnaast is het gebrek aan ervaring met opslag van waterstof een aandachtspunt, voor *vloeibare waterstof* is met name de extreem lage temperatuur een aandachtspunt.
- Wanneer gasvormig en vloeibaar worden vergeleken, zijn de grootste verschillen te constateren op het gebied van transport en opslag. *Gasvormig* heeft op het gebied van transport op de langere termijn beter vooruitzichten, en op het gebied van opslag zijn er meer mogelijkheden.
- De verwachting is dat in eerste instantie (komende 5-10 jaar) de waterstofinfrastructuur nog niet de vlucht aan zal nemen die ammoniak zou kunnen nemen. De verwachting is eerder dat komende jaren de groei zal komen door het vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg (met name voor bevoorrading van multi fuel tankstations). Op langere termijn (10 jaar en verder) is de kans groot dat deze door buisleidingen (kleinschalige leidingen) bevoorrad worden, of dat de productie van waterstof hier lokaal zal gaan plaats vinden.

Mitigerende maatregelen

Op dit moment zijn nog weinig maatregelen concreet te maken. Voor een overzicht van mogelijke mitigerende maatregelen (niet limitatief, afkomstig uit het Scenariohandboek Externe Veiligheid) verwijzen wij naar bijlage E. Om de complexiteit weer te geven noemen wij het volgende voorbeeld:

Stel dat gekozen wordt om de keten met gas onder hoge druk verder te ontwikkelen, dan kunnen de genoemde risico's gemitigeerd worden, door de constructieve veiligheid van de tube trailers te vergroten, waardoor uitstroomkansen bij een incident worden verkleind. Dit is echter een maatregel die in internationaal verband moet worden genomen en afgestemd. Zelfs wanneer hier internationale consensus over zou zijn, dan nog zou het vele jaren duren, voordat dit soort maatregelen geïmplementeerd kan worden.

Overige mitigerende maatregelen zitten met name in het toepassen van bestaande wet- en regelgeving rondom omgevingsveiligheid en transportmodaliteiten, zoals Europese richtlijnen rond weg-, water- en spoortransport (ADR, ADN en RID) en nationale wetgeving rond het Basisnet en BRZO-bedrijven. Dit vraagt steeds om complexe situatie specifieke afwegingen.

3.4.2 LOHC - Tolueen – Methylcyclohexaan en DBT-PDBT

Voordelen Tolueen – Methylcyclohexaan ten opzichte van DBT-PDBT:

- In vergelijking met *DBT-PDBT* heeft *Tolueen – Methylcyclohexaan* geen chloor nodig voor de productie van Tolueen. Het produceren van DBT vereist chloor, en dit werkt door in de ketenonderdelen productie en transport. Wanneer productie in Nederland plaatsvindt heeft dit daarom grote consequenties, omdat chloor op de een of andere manier op de locatie moet komen en grote veiligheidsrisico's kent.

Wanneer de productie van DBT niet in Nederlands plaatsvindt, en alleen de DBT-PDBT in de keten wordt meegewogen, zijn de verschillen tussen beide ketens beperkt. Dit laatste scenario is aannemelijk omdat verwacht wordt dat, als LOHC op grote schaal gebruikt wordt, dit geïmporteerd zal worden uit andere continenten. Toluëen is een petrochemisch product, en productie hiervan zal op locaties plaatsvinden waar nu petrochemische industrie gevestigd is.

- *Toluëen – Methylcyclohexaan* kan via buisleidingen worden getransporteerd, *DBT-PDBT* kan niet via buisleidingen worden getransporteerd. Transport via buisleidingen brengt weinig aandachtspunten met zich mee.

Voordelen DBT-PDBT ten opzichte van Toluëen – Methylcyclohexaan:

- *DBT-PDBT* is hoger visceus en daarmee verspreidt het zich minder makkelijk dan *Toluëen – Methylcyclohexaan*.
- De dichtheid van *Toluëen – Methylcyclohexaan* is lager dan die van *DBT-PDBT*. Dit betekent dat bij transport over de weg er meer transporten nodig zijn met *Toluëen – Methylcyclohexaan*, wat de kans op een ongeluk vergroot.

Algemene constatering:

- Beide LOHC's (met name *Toluëen – Methylcyclohexaan*) zijn bekende stoffen in de chemische industrie waar al veel ervaring mee is. Opslag is relatief eenvoudig en kan met weinig extra risico's. Veel richtlijnen staan al beschreven in de PGS-reeks, waarop aangesloten kan worden.
- Wanneer de LOHC-variant *DBT-PDBT* een ontwikkeling doormaakt, is de productie van *DBT* een belangrijk aandachtspunt: hiervoor is chloor vereist. Wanneer de productie van *DBT* in Nederland plaatsvindt, betekent dit waarschijnlijk dat er chloor naar productielocaties moet komen en daarmee dat er chloortransporten plaatsvinden. Wanneer de productie niet in Nederlands plaatsvindt of wanneer *Toluëen – Methylcyclohexaan* wordt toegepast, is LOHC een serieuze optie.
- Voor transport over weg, water en spoor zijn geen grote verschillen tussen de beide LOHC-ketens geconstateerd. Transport via spoor loopt tegen de risicoplafonds basisnet aan, transport via de weg heeft een beperkt aantal aandachtspunten en transport over water zal geen knelpunten opleveren.
- Voor LOHC zal er ook een retourstroom in de vorm van LOC zijn, waarmee het aantal transportbewegingen van deze stoffen verdubbelt. Hiermee zullen de risicoplafonds in het basisnet weg en spoor sneller bereikt worden.

Mitigerende maatregelen

Stel dat gekozen wordt om de keten met *DBT-PDBT* verder te ontwikkelen, dan kunnen de genoemde risico's met chloor gemitigeerd worden door productie van DBT dicht bij de productie van chloor te laten plaatsvinden. Daarnaast kan het risico in Nederland volledig gemitigeerd worden wanneer *DBT* in het buitenland geproduceerd wordt, waar er minder veiligheidsrisico's zijn doordat het gebruik van chloor ver van de gebouwde omgeving plaats kan vinden. Tenslotte kan er onderzoek plaatsvinden naar alternatieve productieprocessen van *DBT* waar geen chloor voor nodig is.

Overige mitigerende maatregelen zitten ook hier met name in het toepassen van bestaande wet- en regelgeving rondom omgevingsveiligheid en transportmodaliteiten, zoals Europese richtlijnen rond weg-, water- en spoortransport (ADR, ADN en RID) en nationale wetgeving rond het Basisnet en BRZO-bedrijven.

3.4.3 Ammoniak – Onder druk vloeibaar en gekoeld vloeibaar

Voordelen Ammoniak – Onder druk vloeibaar ten opzichte van Ammoniak – gekoeld vloeibaar:

- *Gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak* brengt door de lage temperatuur van de stof extra veiligheidsrisico's met zich mee, die voor *onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak* niet van toepassing zijn. Denk hierbij aan arbeidsveiligheid aspecten (bevriezing van ledematen) en mogelijke schade aan objecten. Ook is gekoeld transport over de weg binnen de huidige regelgeving niet toegestaan.
- *Onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak* kan over lange afstanden door pijpleidingen getransporteerd worden. Voor *gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak* voorzien wij dit alleen in korte pijpleidingen op industriële locaties.

Voordelen Ammoniak – gekoeld vloeibaar ten opzichte van Ammoniak – onder druk vloeibaar:

- Door de hogere druk van *onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak* is de kans op uitstroming bij een ongeluk groter. *Gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak* wordt onder lagere drukken opgeslagen waardoor de kans op uitstroming in veel gevallen kleiner is.

Algemene constatering:

- Voor productie, conversie, verlading en opslag van ammoniak zijn de aandachtspunten op het gebied van veiligheid vergelijkbaar voor onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak en gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak.
- De verwachting is dat als de ammoniakketen voor het transport van waterstof op gang komt, dit grootscheeps geïmporteerd wordt van buiten de landsgrenzen en na aankomst in de zeehavens verder getransporteerd zal worden naar industriële locaties. Omdat transport over weg en spoor ook ontmoedigd wordt, is vervoer over het water naar industriële locaties of buurlanden de meest logische optie.
- De rijksoverheid werkt naar aanleiding van de Ketenstudies uit 2004 al lange tijd aan het uitbannen van ammoniaktransport over de weg en het spoor om zo de risico's van deze stof te beperken. Een mogelijke intensivering van deze stromen over weg en spoor lijkt daarom haaks op vigerend beleid te staan, waarin transporten ontmoedigd worden en gezocht wordt naar het bij elkaar brengen van productie- en gebruikslocaties van ammoniak. De ontwikkelingen rond ammoniak kunnen zorgen dat heroverweging van dit beleid moet plaatsvinden, óf dat ammoniak niet de voorkeur zal hebben als waterstofdrager in de energietransitie. Mocht ammoniak in de energietransitie een grote vlucht nemen, dan zal de rijksoverheid een uitspraak moeten doen over de wenselijkheid van ammoniak en hier, indien nodig, nieuw beleid rond formuleren.

Mitigerende maatregelen

Mitigerende maatregelen zijn complex om specifiek te maken, omdat deze van de context afhangen. Net als bij de Ketenstudies is het goed om bij groei van de ammoniakvraag te sturen op productie, opslag en gebruik op zoveel mogelijk dezelfde locatie, door vraag en aanbod bij elkaar te brengen. Stel dat gekozen wordt om de keten van *gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak* verder te ontwikkelen, dan kunnen de genoemde risico's gemitigeerd worden, door de transportroutes kort te houden en dus dicht bij de eindgebruiker ook de productie te laten plaatsvinden. Productie (of aanlanding) en gebruik op dezelfde locatie of zeer dichtbij elkaar heeft dan de voorkeur. Stel dat gekozen wordt om de keten van *onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak* verder te ontwikkelen, dan kunnen de genoemde risico's gemitigeerd worden, door de constructieve veiligheid van de tankwagens te vergroten, waardoor de uitstroomkans op een incident bij transport wordt verkleind. Dit vraagt internationale afstemming en aanpassing van internationale afspraken en zal, indien dit al draagvlak heeft in Europees verband, zeer veel tijd vergen om aan te passen. Hierdoor zien wij dit niet als een reële optie.

Overige maatregelen zitten met name in het toepassen van bestaande wet- en regelgeving rondom omgevingsveiligheid en transportmodaliteiten, zoals Europese richtlijnen rond weg-, water- en spoortransport (ADR, ADN en RID) en nationale wetgeving rond het Basisnet en BRZO-bedrijven.

3.4.4 Waterstof vs. LOHC

Voordelen van waterstof ten opzichte van LOHC zijn:

- Voor waterstof (gasvormig) kan de bestaande aardgasinfrastructuur deels hergebruikt worden. Voor transport van LOHC moet een nieuwe transportroute opgezet worden, wat mogelijk tot knelpunten kan leiden. Wanneer het via pijpleidingen getransporteerd wordt, moeten er nieuwe leidingen aangelegd worden.
- Bij het gebruik van LOHC als waterstofdrager ontstaat er altijd een dubbele transportstroom met gevaarlijke stoffen, omdat de ongeladen "LOC" weer teruggevoerd worden. Dit is bij pure waterstof niet het geval.
- Vrijkomen van LOHC of "LOC" in de open lucht is ongezond en ongewenst. Het vrijkomen door lekkage naar de bodem geeft milieuvervuiling en ecologische schade. Dit is niet het geval voor gasvormige waterstof. Bij lekkage van sterk gekoelde (vloeibare) waterstof naar de bodem, kan ook ecologische schade optreden.
- Een LOHC moet gebonden en ontbonden worden. Dit zijn twee extra omzettingstappen/handelingen ten opzichte van waterstof wat potentieel veiligheidsrisico's en extra (dubbele) transporten met zich mee kan brengen.

Voordelen van LOHC ten opzichte van waterstof zijn:

- De veiligheidscontour voor LOHC transport en opslag is kleiner dan voor waterstof. Bovendien is er meer kennis en ervaring met grootschalige opslag van organische vloeistoffen (waar LOHC's onder vallen). Bij ongevallen is er vooral risico op brand en niet op explosies.

3.4.5 Waterstof (gas en vloeibaar) vs. ammoniak

Voordelen van waterstof ten opzichte van ammoniak zijn:

- *Waterstof* is niet toxisch waar *ammoniak* dat wel is, wat kan resulteren in zeer grote effectafstanden. Hierdoor is waterstof makkelijker ruimtelijk inpasbaar dan ammoniak.
- Transport van *waterstof* door buisleidingen is makkelijker te organiseren dan transport van *ammoniak*. Met name hergebruik van bestaande aardgasleidingen voor waterstof heeft hier een positieve bijdrage.
- Daarnaast zijn er bij *waterstof* minder Europees juridische transportbeperkingen dan bij *ammoniak*. *Gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak* mag niet over de weg en het spoor getransporteerd worden en is niet over lange afstanden te vervoeren via buisleidingen. Transport van *vloeibare waterstof* door buisleidingen is niet mogelijk.
- Het vervoer van *ammoniak* over het spoor ligt onder een vergrootglas en wordt vaak negatief geframed. Zoals eerder al aangegeven ontmoedigt de rijksoverheid al geruime tijd transport van *ammoniak* over weg en spoor.
- *Waterstof* moet aan stikstof gebonden worden om ammoniak te maken en daarna ook ontbonden worden (tenzij ammoniak direct gebruikt wordt). Dit is minimaal één extra omzettingstap/handeling ten opzichte van gasvormige waterstof wat potentieel veiligheidsrisico's met zich mee kan brengen.

Voordelen van ammoniak ten opzichte van waterstof zijn:

- Vigerende veiligheidsnormen en input in risicomodellen zijn bekend voor *ammoniak*. Voor *waterstof* is dit nog in ontwikkeling en moet een reële weergave in de risicomodellen nog geaccordeerd worden.
- *Ammoniak* is weliswaar brandbaar en kan explosief zijn, maar de kans daarop is vele malen kleiner dan bij *waterstof*.

Algemene constatering

- Waterstof zal waarschijnlijk pas over 10-15 jaar grootschalig vervoerd worden (zie 3.4.1). Voor ammoniak is de verwachting dat de komende 5 jaar al een grote groei zou kunnen ontstaan. Op langere termijn (10-15 jaar) verwachten wij minder groei van ammoniak en eerder een aantrekkelijker worden van waterstof transport over weg en door buisleidingen. Hierdoor zal gebruik van ammoniak op langere termijn afnemen ten gunste van waterstof.

3.4.6 LOHC vs. Ammoniak

Voordelen van LOHC ten opzichte van ammoniak zijn:

- De geanalyseerde LOHC's zijn veel minder toxisch dan *ammoniak*, wat bij *ammoniak* kan resulteren in zeer grote effectafstanden.
- Voor LOHC zijn alle transportmodaliteiten mogelijk (behalve buisleidingen voor DBT-PDBT) terwijl *gekoeld vloeibaar gemaakte ammoniak* niet over de weg en spoor vervoerd mag worden en het niet mogelijk is om deze via buisleidingen over lange afstanden te transporteren.

Voordelen van ammoniak ten opzichte van LOHC zijn:

- Bij het gebruik van LOHC als waterstofdrager ontstaat er altijd een dubbele transportstroom met gevaarlijke stoffen omdat de ongeladen "LOC" weer teruggevoerd worden. Dit is met *ammoniak* niet het geval.

3.5 Epiloog

Welke richting of scenario uiteindelijk bewaarheid wordt, het is voor een goede en complete afweging van de kansen en uitdagingen rondom energietransitie belangrijk, dat veiligheidsoverwegingen hierin een plek krijgen. Het voorgaande overzicht is een hulpmiddel om het thema veiligheid een plek te geven in eventuele politieke, bestuurlijke of markttechnische besluiten die nog genomen gaan worden in de komende jaren rond de energietransitie. Hierbij kan de veiligheid van de ketens en waterstofdragers een terechte plek gegeven worden naast andere overwegingen, zoals financiële aspecten, vraag en aanbod uit de markt en alle andere aspecten die afgewogen moeten worden.

4. Verwijzingen

- Agung Tri Wijayanta, T. O. (2019). Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. *International journal of hydrogen energy* 44.
- DNV GL. (sd). *Verkenning waterstofinfrastructuur*. 2017.
- EBN. (2021). *Infographic 2021: Energie in cijfers*. Opgehaald van <https://www.energieinnederland.nl/feiten-en-cijfers/infographic/>
- FME & TNO. (2020). *Elektrolyzers: kansen voor de Nederlandse Maakindustrie*.
- IEA. (2019). *The future of Hydrogen*.
- KIWA. (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*.
- KPMG, TNO, ECORYS. (2004). *Integrale Ketenstudies ammoniak, chloor en LPG*.
- Minister van VROM, DSM en Provincies Limburg en N-Holland. (2009). *Ammoniakconvenant*.
- Minyoung, P. C. (2020). Potential Liquid-Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Systems: A Review on Recent Progress. *MDPI*.
- Netbeheer Nederland. (sd). *Integrale infrastructuurverkenning 2030 - 2050*. 2021.
- Panteia & Movares. (2020). *Routing vervoer gevaarlijke stoffen weg Port of Amsterdam*.
- Panteia. (2020). *Multi Fuel Tankstation - Effecten op het basisnet*.
- PWC. (2021). *HyWay 27: waterstoftransport via het bestaande gasnetwerk?*
- TenneT & Gasunie. (2020). *Infrastructure outlook 2050*.

4.1 Literatuurlijst geraadpleegd voor totstandkoming van tabellen in bijlage C

- Arcadis. (2020). *Lessen van het Kjørbo-incident*.
- AVIV. (2019). *Risicoanalyse/risicomodellering buisleidingtransport van waterstof*.
- Berenschot en Kalavasta. (2020). *Uitrolpaden voor het waterstofsysteem van Nederland in 2050*.
- Bilfinger. (2015). *QRA leidingen Air Liquide*.
- CE Delft. (2018). *Waterstofroutes Nederland*.
- DNV. (2020). *Domestic and Industrial Hydrogen – Relevant Phenomena for safety*.
- EICB. (2020). *Waterstof in de binnenvaart en short sea*.
- Erasmus Universiteit en TKI Dinalog. (2020). *De betekenis van waterstof voor de Nederlandse logistieke sector: heilige graal of luchtballon?*
- European Commission. (2020). COM 301. *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*.
- Gasunie. (2019). *Waterstof - vraag en aanbod nu – 2030*.
- Government of Canada. (2020). *Hydrogen Strategy for Canada – seizing the opportunities for hydrogen*.
- H2 Gateway. (2020). *Poort naar een CO₂-vrije waterstofeconomie*.

- Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness – A cost perspective*.
- Hydrogen Council. (2021). *Hydrogen decarbonization pathways – Potential supply scenarios*.
- Hydrogen Europe. (2020). *Green hydrogen for a European Green deal. A 2x40 GW initiative*.
- Hydrogen Mobility Europe/JU-FCH. (2020). *Emerging Conclusions*.
- Hydrogenious LOHC Technologies. (2021). *Hydrogen infrastructure solutions*.
- IFV. (2021). *Kennisbundel waterstof in de gebouwde omgeving*.
- Ministerie van EZK, Kamerbrief. (2020). *Kabinetsvisie waterstof*
- Ministerie van EZK. (2021). Kabinetsreactie op RLI-advies “Waterstof: de ontbrekende schakel”.
- Nationaal Waterstof Programma (NWP). (2021). *Werkprogramma 2022-2025*
- Planbureau voor de Leefomgeving. (2020). *Waterstof voor de gebouwde omgeving ; operationalisering in de startanalyse 2020*.
- Raad voor de Leefomgeving. (2021). *Waterstof – de ontbrekende schakel*.
- TKI, RVO en FME. (2021). *Excelling in Hydrogen. Ditch technology for a climate-neutral world*.
- TNO. (2020). M10971. *Hydrogen in the Netherlands*.
- Tweede Kamer/Kabinet/Vaste commissie EZK. (2020). *Kabinetsvisie Waterstof en routekaart Groen Gas*.
- University of Stavanger. (2020). *The prospects of blue and green hydrogen in Norway for energy export*.
- Waterstof Industrie Cluster (WIC). (2020). *Een Vlaamse waterstofstrategie 2025-2030*.
- WaterstofNet. (2020). *HyFLOW/Green Octopus*
- Werkgroep H₂ van Klimaattafels. (2019). *Waterstof in het klimaatakkoord*.
- WVIP (2021). *Waterstof Veiligheid en Innovatie Programma*, zie op <https://opwegmetwaterstof.nl/ons-werk-rond-veiligheid-wvip/>.

5. Lijst met afkortingen en begrippen

Begrippen en afkortingen		Stofaanduidingen	
ADN	Verdrag voor vervoer van gevaarlijke stoffen over de binnenwateren: Accord européen relatif au transport des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures	H ₂	Waterstof
ADR	Verdrag voor vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg: Accord relatif au transport des marchandises dangereuses par route	H ₂ O	Water
ATR	Autothermal Reforming	O ₂	Zuurstof
BevB	Besluit externe veiligheid Buisleidingen	NH ₃	Ammoniak
BEVI	Besluit externe veiligheid inrichtingen	CH ₄	Methaan/ aardgas/ biogas
Brzo	Besluit risico's zware ongevallen	LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
CCS	Carbon Capture and Storage	LOC	In deze studie wordt hier de ongeladen LOC mee aangeduid
CCU	Carbon Capture and Utilization	MCH	Methylcyclohexaan
EV	Externe veiligheid	DBT	Dibenzyltolueen
GOS	Gas Ontvangst Station	PDBT/ H18-DBT	Perhydropdibenzyltolueen / H18-Dibenzyltolueen
GR	Groepsrisico	CH ₂ O ₂	Dioxirane (Mierenzuur)
HART	Handleiding Risicoanalyse Transport	CO ₂	Koolstofdioxide
HAZOP	Hazard and Operability study	LPG	Liquified Petroleum Gas
HRB	Handreiking Risicoberekening BevB	LH ₂	Vaak gebruikte afkorting voor vloeibare waterstof (liquid hydrogen)
LBW	Levensbedreigende waarde		
PEM	Proton Exchange Membrane		
PGS	Publicatiereeks gevaarlijke stoffen		
PR	Plaatsgebonden Risico		
PR-contour	Plaatsgebonden risico contour		
RID	Verdrag voor vervoer van gevaarlijke stoffen over het spoor: Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses.		
SMR	Steam Methane Reforming		
SO	Solid Oxide		
SRA	Seismisch Risico Analyse		
VBG	Regeling vervoer over de binnenwateren van gevaarlijke stoffen		

6. Bijlagen

Bijlage A: Compleet ketenoverzicht

Bijlage B: Overzicht na trechtering

Bijlage C: Ketenganalyse tabel

Bijlage D: Gecomprimeerde analyse tabel

Bijlage F: Geconsulteerde partijen



Berenschot

Berenschot is een onafhankelijk organisatieadviesbureau met 350 medewerkers wereldwijd. Al 80 jaar verrassen wij onze opdrachtgevers in de publieke sector en het bedrijfsleven met slimme en nieuwe inzichten. We verwerven ze en maken ze toepasbaar. Dit door innovatie te koppelen aan creativiteit. Steeds opnieuw. Klanten kiezen voor Berenschot omdat onze adviezen hen op een voorsprong zetten.

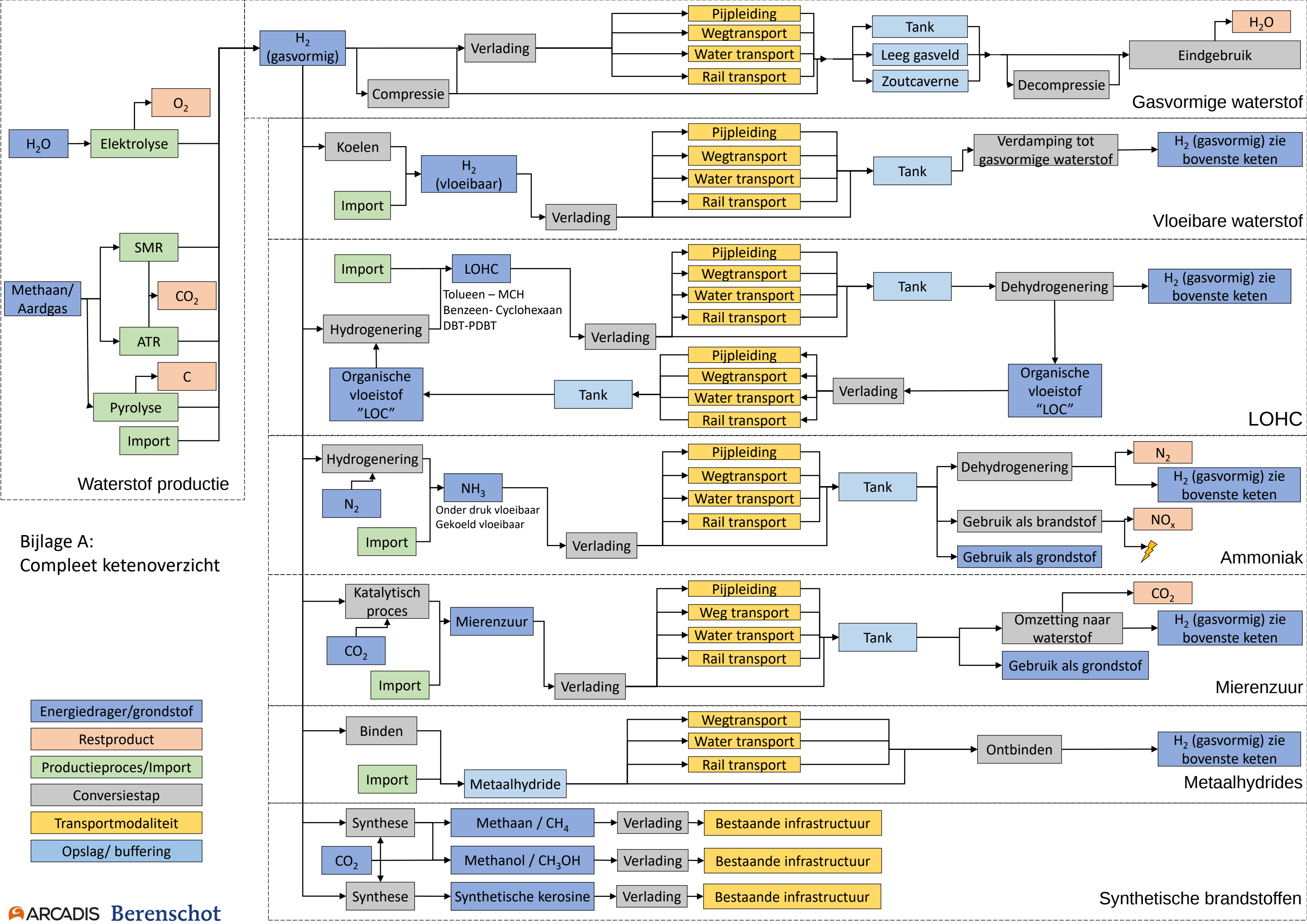
Ons bureau zit vol inspirerende en eigenwijze individuen die allen dezelfde passie delen: organiseren. Ingewikkelde vraagstukken omzetten in werkbare constructies. Door ons brede werkterrein en onze brede expertise kunnen opdrachtgevers ons inschakelen voor uiteenlopende opdrachten. En zijn we in staat om met multidisciplinaire teams alle aspecten van een vraagstuk aan te pakken.



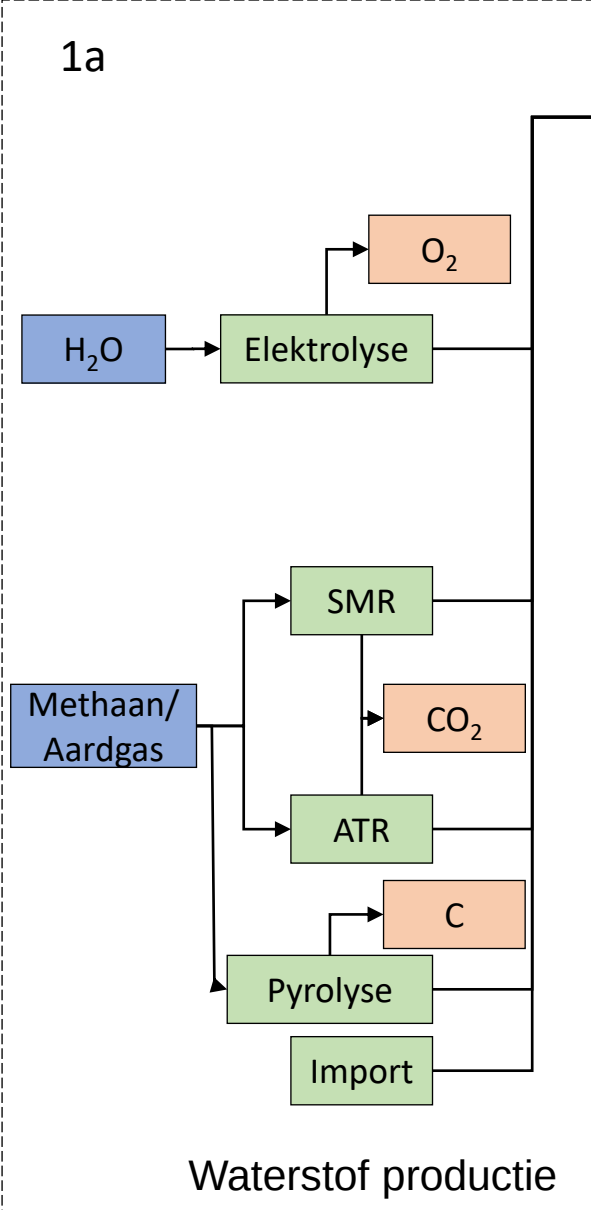
Arcadis is de leidende wereldwijd opererende ontwerp- en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Met de toepassing van onze diepe marktsector kennis gecombineerd met ontwerp, consultancy, engineering, project- en management diensten werken we samen met onze klanten aan uitzonderlijke en duurzame resultaten.

Berenschot B.V.

Van Deventerlaan 31-51, 3528 AG Utrecht
Postbus 8039, 3503 RA Utrecht
030 2 916 916
www.berenschot.nl
[in/berenschot](https://www.linkedin.com/company/berenschot)



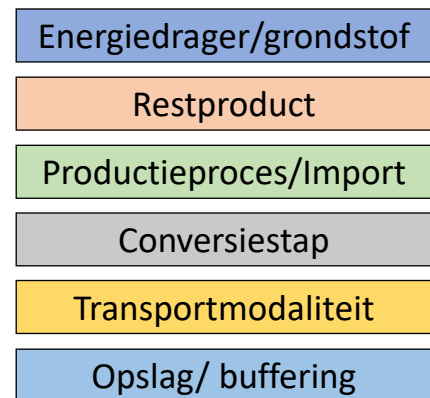
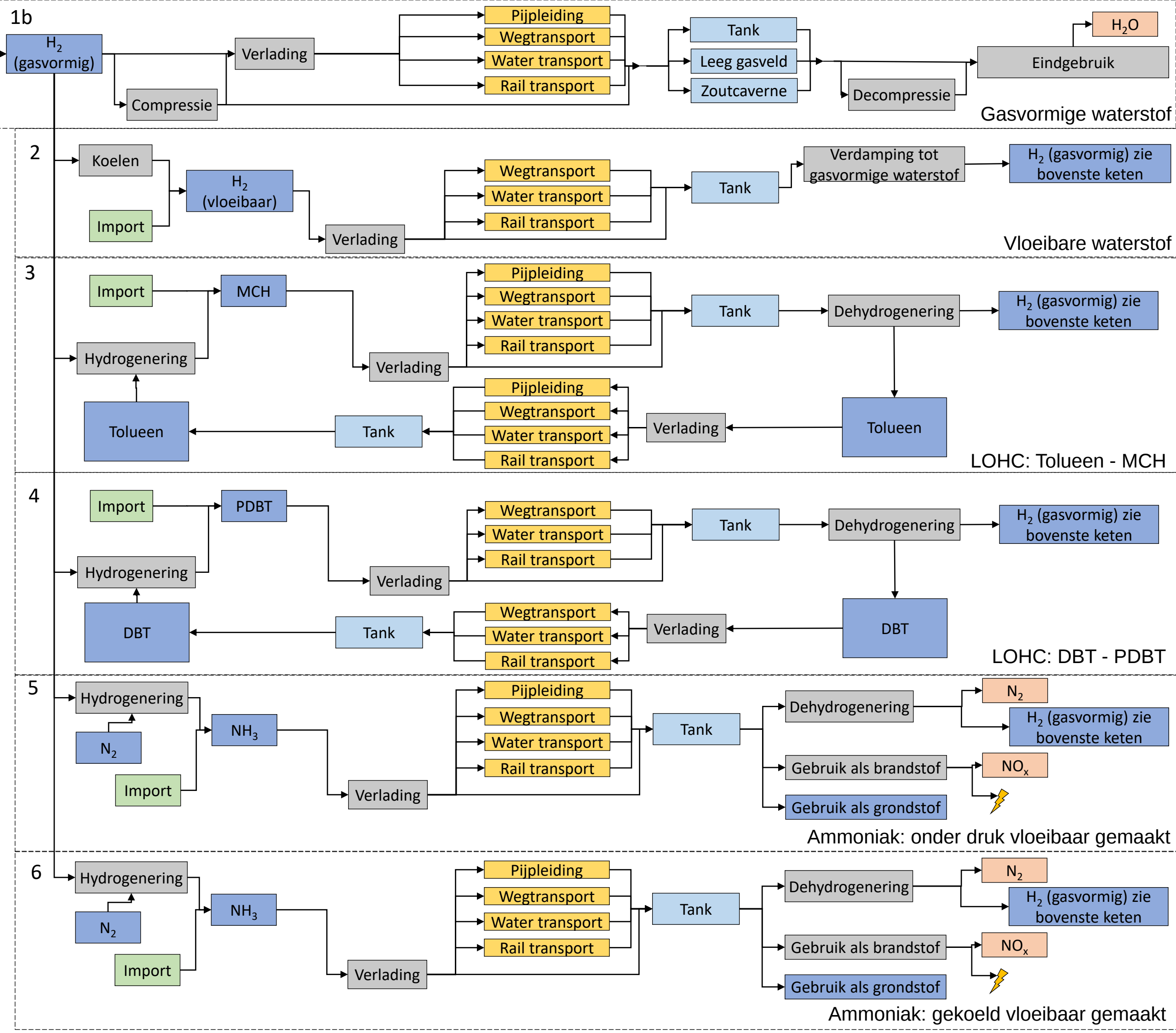
1a



Waterstof productie

Bijlage B:
Overzicht na trechtering

1b



Bijlage C.1 Keten: Waterstof onder hoge druk

Waterstof onder hoge druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Productie Grijze waterstof	Bij waterstofproductie uit fossiele brandstoffen, zoals kolen, aardgas en aardolie, spreken we van grijze waterstof indien de CO ₂ in de lucht komt. Op dit moment wordt zo’n 95% van de geproduceerde waterstof ter wereld op deze manier gemaakt, voornamelijk op basis van aardgas via grote reformers (steam methane reforming – SMR). Bij het omzetten van methaan komt per kg waterstof 7 à 8 kg CO ₂ vrij. Dit is momenteel de goedkoopste manier om waterstof te produceren, maar vanwege het niet duurzame karakter wordt deze optie niet verder beschouwd.	De productie van waterstof is een standaard proces binnen de petrochemie. De productie vindt plaats op locaties die onderdeel zijn van een veel grotere chemische productielocatie. Er kunnen bij een calamiteit consequenties in de directe omgeving zijn: menselijk letsel van aanwezigen op de chemische productielocatie en schade aan andere aanwezige installaties. Waterstof en aardgas op zichzelf zijn zeer brandbare stoffen met effecten op korte afstand en lange afstand.	De productie van waterstof is een standaard proces binnen de petrochemie. De productie vindt plaats op locaties die onderdeel zijn van een veel grotere chemische productielocatie. Er kunnen bij een calamiteit consequenties in de ruimere omgeving zijn: gevaar voor omwonenden op (zwaar) letsel. Waterstof en aardgas op zichzelf zijn zeer brandbare stoffen met effecten op lange afstand. De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid zullen op basis van brand en explosie moeten worden bepaald en zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk.	Bij de productie van grijze waterstof komt CO ₂ vrij. Omdat CO ₂ een broeikasgas is, is de productie van grijze waterstof een ongewenste variant in vergelijking met de productie van blauwe en groene waterstof.	De verwachting is dat er geen nieuwe productielocaties bij komen. Hierdoor treden er geen maatschappelijke consequenties op.	[P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van Hazop studie of CE-beoordeling ¹ .
Productie Blauwe waterstof	Indien bij de grijze productie de CO ₂ (grotendeels) afgevangen wordt en vervolgens opgeslagen (carbon capture and storage – CCS) of als grondstof gebruikt wordt (carbon capture and use – CCU), dan spreken we van blauwe of lage koolstof waterstof. Een andere vorm van blauwe waterstof is de restwaterstof. Deze komt als bijproduct vrij bij andere industriële processen zoals de productie van chlooralkali of van cokesovengas. De blauwe ‘productievorm’ is de overgangsfase naar de groene productie. Het groeipotentieel wordt mede bepaald door de capaciteit en mogelijkheden voor de CCS en CCU. De additionele milieu-impact is dan ook aan deze faciliteiten te koppelen. De projecten rond locatie onderzoek voor opslag nemen toe en er wordt duidelijk gezocht naar maatschappelijk draagvlak voor deze tussenstap. De meeste bekende industriële projecten zullen worden ondergebracht in het Porthos project in de Noordzeebodem.	De productie van waterstof als zodanig geeft in deze variant geen noemenswaardige verandering van de lokale veiligheidssituatie (verschuiving van de PR contour). Op de locatie wordt nu al deze waterstof-stroom geproduceerd. Afvangen en transport van CO ₂ zal over het algemeen in buisleidingen en of schepen plaatsvinden. Hiervan is geen noemenswaardige impact op PR contouren te verwachten. Het CCU en de opslag ondergronds geeft lokaal mogelijk verzurende effecten bij lekkages (zeer minimaal effect volgens Scientific Reports) maar ook dit heeft geen impact op PR contouren. Alleen zeer dicht bij een bron (minder dan 10 meter) kan een verhoogd risico optreden.	De impact van de blauwe productie zit op het gebied van afvangen en opslaan van CO ₂ . De ruimtelijke impact hiervan is in principe zeer beperkt mits de Geologische omstandigheden voor de opslag in de bodem aanwezig zijn.	Indien de transitie wordt gemaakt van grijs via blauw naar groen dan is in het productieproces van waterstof de vervanging van fossiele brandstoffen opgetreden. Ook in de blauwe varianten is al een duidelijke afname van de CO ₂ uitstoot.	CCS-projecten waarbij opslag in de zeebodem noodzakelijk is, zijn geaccepteerd. Het ontwikkelen van CCS-locaties op land (niet waarschijnlijk) kan op bezwaren van omwonenden stuiten.	[P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van Hazop studie of CE-beoordeling.
Productie Groene waterstof	De meest bekende methode om waterstof ‘groen’ te produceren is indien het gemaakt wordt via elektrolyse waar waterstof wordt gewonnen door middel van hernieuwbare elektriciteit. Bij elektrolyse wordt water (H ₂ O) door toevoeging van elektriciteit omgezet in waterstof (H ₂) en zuurstof (O ₂). Ook is het mogelijk om waterstof te maken via de biochemische omzetting van biomassa. Groene waterstof is de meest duurzame vorm van waterstof. Beide methoden hebben op de productielocatie een ruimtelijke impact om de benodigde hoeveelheid elektrische energie op te wekken door wind– of zonneparken. Het aantal projecten en initiatieven op dit vlak is groot en de verwachting is dat dit in de komende tijd ook sterk zal blijven ontwikkelen. In aan aantal ontwikkelingen wordt ook de opwekking door kerncentrales overwogen en met de moderne centrales is deze opwekking mogelijk. Echter gezien de maatschappelijke discussie over dit onderwerp maakt realisatie op korte termijn minder realistisch.	De intensivering van de elektrolyser capaciteit voor de groene productie geeft lokaal nieuwe PR contouren ten gevolge van productie, opslag en compressie van waterstof. Deze contouren zijn over het algemeen goed inpasbaar binnen het huidige beleid voor EV. Het vervoer van de locaties zal vervolgens met een van de modaliteiten verlopen. De impact van de vervoersstromen zijn elders vastgelegd. De omvang van de contouren zijn echt detail werk en zijn sterk afhankelijk van de omvang van het initiatief. BRZO beleid (Besluit Risico’s Zware Ongevallen) komt pas aan de orde bij 5 ton als ‘lage drempel’ en 50 ton voor de ‘hoge drempel’. Een opslag van 5 ton gasvormig waterstof is vrij groot (ongeveer 50.000 m3 bij 1 bar, of ca 80 m3 onder 700 bar) laat staan een van 50 ton.	De ruimtelijk consequentie voor waterstof op basis van groene stroom zijn alleen lokaal en vallen binnen de EV-kaders. Wij voorzien in principe geen knelpunten, maar bij elke nieuwe activiteit kan een lokale afweging nodig zijn die getoetst wordt aan vigerend EV beleid.	Het bij de elektrolyse gevormde zuurstof kan nuttig worden aangewend als waardevol nevenproduct. Hier moeten dan wel de nodige voorzorgsmaatregelen in worden meegenomen omdat zuurstof ook brand bevorderend is en daarmee een mogelijk additioneel risico vormt.	De transitie naar groene waterstof is een positieve bijdrage in de maatschappelijke discussie rond het realiseren van de klimaatdoelstellingen.	[P/M] Bij het ontwerp van de elektrolyser is het afhankelijk van de initiatiefnemer tot welk detailniveau de maatregelen worden meegenomen. Dit is het gevolg van nog ontbrekende regelgeving. Een mogelijke maatregel is het opnemen van deze regelgeving.

¹ CE staat ook als keurmerk op apparatuur en equipment met als verbijzondering de toepassing in ATEX omgevingen.

Waterstof onder hoge druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Conversie (Compressie & expansie)	Voor de ontvangst en het expanderen van het onder druk aangevoerde waterstofgas is een GOS en een reduceerunit nodig. Deze eenheden zullen in de directe omgeving van de eindgebruiker geplaatst zijn. Daar is deze activiteit in te passen met het huidige EV beleid. Zie specifiek voor het BRZO ook de opmerking bij productie onder omgevingsveiligheid.	De intensivering van de conversie capaciteit voor het verbruik van de waterstof geeft lokaal nieuwe PR contouren ten gevolge van ontvangst, expansie en eventueel opslag. Deze contouren zijn over het algemeen goed inpasbaar binnen het huidige beleid voor EV. De aanvoer naar de locaties zal via een van de transport modaliteiten verlopen. De impact van de vervoersstromen zijn elders vastgelegd.	Wij voorzien hierin geen noemenswaardige verschuivingen, overeenkomstig met wat bij productie besproken wordt. De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid zullen op basis van brand en explosie moeten worden bepaald en zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk.	Geen uitstoot en reststoffen.	De transitie naar het gebruik van groene brandstof geeft een positieve bijdrage in de maatschappelijke discussie rond het realiseren van de klimaatdoelstellingen. Waterstof is één van de alternatieven die hierbij speelt.	[P/M] De maatregelen worden in de projecten geïntegreerd rond de ontwikkeling van grootschalig waterstof gebruik. Door toepassing van steeds verdergaande technieken worden maatregelen direct in het ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van Hazop studie of CE-beoordeling.
Opslag (Tanks)	De opslag van gasvormige waterstof (in hogedruktanks) is een bestaande en beproefde techniek. In Nederland staan grote opslagvoorzieningen bij typische gasbedrijven als Air Liquide, Air Products en Linde. Sinds kort is deze activiteit niet langer voorbehouden aan alleen de industrie, maar komt het ook in de bebouwde omgeving voor, voornamelijk bij enkele tankstations. Bij Pesse, langs de A28 (station Green Planet) is de hoge, verticale tank aanwezig en binnenkort in gebruik. Voor de opslag van middelgrote en kleine hoeveelheden (minder dan 1000 liter per eenheid; samen soms wel groter dan 1000 liter) zijn verscheidene soorten van tanks en cilinders gangbaar (los; in rekken ('batterijen'), zie hoofdrapport). Vaak worden mobiele eenheden niet alleen voor de duur van transport gebruikt, maar ook als opslagmedium toegepast. Deze installaties vallen niet onder het BRZO. Dit is pas het geval wanneer de opslag 5 ton (lage drempel) en 50 ton (hoge drempel) is. Een opslag van 5 ton gasvormig waterstof is vrij groot.	De externe veiligheid van (grote) opslagtanks is een cruciaal onderwerp. Voor ondergrondse tanks (zoals gebruikelijk voor LPG ten behoeve van LPG-tankstations) is nog weinig planvorming geconstateerd, maar voor bovengrondse tanks zijn er zowel concrete voorbeelden, als veel initiatieven. Echter, de rekenmethodiek ligt wat achter, of is nog niet geheel up-to-date of consistent. In de BEVI-Handleiding v4.3 is geen verwijzing naar waterstof te vinden. Een separate memo, gericht op (de bevoorrading van) waterstofftankstations behandelt de nodige, nuttige informatie en vermeldt 10 ⁻⁶ contouren in de ordegrootte van 10 tot 35 meter.	Echt grote opslagen zijn nog zeldzaam en komen alleen voor bij de procesindustrie. Overwegingen rondom het groepsrisico zijn daarmee nog beperkt aan de orde geweest. De realistisch hoogst haalbare druk voor grote tanks is 200 bar, bij hogere drukken kan waterstof door de meeste staalsoorten diffunderen, bovendien wordt dan de druk zelf een enorm risico. Opslag op industrieterreinen (Linde, Air Liquide, Air Products, Nouryon e.a.) in tanks dan wel batterijen(bundels)/ tubetrailers zal niet snel een aandachtspunt rond het groepsrisico vormen, maar nu er steeds meer plannen komen voor toepassingen in de bebouwde omgeving (tankstations en wijk-bestemmingen) is een veiligheidsaandachtspunt voorzienbaar. Gascilinder(bundel)s met waterstofgas van 200 bar druk zijn eveneens een potentieel aandachtspunt.	Opslag is typisch een deel van de keten, waar dichtheid (hermetische geslotenheid) een voorwaarde en een feit is. Uitstoot is niet zo relevant, en kleine lekjes van waterstof geeft geen bezwaarlijke gezondheids-issues.	De maatschappelijke consequenties houden verband met de algemene status van het draagvlak voor waterstof. Bij begrip voor de noodzaak van de energietransitie zijn de consequenties te managen, bij grote weerstand tegen waterstof wordt het een uitdaging om opslagfaciliteiten te gaan realiseren.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de projecten aan de hand van onder andere de PGS35. [P/M] Maatregelen om incidenten bij een opslagfaciliteit te voorkomen of te verkleinen zijn enerzijds de technische middelen, procedures en inspecties (bron), en anderzijds de mogelijkheden die de Omgevingswet nadrukkelijk dichterbij brengt met de brand- en explosie-voorschriftengebieden (Bkl, Bbl).
Opslag (Grootschalig)	Vaak worden mobiele eenheden niet alleen voor de duur van transport gebruikt, maar ook als opslagmedium toegepast. Deze installaties vallen niet onder het BRZO. Dit is pas het geval wanneer de opslag 5 ton (lage drempel) en 50 ton (hoge drempel) is. Een opslag van 5 ton gasvormig waterstof is vrij groot. Naast opslagapparatuur wordt ook volop gekeken naar grootschalige opslag in zoutcavernes en/of lege aardgasvelden. Dat vraagt om geheel andere afwegingen, met een geheel ander pakket van (veiligheids-) eigenschappen.	Ook voor de opslag van grote hoeveelheden waterstof in zoutcavernes of in oude gasvelden is de huidige rekenmethodiek (SAFETI-NL) niet toegesneden. Een onverhoopt groot incident is dan een situatie die los van de QRA-systematiek zou moeten worden beoordeeld. Afhankelijk van de locatie en de wijze van implementatie kan bovengrondse veiligheid van de installatie, seismisch risico of lekkage een aandachtspunt zijn. Deze aspecten dienen per locatie en implementatie specifiek beoordeeld te worden. Door de verschillen tussen methaan en waterstof zijn het ook nieuwe risico's voor die gebieden die nieuwe PR contouren zullen geven.	De ruimtelijke consequenties voor (met name) grootschalige opslag van gasvormige waterstof kunnen aanzienlijk worden. Ten eerste zal inpassing van (nieuwe) opslagfaciliteiten een secure inventarisatie en afstemming vergen, daarna zal (na akkoord op plannen en realisatie) juist inpassing van andere, nieuwe bestemmingen binnen het invloedsgebied van die opslag ruimtelijke beperkingen kennen. Voor de opslag van grote hoeveelheden waterstof in zoutcavernes of in oude gasvelden is de huidige rekenmethodiek (SAFETI-NL) niet toegesneden. Een onverhoopt groot incident is dan een situatie die los van de QRA-systematiek zou moeten worden beoordeeld. Tenslotte verdient de bestaande rekenmethodiek meer aandacht voor explosierisico's. In vergelijking met brandrisico's lijkt de aandacht voor explosies te beperkt.	Geen uitstoot en reststoffen	Geen noemenswaardige consequenties.	[P/M] Voor de winning van koolwaterstoffen is een Seismisch Risico Analyse (SRA) vereist. Voor opslag is nog geen specifieke procedure t.a.v. risicoanalyse ontwikkeld. Tot dat moment wordt grotendeels conform de SRA van koolwaterstoffen gewerkt. Additionele potentiële risico's als lekkage langs de put en de afsluitende laag, Seismische Risico Analyse en veiligheid van de bovengrondse installaties dienen hierbij meegenomen worden.
Verlading	In elk van de ketens zal er aan het transport een verladingsmoment verbonden zijn. Of het nu over de weg, per spoor of per schip wordt getransporteerd, het verladen vormt een zeker risico. In de HRB (Handreiking risicoberekening Bevb) zijn hiervoor specifieke rekenregels opgenomen hoe deze onderdelen dienen te worden meegenomen in de risicomodellen. Bij de verlading spelen vooral de onderdelen als de laad- losslang en armen een bepalende rol. Daarnaast zijn ook de aansluit diameters, de hoeveelheden en de heersende drukken relevant. In algemene zin kan worden gesteld dat indien er sprake is van een toename in een bepaalde modaliteit, ook de verlading in eenzelfde mate zal toenemen. Bij een intensivering van de keten zullen ook de verladersrisico's navenant toenemen.	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn medebepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij relatief kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving groot (kan oplopen tot 50-60% van de risicocontour) omdat het gekoppeld is aan de leiding diameter van de verladingseenheid (auto, wagon of schip) en de hier heersende druk. Omdat dit een vast gegeven is, is die absolute bijdrage overal gelijk maar varieert de relatieve bijdrage sterk.	De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid zullen op basis van brand en explosie moeten worden bepaald en zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk. De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Bij grootschalige opslag of productie en een verlading per tankauto (25m³) zal het omgevingsrisicobeeld primair door de opslag worden bepaald. Indien de verlading per treinwagon (circa 50 m³) of per schip (circa 350 m³) plaatsvindt, schuift het zwaartepunt meer naar de verladingseenheid.	Geen uitstoot en reststoffen	Geen noemenswaardige consequenties.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de projecten aan de hand van onder andere de PGS35. [P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de waterstof projecten. Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden mitigerende maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van waterstof ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.

Waterstof onder hoge druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Buisleiding	Het transport van gasvormige waterstof door buisleidingen is vrij gangbaar. Binnen Nederland heeft het bedrijf Air Liquide enkele langere trajecten in beheer en exploitatie; daarnaast zijn er lokale leidingen, waaronder die in Delfzijl-Farnsum voor de bevoorrading van het tankstation (speciaal voor de busdienst) ter plekke, en binnen Moerdijk en de Maasvlakte. De leidingen van Air Liquide bestaan al decennia en lopen van de Rotterdamse Haven [Maasvlakte naar België bij Woensdrecht]. De ordegrootte van de druk is 100-110 Bar. Ze liggen ondergronds en doorkruisen verschillende waterwegen, inclusief de ligging in de Buisleidingenstraat Moerdijk. Behalve deze specifieke, voor waterstof ontworpen en geperfectioneerde leidingen, zijn er sterke nationale en internationale initiatieven om de bestaande, uitgebreide aardgasnetwerken te adapteren voor toepassing als transportmiddel voor waterstof (o.a. project HyWay27). Deze transitie komt stap-voor-stap dichterbij als realistische optie en heeft het grote voordeel van én hergebruik van de dure, adequate infrastructuur, én het niet hoeven aanleggen van een geheel nieuw netwerk (dit is zeer kostbaar en bezorgt maatschappelijk veel overlast). Er bestaan nog wel aandachtspunten als het gaat om aansluiten van nieuwe producenten en/of gebruikers van het net. Het is op dit moment nog niet duidelijk of de risico-contouren groter of kleiner worden bij het gebruik van waterstof in bestaande leidingen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de multifuel tankstations (MFT's) die aangesloten kunnen gaan worden op termijn op het buisleidingnetwerk voor het lokaal tanken (wat waarschijnlijk deels nieuw aangelegd moet worden). Daarbij is van belang om onderscheid te maken in het hoofdnet (hoge druk) en het distributienet (lage druk, naar gebruikers [wonen, werken]).	Het plaatsgebonden risico van buisleidingen met gasvormig waterstof hangt onder meer af van de buisdiameter, de druk, de diepteligging onder het maaiveld, en van de posities van de afsluiters (om in te blokken bij incidenten). De regelgeving is vastgelegd in het Besluit EV buisleidingen (Bevb). Uit praktijkberekeningen voor Air Liquide (met Safeti-NL 6.54) zijn letale effectafstanden van net boven de 100 meter bekend (bij het scenario 'jet fire'). De PR-contour (10⁻⁶) kan tot enkele tientallen meters reiken. Indien het aardgasnet wordt toegepast voor waterstof, hetgeen wordt beoogd, zijn andere dimensies van de leidingen aan de orde, ze zijn aanzienlijk dikker en kunnen aldus bij gelijke druk meer waterstof tegelijk transporteren (en meer brandbaar gas lekken bij incidenten). Lekkages bij hoge druk leidingen geven eerst een jet release die als gevolg van de lage ontstekingsenergie snel een fakkel zullen opleveren. De afmetingen van de fakkel zijn sterk afhankelijk van de druk, maar in ordegrootte vergelijkbaar met aardgas. Meer MFT's betekent dat er lokale aanvoer van waterstof zal mogelijk gemaakt worden (op lange termijn) via buisleidingen of lokaal geproduceerd, waardoor steeds een lokale veiligheidsafweging gemaakt moet worden.	De ruimtelijke consequenties voor buisleidingen die gasvormig waterstof gaan transporteren kunnen naar verwachting meevallen, indien inderdaad het bestaande aardgasnetwerk zal worden benut. In dat geval zal een vergelijkbaar ruimtebeslag worden vereist als nu voor aardgas het geval is. Het groepsrisico voor lange buisleidingtrajecten varieert regelmatig van nihil naar waarden dichterbij de oriënterende waarde, afhankelijk van de omgeving. Met het netwerk van Air Liquide als illustratie, is goed te zien dat deze zoveel mogelijk buiten alle bebouwde kommen is aangelegd. Er zijn geen doorkruisingen van stedelijke gebieden. Bij toekomstige toepassing van het (totale) aardgasnetwerk, kunnen wel aandachtspunten rond het groepsrisico worden voorzien. Vooral bij (nieuwe) multifuel tankstations zal hier aandacht voor moeten zijn om steeds de analyse te maken. Men kan de kennis over de huidige, landelijke GR-situatie 'overhevelen', en de bekende aandachtspunten opnieuw als attentie-locaties beschouwen. De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid zullen op basis van brand en explosie moeten worden bepaald en zijn sterk afhankelijk van leidingdiameter en druk.	Uitstoot van pure waterstof is niet gewenst, maar het vervliegt snel. De stof is nauwelijks giftig voor de mens. Uitstoot van het reactieproduct water (bij brand) is niet ernstig voor het milieu. Al met al geen zwaar issue.	Het maatschappelijke effect van waterstoftransport door buisleidingen wordt gezien als uitdagend, maar niet als zeer problematisch. Het uitdagende zit mogelijk in het imago van de veiligheid van waterstof. Ook de aanleg van nieuwe buisleidingen kan lastig zijn wegens lokale inpassing en effecten en de grote kosten die dat met zich meebrengt.	[P] Maatregelen kunnen bestaan uit alles qua regelgeving wat met graafwerkzaamheden te maken heeft (KLIC/Wion), met ruime afstanden van windturbines tot de leidingen en verder uit een zeer adequaat lekkage-preventie en lekkage-detectieregime.

Waterstof onder hoge druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Weg	De rol van waterstof dat over de weg vervoerd wordt is nog niet heel groot op dit moment, maar kan gaan toenemen op relatief korte termijn wanneer de vraag naar waterstof voor bevoorrading van schepen, treinen en auto's toeneemt. Er zijn signalen dat verladers voor hun wegvervoer de komende vijf tot tien jaar gaan starten met het overschakelen naar waterstof als brandstof (onder invloed van emissievrije zones in binnensteden). In dat geval gaat er meer vervoerd worden over de weg om waterstoftankstations te bevoorraden. Deels is dit vervanging van brandstof voor auto's, schepen en niet geëlektrificeerde treinen. In dat geval zal vooral sprake zijn van <i>verdringing</i> van benzine, diesel en aardgas als getransporteerde stoffen en dus niet alleen maar sprake zijn van <i>extra</i> transport. De mate waarin dit gebeurt is nog niet te voorspellen, maar de verwachting is dat komende jaren meer tankstations geopend worden en dat kleinschalige pilots met waterstof bussen en treinen zullen worden uitgebouwd. Op lange termijn zijn er dus signalen dat er meer waterstof nodig is voor bevoorrading van (nog te ontwikkelen) waterstoftankstations. Tot en met 2050 betekent dat er twee trends belangrijk worden: in eerste instantie zal meer vervoer van waterstof over de weg plaatsvinden. Op langere termijn zal dit transport kleiner worden wanneer MFT's lokaal waterstof produceren of op buisleidingen aangesloten worden.	Waterstof wordt op dit moment als GF0 categorie meegeteld in de Handleiding Risicoanalyse Transport (HART). Dat betekent dat het rekenkundig gezien <i>geen</i> risicorelevante stof is en <i>niet</i> meegenomen wordt in de risicoberekeningen (dit geldt ook voor diesel overigens). Qua risicoberekeningen kan dit betekenen dat wanneer waterstof LPG vervangt de <i>berekende</i> risico's kleiner worden. Wanneer benzine verdrongen wordt, betekent dit dat de lokale veiligheidsafstanden kleiner kunnen worden, omdat brandbare vloeistoffen hier met name op van invloed zijn. Reëel gezien zullen de risico's bij grote groei toenemen, immers meer brandbare gassen betekent ook een potentieel groter effect. Wanneer waterstof als vervanger komt van fossiele brandstoffen kan dit op termijn een positief effect hebben op de te vervoeren gevaarlijke stoffen (potentieel kleinere PR 10⁻⁶ contour). Wanneer echter meer transport plaats vindt bovenop fossiele brandstoffen kan dit tot nieuwe knelpunten leiden. Een grotere PR10⁻⁶ betekent dat er in potentie een groter gebied is waar kwetsbare objecten in staan. Deze kans achten wij niet heel groot, omdat de contour waarschijnlijk niet groter wordt en als die groter wordt er waarschijnlijk niet veel kwetsbare objecten in staan. NB: De categorisering van waterstof wordt in de komende jaren tegen het licht gehouden.	Ook hier geldt de categorisering als GF0 en dezelfde overwegingen over de verdringing. Meer transport van waterstof ter vervanging van benzine of diesel betekent dat er meer brandbare gassen vervoerd worden met grotere effectafstanden door explosiescenario's. Daarom geldt hier dat als serieuze overweging moet meegegeven worden waterstof wel als risicorelevant te modelleren (categorie GF3 in plaats van GF0), omdat het effect van dit type stof veel groter kan zijn. Desondanks lijkt het er in een Panteia studie niet op dat er overschrijdingen komen van de risicoplafonds uit het Basisnet weg ondanks aanzienlijke groei. NB: De categorisering van waterstof wordt in de komende jaren tegen het licht gehouden.	Wanneer het getransporteerde waterstof voornamelijk als vervanging komt voor andere brandstoffen is dat positief voor de CO₂ uitstoot.	Transport over de weg ligt niet onder vuur op dit moment. Indien er de nodige knelpunten bijkomen, of wanneer de monitoring uitwijst dat er toch de nodige knelpunten zijn kan dit toenemen. Tot die tijd lijkt dit stabiel.	[P] Maatregelen voor het transport over de weg zijn vastgelegd in het ADR. Om een goed beeld te krijgen van de gevolgen van waterstof moet dit als GF3 (of in ieder geval reëler dan GF0) gemodelleerd worden. Op die manier kan een reëel beeld volgen over de risico's (met name de effecten die dit op het Basisnet weg kan hebben). Dat is op dit moment nog niet van toepassing. Hierdoor kunnen wij nog niet aangeven welke maatregelen nodig zijn. Uitzondering hierop zijn eventuele transportroutes aanwijzen voor dit type transport om drukke gebieden en bijvoorbeeld tunnels te mijden.
Water	Het transport van gasvormige waterstof (dus in drukapparatuur) over het water is niet gebruikelijk, tenzij het om kleinere eenheden gaat, zoals een afzonderlijke cilinder, of een klein aantal cilinders: als stukgoed. Tanks in, of als scheepsruimtes, of tankcontainers gevuld met gasvormige waterstof [UN 1029] zijn in Nederland niet in de scheepvaart te vinden. Er was tot nu toe geen behoefte aan en er is daarmee ook geen techniek of een pakket regelingen voor ontwikkeld. Er zijn ook weinig signalen dat de maritieme of de binnenvaart deze slag wil gaan maken. De aandacht voor import en eventueel doorvoer is veel meer gericht op het (zee)transport van <i>vloeibaar</i> waterstof (LH₂, zie de keten waterstof 'sterk gekoeld'). Vloeibare waterstof heeft onder meer een veel gunstiger verhouding van massa per volume, zodat men met dezelfde scheepsinhoud veel meer waterstof kan vervoeren.	Op lokaal niveau zullen voor kleinere eenheden zoals hoge drukcilinders de veiligheidsnormen (PR-contouren) niet overschrijden of op de oever (bij bebouwing) tot uiting komen. Grotere tanks worden niet verwacht en ook dan is er naar verwachting veel ruimte binnen het Basisnet water om dit in te vullen.	PR-contouren voor kleinere eenheden zoals hoge drukcilinders zullen niet op de oever tot uiting komen. Grotere tanks worden niet verwacht. Hiermee voorzien wij geen aandachtspunten op de lange termijn.	N.v.t.	Gering in de praktijk	N.v.t.

Waterstof onder hoge druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Spoor	Vervoer van gevaarlijke stoffen over het spoor is veilig en waterstof onder druk maakt dit niet per definitie veel onveiliger. Op dit moment lijken er nog geen stromen vervoerd te worden over het spoor. In 2020 betrof het een enkele wagen. Zolang de huidige LPG achtige stoffen, zoals propaan en butadiëen niet vervangen worden (immers, hier is een klimaat belastend restproduct mee gemoeid) door waterstof zien wij op korte termijn hier geen grote stromen op gang komen, mede doordat deze economisch nog niet realistisch zijn. In 2023 is voorzien dat nieuwe vervoersprognoses gemaakt gaan worden voor spoorvervoer van gevaarlijke stoffen. Dit zou een aanvullend perspectief kunnen schetsen op de ontwikkelingen in de jaren 2023-2033. Tot die tijd is de invloed hiervan nog zeer beperkt. Wanneer de stroom echter toch toeneemt, ook al is deze toename over het spoor minimaal, dan kan zelfs een kleine toename al grote effecten hebben op het Basisnet Spoor. De ruimte die het Basisnet Spoor biedt staat al sinds inwerkingtreding van het Basisnet onder grote druk, omdat voor een aantal routes de risicoplafonds laag zijn en bij relatief lage aantallen transport deze plafonds al overschreden worden. Een extra stroom brandbare gassen bovenop de al bestaande stromen (dit kan al vanaf enkele honderden wagons op jaarbasis) leidt dan al tot extra knelpunten.	Op lokaal niveau geldt het plaatsgebonden risico als bindende norm die vooral wordt beïnvloed door de hoeveelheid brandbare vloeistoffen die vervoerd worden en minder door brandbare gassen. Gezien de overwegingen zien wij nog geen positieve of negatieve ontwikkelingen ten aanzien van het PR, omdat de hoeveelheid waterstof over het spoor relatief zeer beperkt is op korte termijn. Op lange termijn verwachten wij voor de PR ook geen grote effecten. Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra knel- of aandachtspunten leiden.	Vervoer van gevaarlijke stoffen per spoor is een gevoelig onderwerp, omdat het al een aantal jaren onder een politiek vergrootglas ligt. In afgelopen jaren zijn de risicoplafonds voor een aantal plekken overschreden (door goed verklaarbare redenen), waardoor hier al knelpunten bestaan. Deze lijken op dit moment niet groter of kleiner te worden bij de huidige beperkte hoeveelheid. Wanneer echter toch een aanzienlijke stroom op gang komt bovenop huidige stromen van brandbare gassen, dan kan op bepaalde routes al snel de druk op het Basisnet spoor verder toenemen. Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra knel- of aandachtspunten leiden.	Indien waterstof als vervanging komt voor andere brandbare gassen is dat elders in de keten positief voor de CO ₂ uitstoot. Vervoer over het spoor is milieuvriendelijker dan via weg of water en leidt tot minder uitstoot van schadelijke gassen.	Het transport is zichtbaar, wordt vaak negatief geframed en er zijn gevoeligheden. Deze zullen door extra transport van waterstof niet veranderen in positieve of negatieve zin, tenzij de stromen extreem toenemen en op lokaal niveau knelpunten opleveren.	Maatregelen zijn op dit moment niet van toepassing of nodig. Wanneer toekomstige stromen toenemen en er op belangrijke Basisnet routes grote knelpunten optreden, zijn preventieve en mitigerende maatregelen waarschijnlijk nodig. In het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor zijn hier verschillende opties voor genoemd, maar die zijn lastig uit te voeren. Wanneer daarom in 2023 in de nieuwe prognoses grote ontwikkelingen voorzien worden, moet hier actief mee aan de slag gegaan worden om maatregelen te nemen.

Bijlage C.2 Keten: Pure Waterstof (vloeibaar) sterk gekoeld

Waterstof gekoeld	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Productie (Koelen tot vloeibare waterstof)	Aansluitend op de beschrijving voor Productie van waterstof gas is er voor het vloeibaar maken een additionele stap noodzakelijk. Waterstof wordt vloeibaar door sterk afkoelen. Bij een temperatuur van 20,28 Kelvin (–252,88°C) en atmosferische druk bar is waterstof vloeibaar. Omdat het vloeibaar maken van waterstof erg veel energie kost, wordt dit bijna nooit gedaan. De energie die noodzakelijk is om waterstof vloeibaar te maken en te houden is ongeveer met een derde van de energie-inhoud in de opslagtank. Het maken van vloeibaar waterstof zorgt voor 10% meer CO ₂ -uitstoot dan het gebruik van waterstof als gas. In vloeibare vorm is een opslag van 70 m ³ noodzakelijk om de inrichting onder de lage drempel van het BRZO te laten vallen.	Voor de productie (koeling) van vloeibare waterstof zijn de risico's voor de omgeving niet afwijkend ten opzichte van de productie van gasvormig waterstof. Het proces van koeling naar -253°C levert geen additioneel scenario voor het plaatsgebonden risico.	De ruimtelijk consequenties voor de conversie op locatie zijn alleen lokaal en moeten inpasbaar zijn binnen de daar geldende beleidskaders voor externe of omgevingsveiligheid. Dit kan knelpunten opleveren op het moment dat de behoefte aan nieuwe locaties groot wordt. Echter dit is te allen tijde een lokale afweging in ruimtelijke plannen. Dit kan daarmee voor de expansie een knelpunt opleveren. (bijvoorbeeld sterke behoefte aan binnenstedelijke waterstof tankstations daar waar LPG net is uitgefaseerd).	Geen restproducten.	N.v.t.	[P] Strikte bewaking van procescondities (voorkomen van 'boil-over').
Conversie (Verdampen tot gasvormige waterstof)	Het op locatie weer vrijmaken van de energie uit de vloeibare waterstof levert qua proces een vergelijkbare type installatie op als bij productie is aangegeven. Deze eenheden zullen in de directe omgeving van de eindgebruiker geplaatst zijn. Op die (industriële) locatie is deze activiteit in te passen met het huidige EV beleid.	Voor de conversie (verdampen) van vloeibare waterstof zijn de risico's voor de omgeving niet afwijkend ten opzichte van de productie van gasvormig waterstof. Het verdampen naar gasvormige waterstof levert geen additioneel scenario voor het plaatsgebonden risico.	De ruimtelijk consequenties voor de conversie op locatie zijn alleen lokaal en moeten inpasbaar zijn binnen de daar geldende beleidskaders voor externe of omgevingsveiligheid. Dit kan knelpunten opleveren op het moment dat de behoefte aan nieuwe locaties groot wordt. Echter dit is te allen tijde een lokale afweging in ruimtelijke plannen. Dit kan daarmee voor de expansie een knelpunt opleveren. (bijvoorbeeld sterke behoefte aan binnenstedelijke waterstof tankstations daar waar LPG net is uitgefaseerd).	Geen restproducten.	N.v.t.	[P] Strikte bewaking van procescondities.
Opslag	De opslag van sterk gekoeld waterstof (cryogene techniek) is binnen de nationale en internationale industrie een bewezen en voldoende veilige technologie. Als illustratie bij dit thema kiest men er nogal eens voor om de bol van de NASA op het Kennedy Space Center/Cape Canaveral te laten zien vanwege zijn imposante uitstraling. Die opslagtank staat er al meer dan 50 jaar.  Het opslaan bij de extreem lage temperatuur (voor atmosferische druk is dat -253°C) is technisch verre van eenvoudig, en daar komt bij dat er op termijn verdamping kan optreden, door langzame opwarming. De afgebeelde tank is specifiek ontworpen om dit proces maximaal te voorkomen, maar in veel andere opslagvaten is het een veiligheidsaspect dat concreet aan de orde is. Deze zogeheten 'boil-off' is een nadelige consequentie; doordat het een inherente eigenschap is, houdt men er vanzelfsprekend rekening mee (bijvoorbeeld door een afblaasventiel), maar aandacht is in ieder geval vereist. Een ander belangrijk, complicerend aandachtspunt is, dat bij deze lage temperaturen ook lucht (of pure zuurstof en/of stikstof) vloeibaar of vast worden.	Het onbedoeld en ongewenst vrijkomen van sterk gekoelde waterstof kan een groot risico voor de omgeving zijn. Er zijn diverse ernstige risico's. De extreem lage temperatuur kan zowel installatie-onderdelen als personen directe schade toebrengen. Afhankelijk van het precieze scenario (uitstroomtempo, moment van ontsteking etc.) kan een incident allerlei vormen krijgen, en is de beheersbaarheid gering. Bij de opslag van vloeibare waterstof is bij een externe brand een mogelijkheid dat bij instantaan falen van de omhulling een explosie kan optreden. Alleen door de aard van waterstof zal het niet volledig vergelijkbaar zijn met LPG, het effect is beperkter. Dit komt mede doordat het voor vloeibare gekoelde waterstof niet mogelijk is om de benodigde adiabatische warmte uit de eigen vloeistof te onttrekken, dit moet uit de omringende lucht komen en die warmte inhoud is beperkt. Praktijkproeven in derde kwartaal van 2021 zullen hier definitief uitsluitsel over geven.	De ruimtelijke impact is aanzienlijk. Bij grootschalige opslag, hetgeen technisch haalbaar is, behoudt men bij voorkeur flinke afstand tot de bebouwde omgeving. Het is niet aannemelijk dat grote opslagunits zullen worden geplaatst in woongebieden.	De uitstoot is chemisch gezien niet al te verontreinigend, maar de zeer lage temperatuur kan fysieke en ecologische schade toebrengen aan met name de bodem en maaiveld.	Maatschappelijke consequenties kunnen gericht worden op het verwerven en stimuleren van vertrouwen (draagvlak), dat deze waterstof-identiteit geschikt is voor een belangrijke rol in de energietransitie, en dat de veiligheid onder sterke controle staat.	[P] maatregelen zijn te voorzien in de techniek, opleiding, onderhoud en inspectie, dus hoofdzakelijk bij de bron.

Waterstof gekoeld	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
	Cryogene opslag heeft wel het grote voordeel dat het insluitsysteem (tank etc.) veel meer gewicht aan waterstof kan bevatten dan een gasvormige variant met dezelfde inhoud. Cryogene waterstofopslag is technisch complex maar realiseerbaar. In combinatie met import(/export) is er een aantal voor-en nadelen, die elkaar in balans kunnen houden en van deze waterstofvariant een kandidaat maken.					
Verlading	In elk van de ketens zal er aan het transport een verladingsmoment verbonden zijn. Of het nu over de weg, per spoor of per schip wordt getransporteerd, het verladen vormt een zeker risico. In de HRB zijn hiervoor specifieke rekenregels opgenomen hoe deze onderdelen dienen te worden meegenomen in de risicomodellen. Bij de verlading spelen vooral de onderdelen als de laad- losslang en armen een bepalende rol. Daarnaast zijn ook de aansluit diameters, de hoeveelheden en de heersende drukken relevant. In algemene zin kan worden gesteld dat indien er sprake is van een toename in een bepaalde modaliteit, ook de verlading in eenzelfde mate zal toenemen. Bij een intensivering van de keten zullen ook de verladersrisico's navenant toenemen.	De faalkansen van verladinginstallaties zijn medebepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij relatief kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving groot (kan oplopen tot 50-60% van de risico-contour) omdat het gekoppeld is aan de leiding diameter van de verladingseenheid (auto, wagon of schip) en de hier heersende druk. Omdat dit een vast gegeven is, is die absolute bijdrage overal gelijk maar varieert de relatieve bijdrage sterk. Voor de afleverstations bevoorraad met vloeibare waterstof is de afstand tot de 10⁻⁶ contour 30 meter en is de effectafstand 130 meter. Dit is groter ten opzichte van de respectievelijk 24 meter en 40 meter bij conventionele brandstoffen.	De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid zullen op basis van brand en explosie moeten worden bepaald en zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk. De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Bij grootschalige opslag of productie en een verlading per tankauto (25m³) zal het omgevingsrisicobeeld primair door de opslag worden bepaald. Indien de verlading per treinwagon (circa 50 m³) of per schip (circa 350 m³) plaatsvindt, schuift het zwaartepunt meer naar de verladingseenheid. De afstand voor de 10⁻⁹ contour is bij de afleverlocatie van vloeibare waterstof circa 270 m (RIVM). Dit is aanmerkelijk groter dan bij conventionele brandstoffen.	N.v.t.	N.v.t.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de waterstof projecten. Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden mitigerende maatregelen direct in het ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van waterstof ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen. [P/M] Er wordt aansluiting gezocht bij PGS 9. Deze is gericht op cryogene gassen maar is niet expliciet beschreven voor waterstof.
Buisleiding	Het transport van vloeibare waterstof in buisleidingen is geen realistische optie vanwege grote thermische verliezen. Deze optie is daarom niet verder uitgewerkt.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.

Waterstof gekoeld	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Weg	De standaard ongevalskans op een ongeval op de weg is groter dan op het spoor. Vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg ligt toch minder onder een vergrootglas dan dat van spoor, omdat er minder knelpunten zijn rond het Basisnet weg dan bij het Basisnet spoor. Vervoer van sterk gekoeld waterstof levert een aanvullend risico op, omdat een scenario kan optreden, waarbij bij een externe brand en instantaan vrijkomen van de waterstof een explosie kan optreden. Alleen door de aard van waterstof zal het niet vergelijkbaar zijn met LPG, omdat het effect beperkter is. Dit komt mede doordat het voor vloeibare gekoelde waterstof niet mogelijk is om de benodigde adiabatische warmte uit de eigen vloeistof te onttrekken, dit moet uit de omringende lucht komen en die warmte inhoud is beperkt. Het verschil met waterstof onder druk is de hoeveelheid vervoerde waterstof in een tank. Het is nog niet duidelijk of de business case voor sterk gekoelde waterstof goed genoeg is voor een grote toename hiervan ten opzichte van vervoer onder druk. De rol van waterstof dat over de weg vervoerd wordt is nog niet heel groot op dit moment, maar kan gaan toenemen op korte termijn wanneer de vraag naar waterstof voor bevoorrading van schepen, treinen en auto's toeneemt. Er zijn signalen dat verladers voor hun wegvervoer de komende vijf tot tien jaar gaan starten met het overschakelen naar waterstof als brandstof (mede onder invloed van emissievrije zones in binnensteden). In dat geval gaat er meer vervoerd worden over de weg om waterstoftankstations te bevoorraden. Deels is dit vervanging van brandstof voor auto's, schepen en niet geëlektrificeerde treinen. In dat geval kan vooral sprake zijn van <i>verdringing</i> van benzine, diesel en aardgas als getransporteerde stoffen en is er dus niet alleen maar sprake van extra transport. De mate waarin dit gebeurt is nog niet te voorspellen, maar de verwachting is dat komende jaren meer tankstations geopend worden en dat kleinschalige pilots met waterstof bussen en treinen zullen worden uitgebouwd. Naast deze stromen kunnen er ook transportstromen ontstaan voor andere doelen, waardoor niet alleen sprake is van eventuele substitutie maar van compleet nieuwe transporten. Op lange termijn zijn er dus signalen dat er meer waterstof nodig is voor bevoorrading van (nog te ontwikkelen) waterstoftankstations. Tot en met 2050 betekent dat er twee trends belangrijk worden: in eerste instantie zal meer vervoer van waterstof over de weg plaatsvinden. Op langere termijn zal dit transport kleiner worden wanneer MFT's lokaal waterstof produceren of op buisleidingen aangesloten worden.	Waterstof wordt op dit moment als GF0 categorie meegeteld in de Handleiding Risicoanalyse Transport (HART). Dat betekent dat het rekenkundig gezien <i>geen</i> risicorelevante stof is en <i>niet</i> meegenomen wordt in de risicoberekeningen (dit geldt ook voor diesel overigens). Qua risicoberekeningen kan dit betekenen dat wanneer waterstof LPG vervangt de <i>berekende</i> risico's kleiner worden, ondanks dat de effecten vergelijkbaar zijn. Wanneer benzine verdrongen wordt, betekent dit dat de PR contouren kleiner kunnen worden, omdat brandbare vloeistoffen met name op de PR 10⁻⁶ contour invloed hebben. Overigens geldt dat een explosie scenario andere effecten op de contour met zich kan meebrengen. Reëel gezien zullen de risico's bij grote groei aanzienlijk toe kunnen nemen, immers meer brandbare gassen betekent ook een potentieel groter effect. Desondanks lijkt het er in een Panteia studie niet op dat er overschrijdingen komen van de risicoplafonds uit het Basisnet Weg. NB: De categorisering van waterstof wordt in de komende jaren tegen het licht gehouden.	Ook hier geldt de categorisering als GF0 en dezelfde overwegingen over de verdringing. Meer transport van waterstof ter vervanging van benzine of diesel betekent dat er meer brandbare gassen vervoerd worden met grotere effectafstanden door explosiescenario's. Daarom geldt hier dat als dringende overweging moet meegegeven worden waterstof wel als risicorelevant te modelleren, omdat met name het GR hier door wordt beïnvloed (en daarmee de PR10-7 en PR 10-8). Wanneer meer transport plaats vindt bovenop fossiele brandstoffen kan dit tot nieuwe knelpunten leiden. Desondanks lijkt het er in een Panteia studie niet op (ook bij aanzienlijke groei) dat er overschrijdingen komen van de risicoplafonds uit het Basisnet Weg.	Wanneer het getransporteerde waterstof voornamelijk als vervanging komt voor andere brandstoffen is dat positief voor de CO₂ uitstoot.	Transport over de weg ligt niet onder vuur op dit moment. Indien er de nodige knelpunten bijkomen, of wanneer de monitoring uitwijst dat er toch de nodige knelpunten zijn kan dit toenemen. Tot die tijd lijkt dit stabiel.	[M/P] Maatregelen voor het transport over de weg zijn vastgelegd in het ADR. Om een goed beeld te krijgen van de gevolgen van waterstof moet dit als GF3 gemodelleerd worden, zeker ten aanzien van een explosie scenario. Op die manier kan een reëel beeld volgen over de risico's (met name de effecten die dit op het Basisnet weg kan hebben). Dat is op dit moment nog niet van toepassing. Voor wegvervoer is een relatief makkelijk te treffen maatregel het omrijden via andere wegen.
Water	Vanwege de ingebruikname van het gespecialiseerde zeeschip Suiso Frontier in 2019 dat veelvuldig en specifiek vloeibare waterstof gaat vervoeren van Australië naar Japan, kunnen we stellen dat de start gemaakt is om via gekoeld vloeibaar transport waterstof van plek A naar plek B te brengen. Het schip bevat een opslagtank waar 1.250 kubieke meter vloeibaar waterstof in kan worden opgeslagen. De tank is vacuüm geïsoleerd en dubbelwandig zodat de vloeibare waterstof goed gekoeld blijft gedurende een lange reis. De verwachting is dat dit initiatief veel navolging gaat krijgen in de zeevaart, overeenkomstig de logistieke geschiedenis van LNG. Voor binnenvaart, met kleinere volumes, is het momenteel een onzekere kandidaat, en loopt de discussie nog. In het ADN is een verbod op cryogeen transport van waterstof vastgelegd in ingebouwde scheepstanks. Losse eenheden mogen wel vervoerd worden. Het wijzigen van deze regelgeving voor transport in ingebouwde scheepstanks neemt vele jaren in beslag. Omdat er daarnaast ook strenge veiligheidseisen gelden voor vloeibare waterstof (als lading) en de technische vereisten ook leiden tot	De omgevingsveiligheid voor zeeschepen is niet al te beperkend, zolang ze naar havens gaan dichtbij de kust, zoals de Maasvlakte. Voor Amsterdam Westelijk Havengebied kan het een groter knelpunt opleveren. Om de referentiehoeveelheden uit het Basisnet Water te halen moeten extreem grote hoeveelheden vloeibare waterstof vervoerd gaan worden over het water. Dit zien wij niet gebeuren komende decennia vanwege het huidige geldende verbod van het ADN.	De ruimtelijke impact zal zich in eerste instantie concentreren op zeehavens, en zal om heldere veiligheidsregelgeving vragen. Indien ook de binnenvaart in de toekomst vloeibare waterstof gaat vervoeren, kunnen de betreffende waterwegen ook aan ruimtelijke consequenties onderhevig zijn, maar om de referentiehoeveelheden uit het Basisnet Water te halen moeten extreem grote hoeveelheden vloeibare waterstof vervoerd gaan worden over het water. Dit zien wij niet gebeuren komende decennia.	Uitstoot en restproducten vormen geen belemmering voor de hiernaast beschreven ontwikkelingen.	De maatschappelijke consequenties zijn niet op voorhand ingrijpend. Waterwegen zijn minder van directe invloed op derden dan wegen en spoorwegen.	[P] Maatregelen zijn er met name in de navigatie te voorzien. Veilige doorvaart, het ontwijken van obstakels, hier valt vooral de winst te boeken.

Waterstof gekoeld	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
	ruimtebeslag, is het moeilijk te voorspellen, in hoeverre een doorbraak realistisch is voor de binnenvaart. Ook zijn situaties denkbaar waar vloeibare waterstof de energiebron (de aandrijving) is. Of men dit met gasvormige, vloeibare of vaste waterstof(dragers) gaat exploiteren, is nog niet beslist. Zo is voor het schip Antonie wel de keus gemaakt om op waterstof te gaan varen en wordt het daarom momenteel heringericht, maar is de vorm van waterstof nog niet gekozen. In Scandinavië gaat een cruiseschip (de Havila) op waterstof varen, en komt er een opslagtank van vloeibare waterstof aan boord. De veiligheid van het transport over water van vloeibare waterstof vraagt om stevige investeringen in de techniek en in een hoog niveau van het (vaar)verkeerssysteem. Voor zeevaart is het toekomstbeeld realistisch, voor de binnenvaart onzeker.					
Spoor	Vervoer van sterk gekoeld waterstof levert een aanvullend risico op, omdat bij een externe brand er een mogelijkheid is dat de inhoud instantaan vrijkomt en een explosie veroorzaakt. Alleen door de aard van waterstof zal het niet vergelijkbaar zijn met LPG, het effect is beperkter. Dit komt mede doordat het voor vloeibare gekoelde waterstof niet mogelijk is om de benodigde adiabatische warmte uit de eigen vloeistof te onttrekken, dit moet uit de omringende lucht komen en die warmte inhoud is beperkt. Het verschil met waterstof onder druk is de hoeveelheid vervoerde waterstof in een tank. Op dit moment worden er nog geen stromen vervoerd over het spoor. Zolang de huidige LPG achtige stoffen, zoals propaan en butadiëen, niet vervangen worden door waterstof zien wij op korte termijn hier geen grote stromen op gang komen. Vervoer zal additioneel zijn, maar naar verwachting niet grootschalig. In 2023 is voorzien dat nieuwe vervoersprognoses gemaakt gaan worden voor spoorvervoer van gevaarlijke stoffen. Dit zou een aanvullend perspectief kunnen schetsen op de ontwikkelingen in de jaren 2023-2033, maar ook dan is de invloed hiervan nog zeer beperkt. Wanneer de stroom echter toch toeneemt, ook al is deze toename over het spoor minimaal, dan kan ook een kleine toename al grote effecten hebben op het Basisnet spoor. De ruimte die het Basisnet spoor biedt staat al sinds inwerkingtreding van het Basisnet onder grote druk, omdat voor een aantal routes de risicoplafonds laag zijn en bij relatief lage aantallen transport deze plafonds al overschreden worden. Een extra stroom brandbare gassen bovenop de al bestaande stromen (dit kan vanaf enkele honderden wagons per jaar) leidt dan al tot extra knelpunten.	Het plaatsgebonden risico is een bindende norm die vooral wordt beïnvloed door de hoeveelheid brandbare vloeistoffen die vervoerd worden en minder door brandbare gassen (ook als deze tot vloeistof zijn afgekoeld), Gezien de overwegingen zien wij nog geen positieve of negatieve ontwikkelingen ten aanzien van lokale risico's, omdat de hoeveelheid waterstof over het spoor relatief zeer beperkt is op korte en in dit geval hoogstwaarschijnlijk ook op langere termijn (10-15 jaar). Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra knel- of aandachtspunten leiden.	Vervoer van gevaarlijke stoffen per spoor is een gevoelig onderwerp, omdat het al een aantal jaren onder een politiek vergrootglas ligt. In afgelopen jaren zijn de risicoplafonds voor een aantal plekken overschreden (door goed verklaarbare redenen), waardoor hier al aandachtspunten bestaan. Deze lijken op dit moment niet groter of kleiner te worden bij de beperkte hoeveelheid waterstof die voorzien wordt. Wanneer echter toch een aanzienlijke stroom op gang komt bovenop huidige stromen van brandbare gassen, dan kan op een aantal routes al snel de druk op het Basisnet spoor toenemen. Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra knel- of aandachtspunten leiden.	Indien waterstof als vervanging komt voor andere brandbare gassen is dat elders in de keten positief voor de CO₂ uitstoot. Vervoer over het spoor is milieuvriendelijk en leidt tot minder uitstoot van schadelijke gassen.	Het transport is zichtbaar, wordt vaak negatief geframed en er zijn gevoeligheden. Deze zullen door extra transport van waterstof niet veranderen in positieve of negatieve zin, tenzij de stromen extreem toenemen en op lokaal niveau knelpunten opleveren. Wel kan een potentiële explosie negatief benadrukt worden, hoewel dat nu ook niet gebeurt bijvoorbeeld bij LPG.	Deze zijn op dit moment niet van toepassing. Wanneer toekomstige stromen toenemen en er op belangrijke Basisnet routes grote knelpunten optreden, zijn mitigerende maatregelen waarschijnlijk nodig. In het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor zijn hier verschillende opties voor genoemd, maar die zijn in de praktijk ook allemaal lastig uit te voeren. Wanneer daarom in 2023 in de nieuwe prognoses grote ontwikkelingen voorzien worden, moet hier actief mee aan de slag gegaan worden om maatregelen te nemen.

Bijlage C.3 LOHC Keten 1: duo Tolueen – Methylcyclohexaan (MCH)²

LOHC 1 (Tolueen-MCH)	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Productie	<i>Waterstof</i> De productie van groene waterstof is volledig vergelijkbaar met de gasvormige productie zoals eerder aangegeven. Voor de waterstof gerelateerde aspecten wordt dan ook daarnaar verwezen. <i>Tolueen (LOC)</i> N.B. Tolueen als grondstof is een bulkstof binnen de chemische sector. Het kan worden gewonnen als destillaat van (al dan niet gekraakte) aardolie of steenkool. Deze stap beschrijft de productie van tolueen die nodig is om de LOHC MCH te maken. Wanneer tolueen in het buitenland gemaakt wordt en dan geïmporteerd, levert dat geen grote risico's op. Het is een aannemelijk scenario dat de LOHC geïmporteerd wordt van buiten de landsgrenzen en dat tolueen productie dus niet in Nederland zal plaatsvinden.	De productie van tolueen is een standaard proces binnen de petrochemie. Omdat dat meestal om een veel groter geheel gaat (raffinaderij), zijn er weliswaar consequenties in de ruimere omgeving, maar niet specifiek op conto van tolueen. Tolueen op zichzelf is een zeer brandbare vloeistof met vooral effecten op korte afstand.	De productie van tolueen is een standaard proces binnen de petrochemie. Omdat dat meestal om een veel groter geheel gaat (raffinaderij), zijn er weliswaar consequenties in de ruimere omgeving, maar meestal niet vanwege tolueen. Explosies kunnen zich voordoen, maar effecten worden vooral op korte afstand voorzien.	Bij de productie van tolueen zijn geen bijzondere reststoffen te verwachten.	Voor de productie zijn weinig maatschappelijke consequenties te verwachten, het is een chemisch proces met beperkte risico's.	[P/M] Voor de opslag van tolueen zijn de gebruikelijke voorschriften voor vloeibare brandstoffen van toepassing (met name PGS-29 en -31).
Conversie (Binden en ontbinden LOHC)	<i>LOC + H₂ -> LOHC</i> <i>In dit geval: tolueen + 3 H₂ -> MCH</i> De waterstof wordt via een katalytische reactie onder druk (40 bar en 200°C) aan de LOC (tolueen) gebonden. Het is geen regulier productieproces, maar vanwege de mondiale energietransitie is er nu gericht onderzoek gaande naar deze synthesesmethode, o.a. bij Sojitz Corporation samen met Hrein in China. Elders gebeurt de omgekeerde conversie: LOHC -> LOC + 3 H₂ <i>In dit geval: MCH -> tolueen + 3 H₂</i> Het onttrekken van de waterstof aan de drager voor gebruik vindt plaats in een reactor (rond de 300°C). De drager wordt dan retour gestuurd naar de productielocatie om weer te laten reageren met waterstof. De installaties om de waterstof uit de LOHC te halen zullen ingepast moeten worden in de beschikbare ruimte.	De conversie betekent dat er rekening moet worden gehouden met tenminste drie stoffen: waterstof, tolueen en methylcyclohexaan (UN 2296). Tolueen en MCH zijn op de aspecten brandbaarheid en toxiciteit vergelijkbaar. Gegeven een bepaalde schaalgrootte zullen de veiligheid van waterstof en van tolueen/MCH bepalend zijn voor de lokale, ruimtelijke consequenties. Tolueen en MCH zijn zeer brandbare vloeistoffen met vooral effecten op korte afstand. Het risico dat er bij dit proces bijkomt is gekoppeld aan zowel LOHC als LOC. Tankwagens met deze stof zullen op locatie aanwezig zijn voor de overslag en vormen mogelijk een bijkomend aandachtspunt.	Zolang deze ontwikkeling niet grootschalig zal worden is de veiligheid in de ruimere omgeving niet problematisch. De aanwezige hoeveelheid waterstof bepaalt vooral het aandachtsgebied en het groepsrisico. Het hangt van het proces af (enkel binden of ontbinden, of slaat men de stof ook op locatie op) tot hoever de effecten kunnen reiken (zie ook opslag van waterstof). Bij de omzetting zijn niet direct ruimtelijke consequenties te verwachten anders dan een nieuw activiteit met een bijbehorende vergunning.	Bij ontbinding van waterstof van de LOHC blijft de LOC, in dit geval tolueen, over.	Voor deze conversiestap zijn er weinig maatschappelijke consequenties te verwachten, het is een chemisch proces met beperkte risico's. Wat mogelijk een negatief aspect is aan deze manier van vervoeren van waterstof is het genereren van een transport routing met gevaarlijke stoffen voor de retourtransporten. De dragerstof moet weer van gebruikerslocatie terug worden getransporteerd naar de productie locatie om daar weer te worden "opgeladen" met waterstof. Dit aspect wordt bij het transport verder toegelicht.	[P/M] Voor de opslag van tolueen zijn de gebruikelijke voorschriften voor vloeibare brandstoffen van toepassing (met name PGS-29 en -31).
Opslag	De opslag van LOC's en LOHC's in kleine vaten, grotere tanks en zelfs terminals is in het algemeen goed uitvoerbaar, omdat vloeistoffen zich daar goed voor lenen. Tolueen is al een bulkstof in de industrie, MCH is (zijnde een heptaan (C7)) ook welbekend, dus daar zijn geen grote uitdagingen te verwachten.	Indien opslag op industrieterreinen wordt beoogd, is de PR-10⁻⁶-contour geen knelpunt. Hier kan bij gangbaar EV beleid worden aangesloten. Het scenario voor MCH en tolueen is brand. Mocht men grote opslageenheden in de openbare ruimte nastreven, dan is veiligheid op locatie een relevant aandachtspunt waar steeds een lokale afweging gemaakt moet worden.	Met de opslag van organische vloeistoffen is heel veel ervaring (van methanol tot benzine enz.). Bij welbewuste ontwerpkeuzes en inpassingen zijn de ruimtelijke consequenties goed beheersbaar. Het groepsrisico ten gevolge van de LOC en LOHC is geen knelpunt. Mocht men grote opslageenheden in de openbare ruimte nastreven, dan is dit wel een relevant aandachtspunt waar steeds een lokale afweging gemaakt moet worden.	Het vrijkomen van LOC of LOHC in de open lucht is ongezond en ongewenst. Het vrijkomen door lekkage naar de bodem geeft milieuvervuiling en zware ecologische schade, maar geen acuut risico voor de mens.	Maatschappelijke consequenties zijn er vooral wanneer de stoffen vrijkomen door lekkages. Denk aan stank en geurhinder, of als er een serieus ongeval zou plaatsvinden zware brand- en rook-risico's en lokale verontreinigingen.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare brandstoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29 en -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen.
Verlading	In elk van de ketens zal er aan het transport een verladingsmoment verbonden zijn. Of het nu over de weg, per spoor of per schip wordt getransporteerd, het verladen vormt een zeker risico. In de HRB zijn hiervoor specifieke rekenregels opgenomen hoe deze onderdelen dienen te worden meegenomen in de risicomodellen. Bij de verlading spelen vooral de onderdelen als de laad- losslang en armen een bepalende rol. Daarnaast zijn	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn medebepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij relatief kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving groot (kan	De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid zullen op basis van brand en explosie moeten worden bepaald en zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk. De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Bij grootschalige opslag of productie en een verlading per tankauto (25m³) zal het	N.v.t.	Maatschappelijke consequenties zijn er vooral wanneer de stoffen vrijkomen door lekkages. Denk aan stank en geurhinder, of als er een serieus ongeval zou plaatsvinden zware brand- en rook-risico's en lokale verontreinigingen.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29 en -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen.

² Soms wordt ook de combinatie benzeen/cyclohexaan nog als LO(H)C vermeld. Deze is echter niet aannemelijk en niet aan te raden vanwege de eigenschappen van benzeen (erg toxisch, kankerverwekkend en aangewezen als ZZS).

LOHC 1 (Tolueen-MCH)	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
	ook de aansluit diameters, de hoeveelheden en de heersende drukken relevant. In algemene zin kan worden gesteld dat indien er sprake is van een toename in een bepaalde modaliteit, ook de verlading in een zelfde mate zal toenemen. Bij een intensivering van de keten zullen ook de verladersrisico's navenant toenemen.	oplopen tot 50-60% van de risico-contour) omdat het gekoppeld is aan de leiding diameter van de verladingseenheid (auto, wagon of schip) en de hier heersende druk. Omdat dit een vast gegeven is, is die absolute bijdrage overal gelijk maar varieert de relatieve bijdrage sterk.	omgevingsrisicobeeld primair door de opslag worden bepaald. Indien de verlading per treinwagon (circa 50 m³) of per schip (circa 350 m³) plaatsvindt, schuift het zwaartepunt meer naar de verladingseenheid. Wij voorzien hier een beperkte invloed vanwege de aard van de stoffen.			
Buisleiding	Vervoer van organische (al dan niet brandbare) vloeistoffen door buisleidingen is een goed uitvoerbaar proces. In Nederland zijn er al diverse leidingen voor vloeibare brandstoffen. Deze vervoersmethode is alleen rendabel bij zeer grote hoeveelheden, althans wanneer men over bovenlokale leidingtrajecten spreekt. Voor de combinatie MCH-tolueen, waarbij MCH de LOHC is, zijn er geen technische belemmeringen te voorzien. Voor een LOHC-systeem zijn twee leidingen nodig, indien alles binnen deze modaliteit dient te gebeuren, een 'heenleiding' (LOHC) en een retourleiding (LOC), tenzij de tolueen op de plek zelf ook gebruikt wordt.	Voor de LOHC-combinatie tolueen-MCH ('heen (MCH), retour in tweede buis (tolueen') is de PR-10 ⁻⁶ contour conform K1-vloeistoffen. De afstand vanuit het hart van de buisleiding is 5 meter. Wel gaat het om twee leidingen (heen en terug), waardoor de afstand iets groter wordt (5 meter vanaf het hart van de beide leidingen).	Er zijn weinig ruimtelijke knelpunten te voorzien voor een buisleiding met MCH of tolueen. Bij aanleg van nieuwe buisleidingen (of hergebruik van bestaande, niet meer in functie zijnde leidingen) is alleen de ruimte voor de infrastructuur en een kleine zone daaromheen vereist. Inpassing in de omgeving is naar verwachting geen groot knelpunt. Wel vraagt het altijd lokaal maatwerk.	Bij buisleidingen zal alleen bij een lek (en dat is op zich zeldzaam), zonder het vervolgsценario ontsteking, een grote uitstroom tot een sterke milieuverontreiniging leiden. Dus er is een lage kans op negatieve scenario's, maar deze hebben wel een relatief groot effect (niet qua veiligheid, maar vooral qua milieu).	De maatschappelijke consequenties zijn gering, hooguit wat tijdelijke, lokale hinder van de aanlegactiviteiten.	[P/M] Men kan aansluiten bij bestaande preventieve en mitigerende maatregelen waaronder KLIC/Wion en markering van het traject.
Weg	LOHC's hebben, afhankelijk van welke stof gebruikt wordt, brandbare of toxische eigenschappen. Deze LOHC (methylcyclohexaan) kan relatief eenvoudig opgeslagen en getransporteerd worden. Een belangrijk aspect hierbij is de rol van de waterstofarme drager (LOC). Deze drager is na het vrijmaken van de waterstof een bijproduct dat je ofwel wilt gebruiken, ofwel wilt terugbrengen naar de waterstofbron. Hierdoor is de kans groot dat je bij hergebruik ook een terugrit hebt en daarmee tweemaal een transport van een gevaarlijke stof krijgt. Hierdoor kan een groei van LOHC's relatief twee keer zoveel bijdragen aan het vervoer van gevaarlijke stoffen.	Op dit moment geldt voor lokale situaties dat normen (PR 10 ⁻⁶ contour) niet tot nauwelijks overschreden worden en in veel gevallen ver onder de referentiewaarden liggen. Het is niet waarschijnlijk dat LOHC transport op korte en/ of langere termijn hier een grote invloed op zal hebben, omdat transport van brandbare vloeistoffen vaak ver onder de referentiewaarden ligt. Ook zijn er in deze jaren geen grote overschrijdingen van de norm gevonden. Als het transport op gang komt en enorm toeneemt (en vooral vanwege de dubbele tellingen vanwege het heen en terug transport) kan een toename wel hard gaan. Als dat het geval is kunnen er kwetsbare objecten gesaneerd moeten worden, hoewel ook die kans zeer klein is. De stofeigenschappen hebben een beperkt effectgebied, omdat een plasbrand een maximale afstand heeft van ongeveer 30 meter.	Het is niet te verwachten dat overschrijding van de referentiewaarden voor de 10 ⁻⁷ of 10 ⁻⁸ contouren op korte termijn zal gebeuren, laat staan grootschalig. Overige ruimtelijke consequenties verwachten wij niet vanwege de beperkte effect afstanden van deze stoffen.	Het voornaamste aandachtspunt is dat de restproducten opgewaardeerd moeten worden en dubbel getransporteerd moeten worden. Tenzij op grote schaal een chemische toepassing voor de LOC's gevonden kan worden op de locatie zelf.	Het kan tot maatschappelijke vragen leiden waarom transport van gevaarlijke stoffen twee keer moeten plaatsvinden. Dit kan negatieve sentimenten geven over het transport van deze stoffen.	[P/M] Maatregelen voor het transport over de weg zijn vastgelegd in het ADR. Voor wegvervoer is een relatief makkelijk te treffen maatregel het omrijden via andere wegen.
Water	Transport over het water van methylcyclohexaan (MCH) en tolueen is zeer vergelijkbaar met transport van andere (brandbare) vloeistoffen zoals benzine, en behoort tot de standaard bedrijvigheden van de tankvaart. Men kan het eenvoudig inpassen in de bestaande vloten en vaarroutes. Dat geldt in mindere mate voor de LOHC-combinatie van perhydrodibenzyltolueen en dibenzyltolueen. Zowel het voorkomen van isomeren (posities van de benzylgroepen) als het voorkomen van partieel gehydrogeneerde DBT's leidt tot mengsels in plaats van zuivere stoffen. Daarnaast gaat het om visceuze vloeistoffen. Binnenvaartvervoer van laatstgenoemde vormen is minder aannemelijk.	De omgevingsveiligheid van deze categorie stoffen op vaarwegen wordt niet als een probleem beschouwd. Het is een bekende stofgroep die nu al dagelijks op heel veel plekken op vaarwegen aanwezig is. Dit transport past ruim binnen de referentiewaarden van het Basisnet water.	De ruimtelijke impact is gering. Het Basisnet water kent nauwelijks knelpunten en deze stoffen zorgen niet voor een verhoogde belasting op de ruimtelijke ordening.	Het gaat hier om verbindingen die naar de lucht of naar bodem en water ernstige vervuiling kunnen opleveren.	Voor de maatschappelijke consequenties zijn er geen problemen in zicht.	[P/M] maatregelen ten aanzien van deze stoffen zijn al in ruime mate vastgelegd in het ADN (in Nederland: VBG), en verder is de Binnenvaart-regelgeving ten dienste van de veiligheid.
Spoor	LOHC's hebben, afhankelijk van welke stof gebruikt wordt, brandbare of toxische eigenschappen. Deze LOHC (methylcyclohexaan) kan relatief eenvoudig opgeslagen en getransporteerd worden. Een belangrijk aspect hierbij is de rol van de waterstofarme drager (LOC). Deze drager is na het vrijmaken van de waterstof een bijproduct dat je ofwel wilt gebruiken, ofwel wilt terugbrengen naar de waterstofbron. Hierdoor is de kans groot dat je bij hergebruik ook een terugrit hebt en daarmee tweemaal een transport van een gevaarlijke stof krijgt. Hierdoor kan een groei van LOHC's relatief twee keer zoveel bijdragen aan het vervoer van gevaarlijke stoffen.	Afhankelijk van het aantal transporten en de locaties geldt hierbij dat een extra harde groei (vooral vanwege de dubbele tellingen vanwege het heen en terug transport) van het gebruik van brandbare of toxische vloeistoffen een negatieve invloed kan hebben op lokale risico's (plaatsgebonden risico). Op dit moment worden al op een aantal locaties de risicoplafonds uit het Basisnet spoor overschreden. Wanneer LOHC's in aanzienlijke hoeveelheden getransporteerd worden zal dit kunnen bijdragen aan extra overschrijdingen op een aantal routes.	Het effect van brandbare vloeistoffen is relatief beperkt qua omvang. Daarom gaan wij er niet van uit dat dit in de ruimere omgeving grote effecten heeft. Vervoer van gevaarlijke stoffen per spoor blijft dan nog wel een gevoelig onderwerp, omdat het al een aantal jaren onder een politiek vergrootglas ligt. In afgelopen jaren zijn de risicoplafonds voor een aantal plekken overschreden, waardoor hier al aandachtspunten bestaan. De uiteindelijke invloed op de ruimere omgeving zal nader beschouwd moeten worden wanneer deze vorm van transport groot wordt.	Het voornaamste aandachtspunt is dat de restproducten opgewaardeerd moeten worden en dubbel getransporteerd moeten worden. Tenzij op grote schaal een chemische toepassing voor de LOC's gevonden kan worden op de locatie zelf.	Het transport is zichtbaar en wordt vaak negatief geframed. Het kan tot maatschappelijke vragen leiden waarom transport van gevaarlijke stoffen twee keer moeten plaatsvinden. Dit kan negatieve sentimenten geven over het transport van deze stoffen.	In het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor zijn hier verschillende opties voor genoemd, maar die zijn in de praktijk lastig uit te voeren. Er liggen geen extra maatregelen voor de hand op dit moment.

Bijlage C.4 LOHC keten 2: duo Dibenzyltolueen (DBT)-‘polygehydrogeneerde³ dibenzyltolueen PDBT

LOHC 2 (DBT- PDBT)	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Productie	<i>Waterstof</i> De productie van groene waterstof is volledig vergelijkbaar met de gasvormige productie zoals eerder aangegeven. Voor de waterstof gerelateerde aspecten wordt dan ook daarnaar verwezen. <i>Dibenzyltolueen (LOC)</i> Dibenzyltolueen (DBT) als grondstof is een op bescheiden schaal geproduceerde en gebruikte verbinding. Het wordt gebruikt als warmteoverdrachts-olie, vanwege de hoge thermische stabiliteit. Het is niet één unieke stof, maar een mengsel van isomeren. De benzylgroepen kunnen op verscheidene posities ten opzichte van de methylgroep van toluen voorkomen. N.B. Om DBT te maken is chloor nodig. Chloor is hierbij een grondstof met zeer hoge toxiciteit. Wanneer DBT in het buitenland gemaakt wordt en dan geïmporteerd levert dat geen grote risico's op, maar wanneer DBT in Nederland gemaakt wordt, is op een bepaald moment chloor nodig dat getransporteerd moet worden. De industriële vervaardiging van DBT vindt in stappen plaats en wordt bemoeilijkt door de kans op bijproducten. Eerst wordt toluen (C₇H₈) met chloor omgezet in benzylchloride (C₇H₇Cl), maar daarbij is er kans op dichloor- en trichloor-bijproducten. In de vervolgstap wordt benzylchloride met toluen omgezet in de isomeren van DBT, met opnieuw kans op bijproducten (mono- en tribenzyltolueen). Het is daarmee geen recht-toe-recht-aan proces.	De aandacht gaat niet zozeer uit naar de LOHC zelf. Een stof die in deze keten de veiligheid bepaalt is de benodigde grondstof chloor. Bij grootschalige productie van dibenzyltolueen is tegelijk op grote schaal chloor nodig om het tussenproduct benzylchloride te maken. Een opslageenheid voor chloor heeft directe invloed op de veiligheid en op de mogelijkheden in de ruimtelijke ordening.	De aandacht gaat niet zozeer uit naar de LOHC zelf. Een stof die in deze keten de veiligheid bepaalt is de benodigde grondstof chloor. Bij grootschalige productie van dibenzyltolueen is tegelijk op grote schaal chloor nodig om het tussenproduct benzylchloride te maken. Een opslageenheid voor chloor heeft directe invloed op de veiligheid en op de mogelijkheden in de ruimtelijke ordening, met grote effectafstanden.	Er kunnen bijproducten in deze processen ontstaan, zoals benzylchloride en benzyltolueen.	Niet de LOHC, maar de grondstof chloor kan tot maatschappelijke ophef leiden.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29 en -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen. [P] Het is het overwegen waard om andere syntheseroutes naar DBT te ontwikkelen, waarbij chloor niet langer de grondstof hoeft te zijn.
Conversie (Binden en ontbinden LOHC)	<i>LOC + H₂-> LOHC</i> <i>In dit geval: dibenzyltolueen + 9 H₂ -> H18-dibenzyltolueen (of: perhydrodibenzyltolueen). PDBT. Men kan dit ook schrijven als: DBT + 9 H₂ -> H18-DBT.</i> Dit was in de bestaande praktijk geen regulier productieproces, maar vanwege de mondiale energietransitie is een initiatiefnemer hiermee gestart en is inmiddels een fabriek en een bijbehorende logistieke keten opgebouwd, zodat het commercieel is doorontwikkeld. Dit bedrijf, <i>Hydrogenious</i>, levert deze LOC/LOHC en is actief om de markt te vergroten. De omgekeerde conversie verloopt als volgt: LOHC -> LOC + 9 H₂ <i>In dit geval: H18-DBT -> DBT + 9 H₂</i> Het onttrekken van de waterstof aan de drager voor gebruik van de waterstof vindt plaats in een reactor. Bij de genoemde producent Hydrogenious is het complete pakket ingericht.  Voor toekomstige toepassingen kan de keten uiteraard anders worden opgezet. Bij een (mondiale) opschaling is het noodzakelijk om de hele keten (van LOC naar LOHC en weer terug naar de LOC) te overzien en bewust een complete visie te hebben over een bepaalde rol daarin (als land en/of als bedrijf), omdat alleen dan een realistisch systeem denkbaar is. Zonder een logistiek sluitend systeem is de DBT/PDBT dragercombinatie niet mogelijk. Zie in het hoofdrapport een bredere beschrijving van het “retour”-principe.	De stoffen DBT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. Ze zijn brandbaar en toxisch (met effecten op de arbeidsveiligheid), maar niet in de zin dat ze een groot effectgebied. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, hetgeen voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (want ze hebben een langzamere verspreiding en mogelijk minder ver).	De stoffen DBT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. Ze zijn brandbaar en toxisch, maar hebben geen groot effectgebied. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, hetgeen voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (want ze hebben een langzamere verspreiding en mogelijk minder ver). De aanwezige hoeveelheid waterstof bepaalt vooral het aandachtsgebied en het groepsrisico.	Bij ontbinding van waterstof van de LOHC blijft de LOC, in dit geval DBT, over.	De (namen van de) stoffen lijken onbekend in de media. Er is op voorhand geen maatschappelijke onrust te verwachten.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29 en -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen.

³ PDBT: in de wetenschappelijke literatuur enerzijds, en in bestaande plannen en/of praktijk anderzijds is *de mate van hydrogeneren* niet altijd volledig. Met PDBT bedoelen we primair de volledig omgezette vorm (DBT + 9 H₂ -> H18-DBT en vice versa). Intermediaire varianten (partieel gehydrogeneerde DBT, zoals H12-DBT) kunnen bij gelegenheid deel uitmaken van informatie die over het duo DBT/PDBT wordt gegeven.

LOHC 2 (DBT- PDBT)	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Opslag	DBT en PDBT kunnen goed opgeslagen worden, maar hebben het nadeel van hogere viscositeit en eventueel stolling bij winterse omstandigheden.	Indien opslag op industrieterreinen wordt beoogd, is de PR-10 ⁻⁶ -contour geen knelpunt. Het dominante scenario voor DBT en PDBT is brand. Mocht men grote opslageenheden in de openbare ruimte nastreven, dan is veiligheid op locatie een relevant aandachtspunt.	Met de opslag van organische vloeistoffen is heel veel ervaring (van methanol tot benzine enz.). Bij welbewuste ontwerpkeuzes en inpassingen zijn de ruimtelijke consequenties goed beheersbaar. Het groepsrisico ten gevolge van de LOC en LOHC is geen knelpunt. Mocht men grote opslageenheden in de openbare ruimte nastreven, dan is dit wel een relevant aandachtspunt waar steeds een lokale afweging gemaakt moet worden.	Bij lekkage van DBT of PDBT kan bodemverontreiniging optreden. De stoffen verdampen langzaam en zullen daarom langer in de grond achterblijven.	Maatschappelijke consequenties zijn er vooral wanneer de stoffen vrijkomen door lekkages. Denk aan stank en geurhinder, of als er een serieus ongeval zou plaatsvinden zware brand- en rook-risico's en lokale verontreinigingen.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29 en -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen.
Verlading	In elk van de ketens zal er aan het transport een verladingsmoment verbonden zijn. Of het nu over de weg, per spoor of per schip wordt getransporteerd, het verladen vormt een zeker risico. In de HRB zijn hiervoor specifieke rekenregels opgenomen hoe deze onderdelen dienen te worden meegenomen in de risicomodellen. Bij de verlading spelen vooral de onderdelen als de laad- losslang en armen een bepalende rol. Daarnaast zijn ook de aansluit diameters, de hoeveelheden en de heersende drukken relevant. In algemene zin kan worden gesteld dat indien er sprake is van een toename in een bepaalde modaliteit, ook de verlading in eenzelfde mate zal toenemen. Bij een intensivering van de keten zullen ook de verladingsrisico's navenant toenemen.	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn medebepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij relatief kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving groot (kan oplopen tot 50-60% van de risico-contour) omdat het gekoppeld is aan de leiding diameter van de verladingseenheid (auto, wagon of schip) en de hier heersende druk. Omdat dit een vast gegeven is, is die absolute bijdrage overal gelijk maar varieert de relatieve bijdrage sterk.	De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid zullen op basis van brand en explosie moeten worden bepaald en zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk. De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Bij grootschalige opslag of productie en een verlading per tankauto (25m³) zal het omgevingsrisicobeeld primair door de opslag worden bepaald. Indien de verlading per treinwagon (circa 50 m³) of per schip (circa 350 m³) plaatsvindt, schuift het zwaartepunt meer naar de verladingseenheid. Wij voorzien hier een beperkte invloed vanwege de aard van de stoffen.	N.v.t.	N.v.t.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29 en -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen.
Buisleiding	Voor de combinatie PDBT-DBT, waarbij PDBT de LOHC is, is een buisleiding niet realistisch. PDBT is nogal visceus en kan bij lage temperaturen gaan klonteren.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Weg	Deze LOHC kan relatief eenvoudig opgeslagen en getransporteerd worden. De stof en de tussenproducten hebben weliswaar kenmerken die risico's in zich hebben (brandbaar, toxisch), maar zijn minder groot dan bij andere stoffen. Een belangrijk aspect hierbij is de rol van de waterstofarme drager (LOC). Deze drager is na het vrijmaken van de waterstof een bijproduct dat je ofwel wilt gebruiken, ofwel wilt terugbrengen naar de waterstofbron. Hierdoor is de kans groot dat je bij hergebruik ook een terugrit hebt en daarmee tweemaal een transport van een gevaarlijke stof krijgt. Hierdoor kan een groei van LOHC's relatief twee keer zoveel bijdragen aan het vervoer van gevaarlijke stoffen. Een aandachtspunt hierbij is chloor. Chloor is zeer toxisch en is nodig bij het maken van de DBT. Wanneer DBT in het buitenland gemaakt wordt en dan geïmporteerd levert dat geen problemen op, maar wanneer DBT in Nederland gemaakt wordt, is op een bepaald moment chloor nodig. Wanneer deze niet op locatie gemaakt wordt, lijkt de meest logische manier om hier aan te komen transport over de weg te zijn.	De stoffen DBT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. Ze zijn brandbaar en toxisch (denk aan arbeidsveiligheid), maar hebben geen groot effectgebied. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, wat voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (want ze hebben een langzamere verspreiding en mogelijk minder ver). Als het transport op gang komt en enorm toeneemt (en vooral vanwege de dubbele tellingen vanwege het heen en terug transport) kan een toename wel hard gaan. De kans dat kwetsbare objecten gesaneerd moeten worden, is zeer klein is. De stofeigenschappen hebben een beperkt effectgebied, omdat een plasbrand een maximale afstand heeft van ongeveer 30 meter. Wanneer de productie in Nederland plaatsvindt is chloor nodig. Chloor is zeer toxisch en kan tot op grote afstand van het transport grote effecten hebben indien dit toch in Nederland geproduceerd wordt.	De stoffen DBT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. Ze zijn brandbaar en toxisch (denk aan arbeidsveiligheid), maar niet in de zin dat ze bijvoorbeeld het effectgebied van waterstof overstijgen. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, wat voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (want ze hebben een langzamere verspreiding en mogelijk minder ver). Wanneer de productie in Nederland plaatsvindt is chloor nodig. Chloor is zeer toxisch en kan tot op grote afstand van het transport grote effecten hebben indien dit toch in Nederland geproduceerd wordt.	Bij lekkage van DBT of PDBT zal bodemverontreiniging kunnen optreden. De stoffen verdampen langzaam en zullen daarom langer in de grond achterblijven. Het voornaamste aandachtspunt is dat de restproducten opgewaardeerd moeten worden en dubbel getransporteerd moeten worden. Tenzij op grote schaal een chemische toepassing voor de LOC's gevonden kan worden op de locatie zelf.	Chloor transport over de weg is minder controversieel dan spoor en minder bekend bij het grote publiek. Hierdoor zal dit waarschijnlijk minder aandacht trekken. Het kan tot maatschappelijke vragen leiden waarom transport van gevaarlijke stoffen twee keer moeten plaatsvinden. Dit kan negatieve sentimenten geven over het transport van deze stoffen.	[P] Import van DBT of productie van chloor op locatie van het gebruik van DBT.
Water	Het transport over het water kan in principe in bulk, maar door die omvang verwachten wij dat niet op dit moment. Eerder zal transport over het water in containers plaatsvinden. Wanneer dit toch een grote vlucht neemt, dan kan het transport aansluiten bij de reguliere manier van transport over het water. Grote bulk transporten van chloor zijn niet te verwachten.	Gezien de relatief kleine hoeveelheden en effectafstanden van de stof zien wij hier geen grote risico's in. Wanneer deze vorm opkomt zal dat niet tot problemen leiden ten aanzien van de referentiewaarden van het Basisnet water. Wel neemt de kans op een ongeval bij meer transporten toe, maar de mogelijke effecten zijn klein van deze stoffen.	Gezien de relatief kleine effectafstanden van de stof zien wij hier geen grote risico's in. Wanneer deze vorm opkomt zal dat niet tot problemen leiden ten aanzien van de referentiewaarden van het Basisnet water.	Bij lekkage zal de stof verdunnen in het water en een lokale ernstige milieuverontreiniging veroorzaken.	N.v.t	[P/M] maatregelen ten aanzien van deze stoffen zijn al in ruime mate vastgelegd in het ADN (in Nederland: VBG), en verder is de Binnenvaart-regelgeving ten dienste van de veiligheid. [P] Import van DBT of productie van chloor op locatie van het gebruik van DBT.

LOHC 2 (DBT- PDBT)	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Spoor	Deze LOHC kan relatief eenvoudig opgeslagen en getransporteerd worden. De stof en de tussenproducten hebben weliswaar kenmerken die risico's in zich hebben (brandbaar, toxisch), maar zijn minder groot dan bij andere stoffen. Uitzondering hierop is chloor. Chloor is zeer toxisch en is nodig bij het maken van de DBT. Wanneer DBT in het buitenland gemaakt wordt en dan geïmporteerd levert dat geen problemen op, maar wanneer DBT in Nederland gemaakt wordt, is op een bepaald moment chloor nodig. Wanneer deze niet op locatie gemaakt wordt, lijkt de meest logische manier om hier aan te komen transport over de weg te zijn. De 'chloortrein' rijdt nu alleen incidenteel en chloor transport kan op een paar trajecten plaatsvinden (bv over de Betuweroute en in Oost-Groningen). De kans dat dit gebeurt is op dit moment niet groot. Chloor transport is al lastig in te plannen, maar ook zijn er op korte termijn nog geen grootschalige ontwikkelingen te verwachten die een dermate grote bulk chloor nodig hebben dat dit een bloktrein met chloor vraagt. Een belangrijk aspect hierbij is de rol van de waterstofarme drager (LOC). Deze drager is na het vrijmaken van de waterstof een bijproduct dat je ofwel wilt gebruiken, ofwel wilt terugbrengen naar de waterstofbron. Hierdoor is de kans groot dat je bij hergebruik ook een terugrit hebt en daarmee tweemaal een transport van een gevaarlijke stof krijgt. Hierdoor kan een groei van LOHC's relatief twee keer zoveel bijdragen aan het vervoer van gevaarlijke stoffen.	De stoffen DBT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. Ze zijn brandbaar en toxisch (denk aan arbeidsveiligheid), maar hebben geen groot effectgebied. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, wat voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (want ze hebben een langzamere verspreiding en mogelijk minder ver). Afhankelijk van het aantal transporten en de locaties geldt hierbij dat een extra harde groei (vooral vanwege de dubbele tellingen vanwege het heen en terug transport) van het gebruik van brandbare of toxische vloeistoffen een negatieve invloed kan hebben op lokale risico's (plaatsgebonden risico). Op dit moment worden al op een aantal locaties de risicoplafonds uit het Basisnet spoor overschreden. Wanneer LOHC's in aanzienlijke hoeveelheden getransporteerd worden zal dit kunnen bijdragen aan extra overschrijdingen op een aantal routes. Wanneer de productie in Nederland plaatsvindt is chloor nodig. Chloor is zeer toxisch en kan tot op grote afstand van het transport grote effecten hebben indien dit toch in Nederland geproduceerd wordt. Bovendien past deze stof niet tot nauwelijks binnen de referentiewaarden van het Basisnet spoor en is chloortransport over het spoor controversieel.	De stoffen DBT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. Ze zijn brandbaar en toxisch (denk aan arbeidsveiligheid), maar niet in de zin dat ze bijvoorbeeld het effectgebied van waterstof overstijgen. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, wat voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (want ze hebben een langzamere verspreiding en mogelijk minder ver). Wanneer de productie in Nederland plaatsvindt is chloor nodig. Chloor is zeer toxisch en kan tot op grote afstand van het transport grote effecten hebben indien dit toch in Nederland geproduceerd wordt. Bovendien past deze stof niet tot nauwelijks binnen de referentiewaarden van het Basisnet spoor en is chloortransport over het spoor controversieel.	Bij lekkage van DBT of PDBT zal bodemverontreiniging kunnen optreden. De stoffen verdampen langzaam en zullen daarom langer in de grond achterblijven. Het voornaamste probleem is dat de restproducten opgewaardeerd moeten worden en dubbel getransporteerd moeten worden. Tenzij op grote schaal een chemische toepassing voor de LOC's gevonden kan worden op de locatie zelf.	De mogelijke maatschappelijke consequentie van chloor transporten over het spoor kunnen groot zijn in de beleving van omwonenden. Hier kan veel onrust door ontstaan. Het kan ook tot maatschappelijke vragen leiden waarom transport van gevaarlijke stoffen twee keer moeten plaatsvinden.	[P] Import van DBT of productie van chloor op locatie van het gebruik van DBT. [P/M] Voor het transport over het spoor kan aangesloten worden bij het speciale spoorregime voor chloortransport.

Bijlage C.5 Keten Ammoniak (onder druk vloeibaar gemaakt)

Ammoniak onder druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Productie	Gebbruikelijke productie van ammoniak via het traditionele Haber-Boschproces, heeft een hoge CO₂ uitstoot en is daarom niet interessant in de transitie keten met als doel CO₂ reductie. De productie van groene ammoniak is echter volledig CO₂ vrij en is daarmee een goed alternatief. Voor de productie van groene ammoniak is dit volledig vergelijkbaar met de gasvormige productie van waterstof. Voor de waterstof gerelateerde aspecten wordt dan ook daarnaar verwezen. Voor de productie van ammoniak is een preheater en een reactor (drukvat) nodig waarin waterstof en stikstof worden samengebracht waardoor ammoniak ontstaat. Als laatste stap wordt in dit proces het Ammoniak-gas gecomprimeerd in een compressorunit tot een druk van circa 7,5 bar bij 15 graden celcius. Onder die omstandigheden is ammoniak vloeibaar. Deze opslagmethode wordt doorgaans toegepast voor reservoirs tot circa 2500 ton. Voor dezelfde hoeveelheid equivalent aan energie is significant minder opslagcapaciteit nodig dan voor gasvormige of vloeibare waterstof. Dit is echter nog altijd ongeveer het dubbele van wat nodig is voor conventionele brandstoffen. De toxische aspecten van ammoniak zijn van dien aard dat opslaglocaties altijd een grote ruimtelijke impact kennen vanwege het mogelijke effectgebied.	De productie van ammoniak geeft lokaal nieuwe PR contouren ten gevolge van ontvangst van waterstof, het reactievat en de opslag en aanwezigheid van ammoniak. Ammoniak onder druk geeft bij een calamiteit een emissie van een gas wolk, doordat de vrijgekomen inhoud instantaan verdampt (flashen). Aansluitend wordt deze wolk enige tijd onderhouden vanuit het koudkoken van de ammoniak plas op de warme ondergrond. Deze zwaar gas wolk blijft daar om het ongevalspunt hangen en geeft lokaal een gebied met een lethale concentratie gas. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risico voor de directe omgeving gelden. De effecten van waterstof op korte afstand van de opslag zijn eerder bij zowel gasvormige als vloeibare waterstof beschreven. Omdat de activiteiten over het algemeen in industriële omgevingen zullen plaatsvinden is de verwachting dat de risico-contouren over het algemeen goed inpasbaar zijn binnen het lokale beleid voor externe veiligheid. Voor nieuwe locaties zullen de risico-contouren (tot circa 200 m voor de 10⁻⁶ contour) mogelijk wel knelpunten geven. In de HRB is voor ammoniak tot 10 ton een afstandentabel aanwezig. Voor installaties tussen 10 en 50 ton is in hoofdstuk 9 van de module C een rekenmethode vastgelegd en voor installaties boven de 50 ton is het BRZO van toepassing op de bepaling van de ruimtelijke impact.	Ammoniak is een lastig in te passen stof vanwege het toxische karakter en de grote effectafstanden (tot enkele km). In het gebied buiten de directe omgeving neemt de letaliteit van de ammoniak wolk snel af, maar blijft schadelijk en zeker waarneembaar (reukgrens bij 5 ppm, prikkelende ogen bij 100 ppm, ademhalingsproblemen bij 1700 ppm, de 10 minuten levensbedreigende waarde (LBW) ligt op 2680 ppm, direct lethaal bij 4000-5000 ppm). De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid hebben voor toxische stoffen twee aspecten: 1. Voor nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rond een activiteit met gevaarlijke stoffen is de afstand afgekapd op 1,5 km. 2. De daadwerkelijke afstand is van belang voor het verlenen van vergunning aan een dergelijke activiteit, deze afstand kan enkele km bedragen en is sterk afhankelijk van de hoeveelheid in het systeem. De aangegeven aandachtsgebieden alsmede het negatieve imago van ammoniak als risico stof maken een brede invoering van ammoniak productie gevoelig. Voor de veiligheid in de ruimere omgeving zal ammoniak een grotere invloed hebben op de omgeving dan waterstof.	Indien de productie van groene ammoniak wordt bevorderd heeft dat een positieve ontwikkeling ten opzichte van de CO₂ emissie. Ook zal een duidelijke afname van de CO₂ uitstoot worden gerealiseerd, als groene ammoniak ter vervanging van fossiele brandstoffen wordt aangewend. Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	De lokale gevoeligheden rond de huidige productie en opslaglocaties zijn bekend. Toename van de productiecapaciteit zal ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie waarschijnlijk toch een negatieve bijklank krijgen.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak productie projecten aan de hand van onder andere de PGS 12. [P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden mitigerende maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.

Ammoniak onder druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Conversie (omzetting ammoniak naar waterstof)	Hiervoor is een kraakproces nodig op de locatie waar de ammoniak weer wordt omgezet in stikstof en waterstof. Ook hier zal aan de voorkant sprake zijn van een opslag van ammoniak. Voor deze opslag gelden vergelijkbare risico aspecten als bij de opslag en de productie. Daarnaast zal de geproduceerde waterstof weer worden opgeslagen of via een van de andere modaliteiten verder worden getransporteerd. Voor die locaties waar deze ontwikkelingen worden toegepast is sprake van een nieuwe situatie die ter plekke dan ook invloed heeft op de beschikbare ruimte.	Voor het kraken van ammoniak zijn de risico's voor de omgeving vergelijkbaar met die van de productie van ammoniak. Het grootste risico is gekoppeld aan de opslag van ammoniak en de geproduceerde waterstof. Beide producten hebben bij calamiteiten invloed op de directe omgeving. De opslag van ammoniak onder druk geeft bij een calamiteit een emissie van een zwaar gas wolk, doordat de vrijgekomen inhoud instantaan verdampft (flashen). Aansluitend wordt deze wolk enige tijd onderhouden vanuit het koudkoken van de ammoniak plas op de warme ondergrond. Deze zwaar gas wolk blijft daar om het ongevalspunt hangen en geeft lokaal een gebied met een lethale concentratie. Afhankelijk van de situering op het terrein zal waterstof of ammoniak als primair risico voor de directe omgeving gelden. De effecten op korte afstand van opslag is eerder bij zowel gasvormige en vloeibare waterstof reeds beschreven. Omdat de activiteiten over het algemeen in industriële omgevingen zullen plaatsvinden is de verwachting dat de risico-contouren over het algemeen goed inpasbaar binnen het lokale beleid voor EV. Voor nieuwe locaties zullen de risico-contouren (tot circa 200 m voor de 10⁻⁶ contour) mogelijk wel knelpunten geven. In de HRB is voor ammoniak tot 10 ton een afstandentabel aanwezig, voor installaties tussen 10 en 50 ton in hoofdstuk 9. In module C een rekenmethode vastgelegd en voor installaties boven de 50 ton is het BRZO van toepassing op de bepaling van de ruimtelijke impact.	Ammoniak is een lastig in te passen stof vanwege het toxische karakter en de grote effectafstanden (tot enkele km). In het gebied buiten de directe omgeving neemt de letaliteit van de ammoniak wolk snel af, maar blijft schadelijk en zeker waarneembaar (reukgrens bij 5 ppm, prikkelende ogen bij 100 ppm, ademhalingsproblemen bij 1700 ppm, de 10 minuten levensbedreigende waarde (LBW) ligt op 2680 ppm, direct lethaal bij 4000-5000 ppm). De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid hebben voor toxische stoffen twee aspecten: - Voor nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rond een activiteit met gevaarlijke stoffen is de afstand afgekapt op 1,5 km. - De daadwerkelijke afstand is van belang voor het verlenen van vergunning aan een dergelijke activiteit, deze afstand kan enkele km bedragen en is sterk afhankelijk van de hoeveelheid in het systeem. De aangegeven aandachtsgebieden alsmede het negatieve imago van ammoniak als risico stof maken een brede invoering van ammoniak productie gevoelig. Voor de veiligheid in de ruimere omgeving zal ammoniak een grotere invloed hebben op de omgeving dan waterstof.	Indien de productie van groene ammoniak wordt bevorderd heeft dat een positieve ontwikkeling ten opzichte van de CO₂ emissie. Ook zal een duidelijke afname van de CO₂ uitstoot worden gerealiseerd, als groene ammoniak ter vervanging van fossiele brandstoffen wordt aangewend. Ammoniak is één van de kernstoffen die de 'stikstofproblematiek' veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	De lokale gevoeligheden rond de huidige productie en opslaglocaties zijn bekend. Toename van de productiecapaciteit zal ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie waarschijnlijk toch een negatieve bijklank krijgen.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak productie projecten aan de hand van onder andere de PGS 12. [P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden mitigerende maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.
Opslag	In de productie en conversie activiteiten zijn altijd opslagvoorzieningen noodzakelijk om de ammoniak tijdelijk op te slaan. Omdat bij een intensivering van deze modaliteit ook de opslagen hoeveelheden zullen toenemen, nemen de hieraan verbonden risico aspecten in gelijke mate toe.	De opslag van ammoniak onder druk geeft bij een calamiteit een emissie van een zwaar gas wolk, doordat de vrijgekomen inhoud instantaan verdampft (flashen). Aansluitend wordt deze wolk enige tijd onderhouden vanuit het koudkoken van de ammoniak plas op de warme ondergrond. Deze zwaar gas wolk blijft daar om het ongevalspunt hangen en geeft lokaal een gebied met een lethale concentratie. Afhankelijk van de situering op het terrein zal waterstof of ammoniak als primair risico voor de directe omgeving gelden. De effecten op korte afstand van opslag is eerder bij zowel gasvormige en vloeibare waterstof reeds beschreven. Omdat de activiteiten over het algemeen in industriële omgevingen zullen plaatsvinden is de verwachting dat de risico-contouren over het algemeen goed inpasbaar zijn binnen het lokale beleid voor externe veiligheid. Voor nieuwe locaties zullen de risico-contouren (tot circa 200 m voor de 10⁻⁶ contour) mogelijk wel knelpunten geven. In de HRB is voor ammoniak tot 10 ton een afstandentabel aanwezig, voor installaties tussen 10 en 50 ton in hoofdstuk 9. In module C een rekenmethode vastgelegd en voor installaties boven de 50 ton is het BRZO van toepassing op de bepaling van de ruimtelijke impact.	Ammoniak is een lastig in te passen stof vanwege het toxische karakter en de grote effectafstanden (tot enkele km). In het gebied buiten de directe omgeving neemt de letaliteit van de ammoniak wolk snel af, maar blijft schadelijk en zeker waarneembaar (reukgrens bij 5 ppm, prikkelende ogen bij 100 ppm, ademhalingsproblemen bij 1700 ppm, de 10 minuten levensbedreigende waarde (LBW) ligt op 2680 ppm, direct lethaal bij 4000-5000 ppm). De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid hebben voor toxische stoffen twee aspecten: - Voor nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rond een activiteit met gevaarlijke stoffen is de afstand afgekapt op 1,5 km. - De daadwerkelijke afstand is van belang voor het verlenen van vergunning aan een dergelijke activiteit, deze afstand kan enkele km bedragen en is sterk afhankelijk van de hoeveelheid in het systeem. De aangegeven aandachtsgebieden alsmede het negatieve imago van ammoniak als risico stof maken een brede invoering van ammoniak productie gevoelig. Voor de veiligheid in de ruimere omgeving zal ammoniak een grotere invloed hebben op de omgeving dan waterstof.	Indien de productie van groene ammoniak wordt bevorderd heeft dat een positieve ontwikkeling ten opzichte van de CO₂ emissie. Ook zal een duidelijke afname van de CO₂ uitstoot worden gerealiseerd, als groene ammoniak ter vervanging van fossiele brandstoffen wordt aangewend. Ammoniak is één van de kernstoffen die de 'stikstofproblematiek' veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	De lokale gevoeligheden rond de huidige productie en opslaglocaties zijn bekend. Toename van de productiecapaciteit zal ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie waarschijnlijk toch een negatieve bijklank krijgen.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak productie projecten aan de hand van onder andere de PGS 12. [P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden mitigerende maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.

Ammoniak onder druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Verlading	In elk van de ketens zal er aan het transport een verladingsmoment verbonden zijn. Of het nu over de weg, per spoor of per schip wordt getransporteerd, het verladen vormt een zeker risico. In de HRB zijn hiervoor specifieke rekenregels opgenomen hoe deze onderdelen dienen te worden meegenomen in de risicomodellen. Bij de verlading spelen vooral de onderdelen als de laad- losslang en armen een bepalende rol. Daarnaast zijn ook de aansluit diameters, de hoeveelheden en de heersende drukken relevant. In algemene zin kan worden gesteld dat indien er sprake is van een toename in een bepaalde modaliteit, ook de verlading in eenzelfde mate zal toenemen. Bij een intensivering van de keten zullen ook de verladingsrisico's navenant toenemen.	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn medebepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij relatief kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving groot (kan oplopen tot 50-60% van de risico-contour) omdat het gekoppeld is aan de leiding diameter van de verladingseenheid (auto, wagon of schip) en de hier heersende druk. Omdat dit een vast gegeven is, is die absolute bijdrage overal gelijk maar varieert de relatieve bijdrage sterk.	De aandachtsgebieden zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk. De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Bij grootschalige opslag of productie en een verlading per tankauto (25m³) zal het omgevingsrisicobeeld primair door de opslag worden bepaald. Indien de verlading per treinwagon (circa 50 m³) of per schip (circa 350 m³) plaatsvindt, schuift het zwaartepunt meer naar de verladingseenheid. Wij voorzien hier een beperkte invloed vanwege de aard van de stoffen.	Ammoniak is één van de kernstoffen die de 'stikstofproblematiek' veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	N.v.t.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak projecten aan de hand van onder andere de PGS-12. [P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak gebruik projecten. Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden mitigerende maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.
Buisleiding	Het transport van ammoniak via buisleidingen vindt in Nederland slechts op kleine schaal plaats. Op basis van gegevens van het EFMA zijn het slechts enkele leidingen van enkele km lang. Dit zijn vooral bedrijfsinterne leidingen en geen transporten van ontvangstlocaties (havens) naar gebruikslocaties (achterland). Op Europese schaal zijn bijna alle leidingen (aantal rond de 25) korter dan 10 km, alleen in Italië (74 km) en Duitsland (24 km) komen langere voor. Op mondiale schaal zijn ook heel lange trajecten bekend, met name de Gulf Central pijplijn (ruim 3050 km) en de MAPCO (ruim 1750 km) in de USA, en de in Rusland/Oekraïne gelegen pijplijn van ruim 2400 km. Voor een intensivering van het transport per buisleiding zal een infrastructuur moeten worden ontwikkeld die hierin voorziet. Deze nieuwe infrastructuur moet dan inpasbaar zijn in de verschillende ruimtelijke plannen. De Structuurvisie Buisleidingen 2012-2035 gaat uit van een optimale benutting van de beschikbare ruimte. Het principe dat hierbij toegepast wordt is 'breed waar het kan, smal waar het moet'. Rondom alle buisleidingen waar voldoende ruimte beschikbaar is, geldt een strookbreedte van 70 meter. Dit geeft ruimtelijk de nodige beperkingen om grootschalige trajecten te ontwikkelen.	Bij de aanleg van nieuwe buisleidingen gelden op grond van het BevB afstandseisen met betrekking tot de grenswaarde van het PR. Die grenswaarde mag de randen van de leidingstrook niet overschrijven. De PR10⁻⁶-contour voor het PR moet dus binnen de stroken van 70 meter uit de structuurvisie Buisleidingen, blijven. Gelet op de hoeveelheden die in de buisleidingen aanwezig zijn zullen de toxische contouren waarschijnlijk verder reiken. Dat betekent dat dit de nodige aandachtspunten kan opleveren in de toekomst mocht er overgegaan worden tot de aanleg van nieuwe dedicated buisleidingen.	Bij buisleidingen zal bij een lek (ontstaan kans orde grootte 6 * 10⁻⁵ per km per jaar), een gebied tot enkele kilometers van de lekkage worden beïnvloed. De kans hierop is zeer klein, maar het heeft een relatief groot effectgebied. Dit zal de lokale inpassing complex maken.	Bij de buisleiding zijn geen reststoffen te verwachten.	In de huidige situatie is het maatschappelijk geaccepteerd maar het is aannemelijk dat bij intensivering (vooral bij aanleg van nieuwe buisleidingen) de publieke opinie hierin negatief kan zijn en 'not in my backyard' (NIMBY) gedrag kan oproepen.	[P/M] In de PGS-12 zijn voor het veilig bedrijven van een installatie en transport voorziening de nodige mitigerende maatregelen aangegeven. Met die maatregelen wordt aan de stand der techniek voldaan. Verdergaande maatregelen zijn op dit moment niet bekend

Ammoniak onder druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Weg	De risico's van transport van ammoniak over de weg zijn overeenkomstig met die van vervoer over het spoor. De kans op een ongeval is groter (hoger ongevalsfrequentie dan op het spoor), maar het effect is door een kleinere hoeveelheid volume ook iets kleiner, maar nog steeds erg groot. Bij wegvervoer is ammoniak de dominante stof in de categorie GT3. Op dit moment zijn qua transporten geen grote ontwikkelingen te zien. De verwachting in het Rotterdamse havengebied is dat de import van ammoniak op korte termijn (5-10 jaar) meer dan gaat verdubbelen, omdat de stof al een ruim verhandelde commodity is, de infrastructuur er al voor bestaat en opslag en krakers relatief eenvoudig besteld en aangelegd kunnen worden. Wanneer door de energietransitie grote stromen op gang komen is het heel erg afhankelijk waar de stromen gaan lopen en hoe groot die zijn of deze invloed hebben op het weg transport. In 2016 was de prognose dat voor 24 wegvakken (van de 439) een mogelijke overschrijding van de referentiewaarden uit het Basisnet weg zou gelden. Op dit moment zien wij bij tellingen uit 2018 en 2019 voor enkele wegvakken een aantal dat enkele tientallen tankauto's groter is dan je mocht verwachten vanuit de referentiewaarden van het Basisnet Weg. Dit lijkt op dit moment nog niet tot heel grote problemen te leiden. Indien de vraag naar ammoniak heel erg toeneemt vanuit de energietransitie is het niet heel erg aannemelijk dat dit gelijk tot grote vervoersbewegingen over de weg zou leiden, omdat de vervoerde hoeveelheid in een tankauto vele malen kleiner is dan je via andere modaliteiten zou kunnen vervoeren. Maar ook indien ineens grote vervoerstromen over de weg opkomen, leidt dat niet direct tot problemen ten aanzien van het Basisnet weg, omdat de berekende PR contouren op dit moment overwegend nog ver onder de afgesproken afstanden van het Basisnet liggen en de referentiewaarden voor GT3 nog lang niet overschreden worden. Mochten er desondanks toch overschrijdingen komen, dan kan dit leiden tot het ter discussie stellen van het Basisnet weg.	Op dit moment geldt voor de lokale normen (PR 10⁻⁶ contour) dat deze niet tot nauwelijks overschreden wordt en in veel gevallen ver onder de referentiewaarde ligt. Het is niet waarschijnlijk dat ammoniak transport op korte en/ of langere termijn hier een grote invloed op zal hebben, omdat in recente tellingen (2018 en 2019) op weinig plekken ammoniak getransporteerd is en dit vaak ver onder de referentiewaarden ligt, of een heel klein onderdeel uitmaakt van de totale hoeveelheid. Ook zijn er in deze jaren geen grote overschrijdingen van de norm gevonden. Enige uitzondering hierop is 2018 rond de A15 waar overigens ook al aanzienlijke hoeveelheden ammoniak vervoerd werden. Een verdubbeling van ammoniak transport zal daar tot meer problemen kunnen leiden, maar in de rest van Nederland lijkt het eerder incidenteel te zijn. Het kan dan zijn dat de PR contour groter wordt op die plekken, maar zelden groter dan de afgesproken waarden. In het Basisnet weg zijn al maatregelen getroffen om kwetsbare objecten binnen de 10⁻⁶ contour te verwijderen. Dat lijkt hier niet aan de orde.	Zolang er geen grote problemen komen met extra vervoer en knelpunten in het Basisnet weg, voorzien wij hier geen extra ruimtelijke consequenties.	Ammoniak zal niet als vervanging komen van fossiele brandstoffen zoals bij waterstof het geval is. Er is daarom voor het vervoer over de weg geen effect op uitstoot of restproducten. Als veel meer over de weg vervoerd wordt kan dit enige negatieve invloed hebben op de luchtkwaliteit, maar dit is op het geheel vrij minimaal. Ammoniak is één van de kernstoffen die de 'stikstofproblematiek' veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	Vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg ligt niet tot nauwelijks onder een vergrootglas en heeft niet de negatieve media uitstraling van transport van gevaarlijke stoffen. Mocht echter een keer een ongeval gebeuren met een ammoniak transport, dan kan dit snel veranderen in negatieve zin.	[M] Deze zijn op dit moment niet van toepassing of nodig. Wanneer toekomstige stromen toenemen en er op sommige wegvakken knelpunten optreden, zijn mitigerende maatregelen nodig. Die zijn voor wegvervoer relatief makkelijk te treffen, denk aan omrijden via andere wegen. [P/M] Verder gelden de voorwaarden uit het ADR voor dit type transport.
Water	Voor de grote toevoer van ammoniak die gekoppeld is aan de intensivering van deze modaliteit wordt het transport over water als meest relevante gezien. De aanvoer zal dan met gekoelde zeeschepen worden verzorgd waarna de opslag in het havengebied zal moeten plaatsvinden of verlading naar spoorwagons. Een derde transport route landinwaarts zal gecompriemd plaatsvinden. Deze schepen vervoeren grote hoeveelheden tot 350 m3 en bij calamiteiten is de impact (effect) potentieel groot. Er gelden voor deze transporten beperkingen op basis van het plaatsgebonden risico langs deze vaarroutes.	Gezien de overwegingen (mogelijke verdubbeling van het ammoniaktransport) zien wij dat dit invloed zal hebben op de veiligheid op locatie, omdat dit op de relatief korte termijn al een factor van betekenis zal zijn. De referentiewaarden voor GT3 worden in het Basisnet niet overschreden en het is ook niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een verdubbeling van dit transport, omdat de referentiewaarden uit het Basisnet water hoog zijn. Het scenario van een falende binnenvaarttanker ammoniak en de kwantitatieve details daarvan zijn uitgebreid beschreven in het EV-scenarioboek.	Bij schepen zal bij een incident (kans ordegrootte 2 * 10⁻¹¹ per gevaren km per jaar), een groot gebied worden beïnvloed tot enkele kilometers. Er is daarmee een lage kans, maar ook een relatief groot effect qua veiligheid. Desondanks geldt bij transport over water geen GR-plafond. De effectafstanden die ook in het toekomstige beleid zullen moeten worden bepaald kunnen tot meerdere kilometers reiken. De referentiewaarden voor GT3 worden in het Basisnet water echter niet overschreden en het is ook niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een verdubbeling van dit transport.	Bij transport over water zullen de emissies van de schepen als additionele emissie worden gezien. Dit zijn echter geen veiligheid gerelateerde aspecten dus vanuit dat opzicht zijn geen reststoffen te verwachten.	Grote toename van transport kan ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie toch een negatieve bijklank krijgen vanwege de aard van de stof.	[M] Aansluiten bij bestaande mitigerende maatregelen. Een bijzondere maatregel, die in noodgevallen wel voor ammoniak en niet voor de meeste andere stoffen geldt, is het benutten van de goede oplosbaarheid van ammoniak in water. Het toxische risico voor de omgeving kan sterk worden verminderd door in geval van nood ammoniak direct op of onder de waterlijn te lozen.

Ammoniak onder druk	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Spoor	Wanneer een druktank bij een ongeval lek raakt zal het ammoniak snel verdampen en vervolgens een gaswolk vormen. Het toxische effect van ammoniak is op grote afstand merkbaar: afhankelijk van de hoeveelheid stof en snelheid van vrijkomen kunnen tot 1 à 2 kilometer afstand van de plaats van het ongeval gewonden en doden vallen. Daarnaast is ammoniak ook brandbaar en is een explosie mogelijk, maar is dit vele malen kleiner qua intensiteit dan bijvoorbeeld waterstof. Ammoniak is bij spoor een stof in de categorie B2. In het verleden is al veel gedaan om deze stof van het spoor te houden (het ammoniakconvenant tussen DSM en de overheid en het overnemen van ammoniakinstallaties door Microchemie). Hierdoor zijn vaste stromen uit het verleden weggevallen. In de laatste jaren zijn er wel weer stromen op te merken maar de aantallen zijn kleiner dan de referentiehoeveelheden uit het Basisnet spoor. Deze ammoniak stromen zijn redelijk stabiel en lijken nog niet beïnvloed te worden door de energietransitie. De verwachting in het Rotterdamse havengebied is dat de import van ammoniak op korte termijn (5-10 jaar) meer dan gaat verdubbelen, omdat de stof al een ruim verhandelde commodity is, de infrastructuur er al voor bestaat en opslag en krakers relatief eenvoudig besteld en aangelegd kunnen worden. In 2023 is voorzien dat nieuwe vervoersprognoses gemaakt gaan worden voor spoorvervoer van gevaarlijke stoffen. Dit zou een aanvullend perspectief kunnen schetsen op de ontwikkelingen in de jaren 2023-2033.	Referentiewaarden van het Basisnet spoor worden op dit moment op meerdere plekken vrij structureel overschreden. Wanneer door de energietransitie grote stromen op gang komen is het heel erg afhankelijk waar de stromen gaan lopen en hoe groot die zijn of deze invloed hebben op het spoor transport. In het Basisnet spoor staan nu bijvoorbeeld relatief lage referentiewaarden ingevuld voor categorie B2. Dit kan dus al snel leiden tot meer transporten dan in het Basisnet staan opgenomen en de perceptie dat dit onveilig is. Effecten van ammoniak zijn op grote afstand merkbaar en zijn daarom niet alleen lokaal.	Wanneer een aanzienlijke stroom op gang komt bovenop huidige stromen van brandbare gassen, dan zal dit op meerdere routes (m.u.v. de Betuweroute) tot overschrijdingen van de risicoplafonds kunnen leiden, vooral omdat deze op een aantal locaties in de huidige situatie al overschreden worden. Vervoer van gevaarlijke stoffen per spoor is bovendien een gevoelig onderwerp, omdat het al een aantal jaren onder een politiek vergrootglas ligt. Ammoniak kan als toxische stof gemakkelijk in een negatief frame geplaatst worden. Meer ammoniak transport zal daarom hoogstwaarschijnlijk voor maatschappelijke onrust zorgen. Zeker wanneer blijkt dat extra transporten tot overschrijdingen van risicoplafonds gaan leiden. Het toxische effectgebied is erg groot (ordegrootte één tot anderhalve kilometer) en daarmee een factor van betekenis om rekening mee te houden in de directe omgeving.	Ammoniak zal niet als vervanging komen van fossiele brandstoffen zoals bij waterstof het geval is. Er is daarom voor het vervoer over het spoor geen effect op uitstoot of restproducten. Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	Er zijn nu al de nodige gevoeligheden rond dit type transport. Deze zullen door extra transport van ammoniak extra negatief beïnvloed worden, omdat deze stroom nadrukkelijk negatief geframed kan worden.	[P/M] Deze zijn op dit moment niet van toepassing of nodig. Wanneer toekomstige stromen toenemen en er op belangrijke Basisnet routes grote knelpunten optreden, zijn mitigerende maatregelen waarschijnlijk nodig. In het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor zijn hier verschillende opties voor genoemd, maar die zijn ook allemaal lastig uit te voeren.

Bijlage C.6 Keten Ammoniak (sterk gekoeld, vloeibaar gemaakt)

Ammoniak sterk gekoeld	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Productie	Wij verwijzen naar de informatie hierboven bij ammoniak ‘onder druk vloeibaar gemaakt’. De productie van ammoniak bestaat uit de omzetting van waterstof + stikstof in het Haber-Bosch proces, los van de hiernavolgende manier van zuivering, opslag en/of verdere omzetting. Ammoniakproducenten hebben een zekere mate van vrijheid hoe ze het reactieproduct procesmatig willen verzamelen en opslaan. In deze keten nemen we het uitgangspunt dat ammoniak tot (bijna) -33°C wordt afgekoeld. Voor gekoeld atmosferisch wordt het gas niet onder druk gebracht maar opgeslagen in een reservoir, meestal meerdere duizenden kubieke meters onder een nagenoeg atmosferische omstandigheid (variërend van –0,006 bar tot +0.14 bar overdruk).	De productie van ammoniak geeft lokaal nieuwe PR contouren ten gevolge van ontvangst van waterstof, het reactievat en de opslag en aanwezigheid van ammoniak. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risico voor de directe omgeving gelden. De effecten van waterstof op korte afstand van de opslag zijn eerder bij zowel gasvormige als vloeibare waterstof beschreven. Omdat de activiteiten over het algemeen in industriële omgevingen zullen plaatsvinden is de verwachting dat de risico-contouren over het algemeen goed inpasbaar binnen het lokale beleid voor EV. Voor nieuwe locaties zullen de risico-contouren (tot circa 200 m voor de 10⁻⁶ contour) mogelijk wel knelpunten geven. In de HRB is voor ammoniak tot 10 ton een afstandentabel aanwezig. Voor installaties tussen 10 en 50 ton is in hoofdstuk 9 van de module C een rekenmethode vastgelegd en voor installaties boven de 50 ton is het BRZO van toepassing op de bepaling van de ruimtelijke impact.	Ammoniak is een lastig in te passen stof vanwege het toxische karakter en de grote effectafstanden (tot enkele km). In het gebied buiten de directe omgeving neemt de letaliteit van de ammoniak wolk snel af, maar blijft schadelijk en zeker waarneembaar (reukgrens bij 5 ppm, prikkelende ogen bij 100 ppm, ademhalingsproblemen bij 1700 ppm, de 10 minuten levensbedreigende waarde (LBW) ligt op 2680 ppm, direct lethaal bij 4000-5000 ppm). De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid hebben voor toxische stoffen twee aspecten: - Voor nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rond een activiteit met gevaarlijke stoffen is de afstand afgekapt op 1,5 km. - De daadwerkelijke afstand is van belang voor het verlenen van vergunning aan een dergelijke activiteit, deze afstand kan enkele km bedragen en is sterk afhankelijk van de hoeveelheid in het systeem. De aangegeven aandachtsgebieden alsmede het negatieve imago van ammoniak als risico stof maken een brede invoering van ammoniak productie gevoelig. Voor de veiligheid in de ruimere omgeving zal ammoniak een grotere invloed hebben op de omgeving dan waterstof.	Indien de productie van groene ammoniak wordt bevorderd heeft dat een positieve ontwikkeling ten opzichte van de CO₂ emissie. Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	De lokale gevoeligheden rond de huidige productie en opslaglocaties zijn bekend. Toename van de productiecapaciteit zal ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie waarschijnlijk toch een negatieve bijklank krijgen.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak productie projecten aan de hand van onder andere de PGS-12. [P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.
Conversie	Het is voor de hand liggend, dat de conversie van ammoniak onder druk naar ammoniak sterk gekoeld niet op zich als afzonderlijke conversie wordt uitgevoerd, maar dat dat al direct bij de productie-unit (Haber-Bosch-proces) is gebeurd. De omgekeerde conversie, van sterk gekoeld naar bedrijfstemperatuur, zal ook niet als los proces gangbaar zijn of worden. Deze conversie zal eveneens samenhangen met een direct gebruik van de ammoniakmoleculen in een vervolgproces. We kijken hier niet naar processen en toepassingen die zich buiten de scope van waterstof bevinden, zoals de vervaardiging van kunstmest of de verbranding van de ammoniak als energiebron. Mocht de gekoelde ammoniak uiteindelijk weer ingezet worden als een echte waterstofleverancier (door het kraken van de ammoniak) dan is de conversie in beeld. Maar juist het kraken van ammoniak tot waterstof (en stikstof) is een onzeker deel van de keten. Dit omgekeerde Haber-Bosch proces kent nog nauwelijks een industriële, procestechnische ontwikkelingsroute. Daarbij zij opgemerkt, dat de Haber-Bosch reactie wel een typische evenwichtsreactie is; er zijn daarom aanknopingspunten om de (terug)vorming van waterstof te sturen met temperaturen, drukken en katalysatoren. Ook hier zal aan de voorkant sprake zijn van een opslag van ammoniak. Voor deze opslag gelden vergelijkbare risico aspecten als bij de opslag bij de productie	Voor het kraken van ammoniak zijn de risico’s voor de omgeving vergelijkbaar met die van de productie van ammoniak. Het grootste risico is gekoppeld aan de opslag van ammoniak en de geproduceerde waterstof. Beide producten hebben bij calamiteiten invloed op de directe omgeving. Bij de conversie komt echter ook stikstof vrij dat bij een calamiteit in de directe omgeving verstikkend is voor de medewerkers.	Ammoniak is een lastig in te passen stof vanwege het toxische karakter en de grote effectafstanden (tot enkele km). In het gebied buiten de directe omgeving neemt de letaliteit van de ammoniak wolk snel af, maar blijft schadelijk en zeker waarneembaar (reukgrens bij 5 ppm, prikkelende ogen bij 100 ppm, ademhalingsproblemen bij 1700 ppm, de 10 minuten levensbedreigende waarde (LBW) ligt op 2680 ppm, direct lethaal bij 4000-5000 ppm). De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid hebben voor toxische stoffen twee aspecten: - Voor nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rond een activiteit met gevaarlijke stoffen is de afstand afgekapt op 1,5 km. - De daadwerkelijke afstand is van belang voor het verlenen van vergunning aan een dergelijke activiteit, deze afstand kan enkele km bedragen en is sterk afhankelijk van de hoeveelheid in het systeem. De aangegeven aandachtsgebieden alsmede het negatieve imago van ammoniak als risico stof maken een brede invoering van ammoniak productie gevoelig. Voor de veiligheid in de ruimere omgeving zal ammoniak een grotere invloed hebben op de omgeving dan waterstof.	Bij omzetting van Ammoniak naar waterstof komt er stikstof vrij in de directe omgeving. Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	De lokale gevoeligheden rond de huidige productie en opslaglocaties zijn bekend. Toename van de productiecapaciteit zal ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie waarschijnlijk toch een negatieve bijklank krijgen.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak projecten aan de hand van onder andere de PGS-12. [P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.

Ammoniak sterk gekoeld	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Opslag	In de productie en conversie activiteiten zijn altijd opslagvoorzieningen noodzakelijk om de ammoniak tijdelijk op te slaan. Omdat bij een intensivering van deze modaliteit ook de opslagen zullen toenemen nemen de hieraan verbonden risico aspecten in gelijke mate toe. Het opslaan van ammoniak onder sterk gekoelde omstandigheden is een zeer bekend procedé. Het wordt op grote schaal toegepast binnen de ammoniakindustrie zelf, maar ook in veel koeltoepassingen in andere branches zoals de voedselindustrie en bij ijsbanen. Dat betekent dat er zeer veel knowhow op dit thema bestaat, en in het verlengde daarvan ook veel documentatie over normen en richtlijnen, en bijvoorbeeld ook naast een brede, ook nog een eigen PGS (PGS-12, en PGS-13)	De opslag van ammoniak geeft lokaal nieuwe PR contouren. Omdat de activiteiten over het algemeen in industriële omgevingen zullen plaatsvinden is de verwachting dat de risico-contouren over het algemeen goed inpasbaar binnen het lokale beleid voor EV. Voor nieuwe locaties zullen de risico-contouren (tot circa 200 m voor de 10⁻⁶ contour) mogelijk wel knelpunten geven. In de HRB is voor ammoniak tot 10 ton een afstandentabel aanwezig. Voor installaties tussen 10 en 50 ton is in hoofdstuk 9 van de module C een rekenmethode vastgelegd en voor installaties boven de 50 ton is het BRZO van toepassing op de bepaling van de ruimtelijke impact.	Ammoniak is een lastig in te passen stof vanwege het toxische karakter en de grote effectafstanden (tot enkele km). In het gebied buiten de directe omgeving neemt de letaliteit van de ammoniak wolk snel af, maar blijft schadelijk en zeker waarneembaar (reukgrens bij 5 ppm, prikkelende ogen bij 100 ppm, ademhalingsproblemen bij 1700 ppm, de 10 minuten levensbedreigende waarde (LBW) ligt op 2680 ppm, direct lethaal bij 4000-5000 ppm). De aandachtsgebieden zoals aangegeven in het toekomstige beleid hebben voor toxische stoffen twee aspecten: 1. Voor nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rond een activiteit met gevaarlijke stoffen is de afstand afgekapt op 1,5 km. 2. De daadwerkelijke afstand is van belang voor het verlenen van vergunning aan een dergelijke activiteit, deze afstand kan enkele km bedragen en is sterk afhankelijk van de hoeveelheid in het systeem. De aangegeven aandachtsgebieden alsmede het negatieve imago van ammoniak als risico stof maken een brede invoering van ammoniak productie gevoelig. Voor de veiligheid in de ruimere omgeving zal ammoniak een grotere invloed hebben op de omgeving dan waterstof.	Indien de productie van groene ammoniak wordt bevorderd heeft dat een positieve ontwikkeling ten opzichte van de CO₂ emissie. Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	De lokale gevoeligheden rond de huidige productie en opslaglocaties zijn bekend. Toename van de productiecapaciteit zal ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie waarschijnlijk toch een negatieve bijklank krijgen.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak projecten aan de hand van onder andere de PGS-12. [P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.
Verlading	In elk van de ketens zal er aan het transport een verladingsmoment verbonden zijn. Of het nu over de weg, per spoor of per schip wordt getransporteerd, het verladen vormt een zeker risico. In de PGS-12 zijn diverse voorzieningen aangegeven om de risico's te beheersen. In de HRB zijn hiervoor specifieke rekenregels opgenomen hoe deze onderdelen dienen te worden meegenomen in de risicomodellen. Bij de verlading spelen vooral de onderdelen als de laad- losslang en armen een bepalende rol. Daarnaast zijn ook de aansluit diameters, de hoeveelheden en de heersende drukken relevant. In algemene zin kan worden gesteld dat indien er sprake is van een toename in een bepaalde modaliteit, ook de verlading in eenzelfde mate zal toenemen. Bij een intensivering van de keten zullen ook de verladersrisico's navenant toenemen.	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn medebepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij relatief kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving groot (kan oplopen tot 50-60% van de risico-contour) omdat het gekoppeld is aan de leiding diameter van de verladingseenheid (auto, wagon of schip) en de hier heersende druk. Omdat dit een vast gegeven is, is die absolute bijdrage overal gelijk maar varieert de relatieve bijdrage sterk.	De aandachtsgebieden zijn sterk afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk. De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Bij grootschalige opslag of productie en een verlading per tankauto (25m³) zal het omgevingsrisicobeeld primair door de opslag worden bepaald. Indien de verlading per treinwagon (circa 50 m³) of per schip (circa 350 m³) plaatsvindt, schuift het zwaartepunt meer naar de verladingseenheid. Wij voorzien hier een beperkte invloed vanwege de aard van de stoffen.	Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	N.v.t.	[P/M] Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de ammoniak projecten aan de hand van onder andere de PGS-12. [P/M] Door toepassing van steeds verdergaande ontwikkelingen worden maatregelen direct in ontwerp opgenomen. Deze vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE-beoordeling. [P] Bij de toestemming van ammoniak ontwikkelingen is het ruimtelijk mogelijk om deze ontwikkeling toe te laten en zo geen additioneel knelpunt te vormen.
Buisleiding	Voor het transport over echt lange afstanden (bijvoorbeeld meer dan 100 km) van sterk gekoeld ammoniak is het gebruik van buisleidingen niet aan de orde en zal men het ook in de toekomst onrealistisch achten. Lange buisleidingen voor sterk gekoelde ammoniak (-33°C) in het publieke domein hebben namelijk zowel technische beperkingen als veiligheidsoverwegingen. De infrastructuur (buizen, afsluiters en overige elementen) is niet voldoende beheersbaar om consequent en betrouwbaar steeds op een dergelijke lage temperatuur te stabiliseren. Wij sluiten deze optie uit bij lange leidingen. Voor korte leidingen binnen fabrieken of tussen nabijgelegen fabrieken dan wel havens/opslagterminals is het wel realistisch.	Een grote lekkage en uitstroom bij een buisleiding waarin sterk gekoelde ammoniak aanwezig is, is een incidenttype dat aanzienlijke gevolgen kan hebben, zowel vanwege de koude fase van ammoniak (denk aan arbeidsveiligheid; bevroeringsschade aan objecten), maar vooral vanwege het snel verdampende ammoniak en de toxiciteit ervan. De stof heeft een sterke geur en is zeer prikkelend, dat geeft direct een waarschuwing. In de industrie kent men de gevaren, eventuele passanten kennen deze niet.	Een grote lekkage zal (langzame, maar gestage) verspreiding veroorzaken naar een steeds grotere omgeving, die uiteindelijk tot meer dan een kilometer kan reiken. Vooral bij late ontdekking van een dergelijk lek zijn ernstige toxische effecten in de wijde omgeving mogelijk.	N.v.t.	Buisleidingen met sterk gekoelde ammoniak zijn niet zomaar geschikt om in de bebouwde omgeving te gaan aanleggen/ exploiteren.	[P/M] Maatregelen zijn o.a. het technisch perfectioneren van de koelinstallaties en het opstellen van calamiteitenplannen.

Ammoniak sterk gekoeld	Overwegingen	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In directe omgeving	Veiligheid/ ruimtelijke consequenties In ruimere omgeving	Uitstoot en restproducten	Maatschappelijke consequenties	Maatregelen
Weg	Ten aanzien van transport van ammoniak over de weg geldt dat tot vloeistof gekoeld transport <i>niet</i> is toegestaan vanuit het ADR. Het is niet te verwachten dat dit op termijn verandert. Dit is vastgelegd in randnummer 2.2.2.2.2, waarin wordt gesteld; <i>“De volgende stoffen en mengsels zijn niet ten vervoer toegelaten: ... • Sterk gekoelde, vloeibaar gemaakte gassen die niet onder classificatiecode 3 A, 3 O of 3 F kunnen worden ingedeeld”</i>. Mocht dit wel worden toegestaan, dan is dat een traject van jaren voordat wetgeving is aangepast. De verwachting is dus reëel dat alleen onder druk samengeperst gas vervoerd zal worden op een termijn tot 10 jaar. Indien dit daarna wel wordt toegestaan is het op dit moment volstrekt onvoorspelbaar wat dit betekent voor de hoeveelheden die over de weg getransporteerd worden. Aanvullend op de effecten ten opzichte van het vervoer onder druk is het in theorie mogelijk dat wanneer tot vloeistof gekoeld gas vervoerd wordt en aangestraald wordt door een grote hittebron bij instantaan vrijkomen van het gas een explosie of grote brand optreedt. Dat is echter in het geval van ammoniak niet heel plausibel, omdat vloeibare ammoniak uit zichzelf niet heel goed of makkelijk brandt. De verwachting die wij hebben is dat de effecten daarmee veelal vergelijkbaar zijn met tot vloeistof samengeperst gas.	Het wegvervoer van gekoelde ammoniak lijkt niet reëel, omdat het op dit moment verboden is, en slechts via een lang, internationaal overlegtraject eventueel kan worden toegestaan. Indien dit desondanks later toch toegestaan wordt, dan is de veiligheid een aandachtspunt vanwege grote toxische effectafstanden, maar ook vanwege de koude vloeistof (arbeidsveiligheid). Het scenario brand/ explosie is in principe ook mogelijk, maar de kans van optreden is heel erg klein. Dominante scenario’s zijn toxisch van aard. Vergelijkbaar met ammoniak transport onder druk lijkt de invloed op het Basisnet weg – indien ooit vervoer over de weg wordt toegestaan – desondanks beperkt en niet of nauwelijks tot overschrijding van referentiewaarden te leiden.	Het wegvervoer van gekoelde ammoniak lijkt niet reëel, omdat het op dit moment verboden is, en slechts via een lang, internationaal overlegtraject eventueel kan worden toegestaan. Indien dit desondanks later toch toegestaan wordt, dan is de veiligheid een aandachtspunt vanwege grote toxische effectafstanden. Het scenario brand/ explosie is in principe ook mogelijk, maar de kans van optreden is heel erg klein. Dominante scenario’s zijn toxisch van aard. Vergelijkbaar met ammoniak transport onder druk lijkt de invloed op het Basisnet weg – indien ooit vervoer over de weg wordt toegestaan – desondanks beperkt en niet of nauwelijks tot overschrijding van referentiewaarden te leiden.	Ammoniak zal niet als vervanging komen van fossiele brandstoffen zoals bij waterstof het geval is. Er is daarom voor het vervoer over de weg geen effect op uitstoot of restproducten. Als veel meer over de weg vervoerd wordt kan dit enige negatieve invloed hebben op de luchtkwaliteit, maar dit is op het geheel vrij minimaal. Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	Omdat vervoer over de weg nog niet mag is het niet in te schatten wat de maatschappelijke consequenties zullen zijn.	[P] Wanneer het huidige verbod zou worden opgeheven is een pakket maatregelen denkbaar zoals: inspecties, verkeersbegeleiding, opleiding en daarnaast een landelijk calamiteitenplan voor gekoelde ammoniak.
Water	In tegenstelling tot de voorschriften bij het spoor (RID) en weg (ADR) is er bij de binnenvaart (ADN) wel de mogelijkheid aanwezig om sterk gekoelde ammoniak te vervoeren (het UN nummer is in dit geval erg specifiek, namelijk UN 9000 en niet aansluitend op de reguliere nummering die momenteel loopt tot UN 3549. De tekst van randnummer 2.2.2.2.2 luidt: <i>“De volgende stoffen en mengsels zijn niet ten vervoer toegelaten: ... - Sterk gekoelde, vloeibaar gemaakte gassen die niet onder één van de classificatiecodes 3 A, 3 O of 3 F kunnen worden ingedeeld, met uitzondering van stofnummer 9000 AMMONIAK, WATERVRIJ, STERK GEKOELD, van classificatiecode 3 TC in tankschepen”</i>. Ondanks deze mogelijkheid is binnen Nederland geen transporteur (binnenvaartschipper en tankschip) bekend, die op deze manier vervoert. Het is tot nu toe een onbenutte optie. Indien transport per schip toch zou plaats vinden, moet aansluitend transport van het afleverpunt naar de eindgebruiker te worden verzorgd. Hier zal dan gebruik gemaakt moeten worden van een van de andere modaliteiten (weg, buis of rail). Geen van de andere modaliteiten staat dit toe (technisch of juridisch beperkt) en zal daarom onder druk verder vervoerd moeten worden.	De referentiewaarden voor GT3 worden in het Basisnet niet overschreden en het is zeker niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een verdubbeling van dit transport. Voor sterk gekoelde ammoniak komt er nog extra risico bij op het punt van arbeidsveiligheid (alle typen incidenten die primair te wijten zijn aan de lage temperatuur, denk aan huidbeschadiging e.d.).	Omdat het binnenvaartvervoer van gekoelde ammoniak niet verboden is, dient men met het ontwikkelen/groeien van deze vervoerswijze rekening te houden: zo ja, dan is de veiligheid een belangrijk aandachtspunt, ook al zijn de effecten in de regel kleiner dan bij transport onder druk. De effectafstanden kunnen tot meerdere km reiken. De referentiewaarden voor GT3 worden in het Basisnet water echter niet overschreden en het is zeker niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een ruimte vergroting of verdubbeling van dit transport.	Bij transport over water zullen de emissies van de schepen als additionele emissie worden gezien. Dit zijn echter geen veiligheid gerelateerde aspecten dus vanuit dat opzicht zijn geen reststoffen te verwachten.	De lokale gevoeligheden rond de huidige productie en opslaglocaties zijn bekend. Toename van de productiecapaciteit, en dus transportbewegingen, zal ondanks de maatschappelijke plus ten aanzien van energietransitie toch een negatieve positie krijgen.	[M] Aansluiten bij bestaande mitigerende maatregelen. Een bijzondere maatregel, die in noodgevallen wel voor ammoniak en niet voor de meeste andere stoffen geldt, is het benutten van de goede oplosbaarheid van ammoniak in water. Het toxische risico kan sterk worden verminderd bij het ingeval van nood lozen van ammoniak direct op of onder de waterlijn.
Spoor	Ten aanzien van transport van ammoniak over het spoor geldt dat tot vloeistof gekoeld transport <i>niet</i> is toegestaan vanuit het RID. Dit is vastgelegd in randnummer 2.2.2.2.2, waarin wordt gesteld; <i>“De volgende stoffen en mengsels zijn niet ten vervoer toegelaten: ... • Sterk gekoelde, vloeibaar gemaakte gassen die niet onder classificatiecode 3 A, 3 O of 3 F kunnen worden ingedeeld;</i> Mocht dit wel worden toegestaan, dan is dat een traject van jaren voordat wetgeving is aangepast. De verwachting is dus reëel dat alleen onder druk samengeperst gas vervoerd zal worden op een termijn tot 10 jaar. Indien dit daarna wel wordt toegestaan is het op dit moment volstrekt onvoorspelbaar wat dit betekent voor de hoeveelheden die over de weg getransporteerd worden. Aanvullend op de effecten ten opzichte van het vervoer onder druk is het in theorie mogelijk dat wanneer tot vloeistof gekoeld gas vervoerd wordt en aangestraald wordt door een grote hittebron bij instantaan vrijkomen van het gas een explosie of grote brand optreedt. Dat is echter in het geval van ammoniak niet heel plausibel, omdat vloeibare ammoniak uit zichzelf niet heel goed of makkelijk brandt. De verwachting die wij hebben is dat de effecten daarmee veelal vergelijkbaar zijn met tot vloeistof samengeperst gas.	Het spoorvervoer van gekoelde ammoniak lijkt niet reëel, omdat het op dit moment verboden is, en slechts via een lang, internationaal overlegtraject eventueel kan worden toegestaan. Indien dit desondanks later toch toegestaan wordt, dan is de veiligheid een aandachtspunt vanwege grote toxische effectafstanden, maar ook vanwege de koude vloeistof (arbeidsveiligheid). Het scenario brand/ explosie is in principe ook mogelijk, maar de kans van optreden is heel erg klein. Dominante scenario’s zijn toxisch van aard. Ook moet rekening gehouden worden met het feit dat in het Basisnet spoor nu relatief lage referentiewaarden opgenomen zijn voor categorie B2. Dit kan dus al snel leiden tot meer transporten dan in het Basisnet als referentiewaarden zijn opgenomen.	Het spoorvervoer van gekoelde ammoniak lijkt niet reëel, omdat het op dit moment verboden is, en slechts via een lang, internationaal overlegtraject eventueel kan worden toegestaan. Indien dit desondanks later toch toegestaan wordt, dan is de veiligheid een aandachtspunt vanwege grote toxische effectafstanden. Het scenario brand/ explosie is in principe ook mogelijk, maar de kans van optreden is heel erg klein. Dominante scenario’s zijn toxisch van aard. Wanneer een aanzienlijke stroom op gang komt bovenop huidige stromen van brandbare gassen, dan zal dit op meerdere routes (m.u.v. de Betuweroute) tot overschrijdingen van de risicoplafonds kunnen leiden, vooral omdat deze op een aantal locaties in de huidige situatie al overschreden worden. Vervoer van gevaarlijke stoffen per spoor is bovendien een gevoelig onderwerp, omdat het al een aantal jaren onder een politiek vergrootglas ligt. Ammoniak kan als toxische stof gemakkelijk in een negatief frame geplaatst worden. Meer ammoniak transport zal daarom hoogstwaarschijnlijk voor maatschappelijke onrust zorgen. Zeker wanneer blijkt dat extra transporten tot overschrijdingen van risicoplafonds gaan leiden.	Ammoniak zal niet als vervanging komen van fossiele brandstoffen zoals bij waterstof het geval is. Er is daarom voor het vervoer over het spoor geen effect op uitstoot of restproducten. Ammoniak is één van de kernstoffen die de ‘stikstofproblematiek’ veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.	Er zijn nu al de nodige gevoeligheden rond dit type transport. Deze zullen door extra transport van ammoniak extra negatief beïnvloed worden, omdat deze stroom nadrukkelijk negatief geframed kan worden.	[P/M] Deze zijn op dit moment niet van toepassing of nodig. Wanneer toekomstige stromen toenemen en er op belangrijke Basisnet routes grote knelpunten optreden, zijn mitigerende maatregelen waarschijnlijk nodig. In het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor zijn hier verschillende opties voor genoemd, maar die zijn ook allemaal lastig uit te voeren. Wanneer daarom in 2023 in de nieuwe prognoses grote ontwikkelingen voorzien worden, moet hier actief mee aan de slag gegaan worden om maatregelen te nemen.

Gecomprimeerde analyse

Bijlage D

Bijlage D.1: Keten pure Waterstof (gas) standaard onder hoge druk

Weinig tot geen
aandachtspunten

Een aantal belangrijke
aandachtspunten

Veel significante
aandachtspunten

De betekenis van aandachtspunt hier is dat een ketenonderdeel nader beschouwd moet worden in de praktijk op één of meerdere facetten. Aandachtspunt betekent **niet direct dat er significante of onoplosbare veiligheidsproblemen zullen optreden*

Ketenonderdeel	Veiligheid / ruimtelijke consequenties		Maatregelen *	Technische kenmerken
	In directe omgeving	In ruimere omgeving		
Productie grijs	De productie van waterstof is een standaard proces binnen de petrochemie. De productie vindt plaats op locaties die onderdeel zijn van een veel grotere chemische productielocatie. Er kunnen bij een calamiteit consequenties in de directe omgeving zijn: menselijk letsel van aanwezigen op de chemische productielocatie en schade aan andere aanwezige installaties. Waterstof en aardgas zijn zeer brandbare stoffen met effecten op korte afstand en lange afstand.	De grootschalige productie van grijze waterstof vindt plaats op chemische productielocaties. Calamiteiten kunnen consequenties hebben in de ruimere omgeving, met gevaar voor omwonenden op (zwaar) letsel. Waterstof en aardgas zijn zeer brandbare stoffen met effecten op lange afstand. De consequenties zijn sterk afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid en druk.	[P/M] Er is al een regime om maatregelen op te nemen bij nieuwe ontwikkelingen. Deze maatregelen betreffen het toepassen van BBT standaarden en verschillende PGS richtlijnen en zijn gericht op detectie, ventilatie en installatie technische aspecten.	Kraken van aardgas d.m.v. SMR. Bij dit proces komt CO ₂ vrij.
Productie blauw	Bepert verschil ten opzichte van grijze waterstofproductie door het afvangen en opslaan van CO ₂ ; binnen straal van 10 meter een mogelijk verhoogd veiligheidsrisico.	Intensivering zit met name in afvangen en opslaan van CO ₂ . Dit heeft een beperkte ruimtelijke impact mits omstandigheden voor opslag in ondergrond geschikt zijn.	[P/M] Er is al een regime om maatregelen op te nemen bij nieuwe ontwikkelingen net als bij grijze productie.	Zelfde proces als bij grijze productie. Verschil is dat de vrijgekomen CO ₂ wordt afgevangen en opgeslagen.
Productie groen	Bij grootschalige productie is er weinig verschil ten opzichte van grijze waterstofproductie, behalve dat geen aardgas wordt benut. Nieuwe productiecapaciteit zal lokaal nieuwe veiligheidscontouren (PR contouren) geven, die over het algemeen goed in te passen zijn op de betreffende locatie. Dit is overigens wel afhankelijk van de omvang. Dit resulteert in de gebouwde omgeving sneller tot mogelijke knelpunten.	De ruimtelijk consequenties zijn alleen lokaal en vallen binnen de externe veiligheidskaders. Dit vraagt steeds een lokale afweging, net als bij de productie van grijze waterstof. In de industriële omgeving is er een kleine kans dat hier knelpunten uit volgen. In de gebouwde omgeving bieden deze kaders minder ruimte waardoor mogelijk knelpunten sneller kunnen ontstaan.	[P/M] Bij het ontwerp van de elektrolyser is het afhankelijk van de initiatiefnemer tot welk detailniveau maatregelen worden meegenomen. Dit is het gevolg van nog ontbrekende regelgeving. Een mogelijke maatregel is het opnemen van deze regelgeving.	Productie door splitsing van water (H ₂ O) d.m.v. elektriciteit in waterstof (H ₂) en zuurstof (O ₂).
Conversie (compressie)	Intensivering van de conversie capaciteit geeft lokaal nieuwe veiligheidscontouren (PR contouren). Voor grote industriële projecten zijn deze vaak goed in te passen in huidige beleid EV. In de gebouwde omgeving zal, net als bij productie, sneller tegen knelpunten worden aangelopen.	Aandachtsgebieden worden bepaald op brand- en explosiescenario's en zijn afhankelijk van opgeslagen hoeveelheid en druk.	[P/M] Maatregelen worden direct geïntegreerd in de ontwikkeling van grootschalige projecten. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling. Bij kleinschalige projecten is het toepassen van deze richtlijnen minder vanzelfsprekend.	Compressie van waterstof naar hoge druk (~80-700 bar) en expansie tot lagere/atmosferische druk.
Opslag: tank	De rekenmethodiek is nog niet up-to-date en consistent. Er is geen verwijzing opgenomen in BEVI-handleiding v4.3.	Voor opslag in de gebouwde omgeving zijn ruimtelijke consequenties te verwachten net als bij productie. Hiermee is nog weinig ervaring, waardoor overwegingen rond het groepsrisico nog maar beperkt aan de orde zijn geweest.	[P/M] Aansluiten bij bestaande technische (bron) maatregelen. Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de projecten aan de hand van onder andere de PGS35 en de maatregelen rond brand- en explosiegebieden uit de Omgevingswet	Stationaire opslag in hoge druk tanks (van staal) met een druk in de range van 80-200 bar.
Opslag: Grootschalig (leeg gasveld, zoutcaverne)	Afhankelijk van de locatie en de wijze van implementatie kan bovengrondse veiligheid van de installatie, seismisch risico of lekkage een aandachtspunt zijn. Deze aspecten dienen per locatie en implementatie specifiek beoordeeld te worden. Door de verschillen tussen methaan en waterstof zijn het ook nieuwe risico's voor die gebieden die nieuwe PR-contouren zullen geven	Ruimtelijke consequenties van grootschalige opslag kunnen aanzienlijk zijn. Nieuwe bestemmingen binnen het invloedsgedebied van de opslag kunnen ruimtelijke beperkingen kennen. De huidige SAFETI-NL rekenmethodiek is echter nog niet toegesneden op zoutcavernes. Incidenten moeten los van de rekensystematiek beoordeeld worden. De bestaande rekenmethodiek verdient meer aandacht voor explosierisico's.	[P/M] Voor de winning van koolwaterstoffen is een Seismisch Risico Analyse (SRA) vereist. Voor opslag is nog geen specifieke procedure t.a.v. risicoanalyse ontwikkeld. Tot dat moment wordt grotendeels conform de SRA van koolwaterstoffen gewerkt. Additionele potentiële risico's als lekkage langs de put zijn laag. Seismisch Risico Analyse en veiligheid van de bovengrondse installaties dienen hierbij meegenomen worden.	Grootschalige opslag van waterstof in zoutcavernes of verlaten gasvelden. Drukken hebben een orde van grootte van 100-200 bar.
Verladen	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn medebepalend voor het totale risico beeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving relatief groot.	De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Hoe groter de verladingseenheid wordt (tankauto vs. treinwagon vs. binnenvaartschip) hoe meer het zwaartepunt van het risico naar die verladingseenheid zal schuiven.	[P/M] Aansluiten bij bestaande maatregelen. Deze zijn op dit moment geïntegreerd in de ontwikkeling van de projecten aan de hand van onder andere de PGS35. Vereisten zijn opgenomen in diverse normen en richtlijnen en worden geëist als onderdeel van HAZOP studie of CE beoordeling.	

Maatschappelijke consequenties zijn bijvoorbeeld dat een hoge CO₂ uitstoot bij grijze productie geen bijdrage levert aan klimaatdoelstellingen. Ook kan in het extreme geval dat opslag van CO₂ ondergronds (op land) overwogen wordt sociale onrust opleveren.

Uitstoot en restproducten

Indien de transitie wordt gemaakt van grijs via blauw naar groen dan is in het productieproces van waterstof de vervanging van fossiele brandstoffen opgetreden. Ook in de blauwe varianten is al een duidelijke afname van de CO₂ uitstoot.

Bij elektrolyse wordt ook zuurstof geproduceerd. Bij productie uit biomassa komt CO₂ vrij, maar dat is afkomstig uit biomassa en wordt daarmee als klimaatneutraal gezien.

Uitstoot is verder in de keten niet relevant. Kleine lekken geven geen bezwaarlijke gezondheidsissues.

* [P] Preventieve maatregelen
[M] Mitigerende maatregelen

Bijlage D.1: Keten pure Waterstof (gas) standaard onder hoge druk

Weinig tot geen
aandachtspunten

Een aantal belangrijke
aandachtspunten

Veel significante
aandachtspunten

De betekenis van aandachtspunt hier is dat een ketenonderdeel nader beschouwd moet worden in de praktijk op één of meerdere facetten. Aandachtspunt betekent **niet direct dat er significante of onoplosbare veiligheidsproblemen zullen optreden*

Ketenonderdeel	Veiligheid / ruimtelijke consequenties		Maatregelen *	Technische kenmerken
	In directe omgeving	In ruimere omgeving		
Transport: buisleidingen	Buisleidingen voor aardgas en waterstof bestaan al langere tijd. Bij hergebruik van het aardgasnetwerk gaat het om grotere hoeveelheden dan gebruikelijk wat ook andere kansen en effecten met zich meebrengt. Effecten zijn zeer afhankelijk van de specificaties van de buisleiding, zoals druk, diameter, diepte ligging. Het is op dit moment nog niet duidelijk of de risico-contouren groter of kleiner worden bij het gebruik van waterstof in bestaande leidingen. In geval van multifuel tankstations (MFT's) kan lokale aanvoer van waterstof (op lange termijn) via buisleidingen (waarschijnlijk grotendeels nieuw aangelegd en kleiner dan transportleidingen) of lokaal geproduceerd plaatsvinden. Hierbij zal steeds een lokale veiligheidsafweging gemaakt moet worden.	Indien het bestaande aardgasnetwerk benut wordt kunnen de ruimtelijke consequenties meevallen. Het ruimtegebruik zal dan vergelijkbaar zijn als nu voor aardgas vereist is. Wanneer nieuwe transport buisleidingen aangelegd moeten worden zijn ruimtelijke consequenties voorzienbaar. Nieuwe aanleg bij multifuel tankstations kunnen lokale aandachtspunten opleveren.	[P] Mogelijke maatregelen: Regelgeving voor graafwerkzaamheden en afstand tot windturbines, en een zeer adequaat lekkage-preventie en lekkage-detectieregime. Hiermee worden de noodzakelijke afstanden gewaarborgd en mogelijke ontstekingsbronnen beperkt.	Transport door buisleidingen kan worden gezien als een reëel toekomstbeeld. Veiligheid van dit transport een belangrijk aandachtspunt maar geen belemmering. Buisleidingen zijn relatief veiliger dan andere transport modaliteiten. Een groot deel van de bestaande gasinfrastructuur kan hoogstwaarschijnlijk worden hergebruikt. Nieuw aan te leggen buisleidingen kunnen vragen om grote investeringen en lokale veiligheid- en maatschappelijke afwegingen.
Transport: weg	In eerste instantie wordt een grote groei van transport over de weg voorzien die op lange termijn kleiner wordt door overname door buisleidingen. De hoeveelheid transport lijkt binnen de risicoplafonds van het Basisnet weg te blijven. NB: Waterstof wordt als stof in risicomodellen opgenomen met vrij geringe effectafstanden (vergelijkbaar met diesel). Wanneer dit veranderd worden risico's reëler ingeschat en worden veiligheidscontouren groter.	Brandbare gassen kunnen grote effectafstanden hebben in verband met explosie scenario's. De verwachting is dat de uiteindelijke risico's beperkt en beheersbaar zijn en dat op enkele mogelijke punten na er geen risicoplafonds uit het Basisnet overschreden zullen worden. Overschrijdingen zijn naar verwachting tijdelijk, tot het transport naar buisleidingen verschuift.	[P] Eventueel kunnen voor bepaalde routeringsvoorschriften opgesteld worden om drukke gebieden of bepaalde tunnels te mijden. Het is niet zeker dat dit een duurzame oplossing is.	Waterstof is op dit moment nog ingedeeld in een lage risico categorie. Op dit moment wordt onderzoek gedaan naar waterstof en in hoeverre de risico's en categorisering nog passend zijn.
Transport: water	Gezien de realistische ontwikkelingen worden hier geen consequenties voorzien als het om omgevingsveiligheid gaat. De veiligheidscontouren komen niet tot op de oevers.	Gelet op de reël te verwachten ontwikkelingen worden hier geen consequenties voorzien qua omgevingsveiligheid. De contouren komen niet tot op de oevers.	N.v.t.	
Transport: spoor	Grote stromen waterstof over het spoor lijken niet realistisch komende jaren (nu nog heel klein en economisch niet rendabel). Mocht er toch een aanzienlijke stroom waterstof bij komen zal dit het basisnet verder onder druk zetten. Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra knel- of aandachtspunten leiden.	De druk op het Basisnet spoor is al hoog en de risicoplafonds worden al regelmatig overschreden. Als hier een aanzienlijke stroom waterstof bij komt zal dit het Basisnet verder onder druk zetten. Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra knel- of aandachtspunten leiden.	Bij toenemende stromen zijn er op knelpunten mitigerende maatregelen nodig. Huidige in kaart gebrachte maatregelen zijn lastig uit te voeren. Dit heeft aandacht nodig.	

Maatschappelijke consequenties zijn beperkt tot enkele aandachtspunten, vooral de manier waarop het transport rond spoor geframed wordt.

Uitstoot en restproducten

Geen consequenties voor transport. Waterdamp als uitstoot i.p.v. uitlaatgassen indien waterstof ook vervoerd wordt door klimaat neutrale dragers.

* [P] Preventieve maatregelen
[M] Mitigerende maatregelen

Bijlage D.2: Keten pure Waterstof (vloeibaar) sterk gekoeld

Weinig tot geen aandachtspunten	Een aantal belangrijke aandachtspunten	Veel significante aandachtspunten
---------------------------------	--	-----------------------------------

De betekenis van aandachtspunt hier is dat een ketenonderdeel nader beschouwd moet worden in de praktijk op één of meerdere facetten. Aandachtspunt betekent **niet direct dat er significante of onoplosbare veiligheidsproblemen zullen optreden*

Ketenonderdeel	Veiligheid / ruimtelijke consequenties		Maatregelen *	Technische kenmerken
	In directe omgeving	In ruimere omgeving		
Productie (Koeling)	Voor de productie van vloeibare waterstof (koeling) zijn de risico's voor de omgeving hetzelfde als bij de productie van gasvormige waterstof. Het proces van koeling naar -253°C levert geen additioneel scenario voor het plaatsgebonden risico in de directe omgeving.	De ruimtelijke consequenties voor de omzetting op locatie zijn alleen lokaal en moeten inpasbaar zijn binnen de daar geldende beleidskaders voor externe of omgevingsveiligheid. Dit kan knelpunten opleveren op het moment dat de behoefte aan nieuwe locaties groot wordt. Dit is te allen tijde een lokale afweging in ruimtelijke plannen.	[P] Strikte bewaking van procescondities (voorkomen van 'boil-over').	Waterstof dient gekoeld te worden tot -253°C om het vloeibaar te maken
Conversie (verdampen)	Voor de conversie (verdampen) van vloeibare waterstof zijn de risico's voor de omgeving hetzelfde als bij de productie van gasvormige waterstof. Het verdampen naar gasvormige waterstof levert geen additioneel scenario voor het plaatsgebonden risico.	De ruimtelijke consequenties voor de omzetting op locatie zijn alleen lokaal en moeten inpasbaar zijn binnen de daar geldende beleidskaders voor externe of omgevingsveiligheid. Dit kan knelpunten opleveren op het moment dat de behoefte aan nieuwe locaties groot wordt. Dit is te allen tijde een lokale afweging in ruimtelijke plannen.	[P] Strikte bewaking van procescondities.	
Opslag: tank	De extreem lage temperatuur kan bij lekkage zowel installatieonderdelen als personen directe schade toebrengen. Waterstof als vloeistof geeft bij een externe brand additioneel de mogelijkheid dat bij instantaan falen van het opslagmedium een explosie kan optreden.	Bij opslag van waterstof is de veiligheidscontour groter dan bij traditionele brandstoffen. Daarnaast is er bij vloeibare waterstof het additionele risico van instantaan falen van de tank. Bij voorkeur wordt een aanzienlijke afstand gehouden tot de bebouwde omgeving.	[M] maatregelen zijn te voorzien in de techniek, opleiding, onderhoud en inspectie, dus hoofdzakelijk bij de bron.	Cryogene waterstofopslag is technisch complex maar realiseerbaar.
Verladen	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn medebepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij productie, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten. Bij kleine initiatieven is de rol die verlading speelt in het totaalbeeld voor de directe omgeving relatief groot.	De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Hoe groter de verladingseenheid wordt (tankauto vs. treinwagon vs. binnenvaartschip) hoe meer het zwaartepunt van het risico naar die verladingseenheid zal schuiven.	[P/M] Maatregelen worden direct geïntegreerd in de ontwikkeling van grootschalige projecten. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling. Er wordt aansluiting gezocht bij PGS 9. Deze is gericht op cryogene gassen maar is niet expliciet beschreven voor waterstof.	
Transport: buisleidingen	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	Niet mogelijk vanwege grote thermische verliezen.
Transport: weg	Momenteel niet ingeschaald als risicorelevante stof, maar dit kan wijzigen, omdat de categorisering in komende jaren tegen het licht wordt gehouden. Aanvullend risico vanwege explosie scenario. Wanneer benzine verdrongen wordt, betekent dit dat de berekende PR 10 ⁻⁶ contour kleiner kan worden. Bij risicovollere categorisering kan waterstof dominante risicofactor worden in modellen. Desondanks verwachten wij geen aandachtspunten in het kader van het Basisnet.	Deels zal verdringing van fossiele brandstoffen plaatsvinden, maar er bestaat ook een mogelijkheid van extra transporten. Afhankelijk van groei van transport van gevaarlijke stoffen en risico-inschaling van waterstof kan het in de toekomst tot knel- of aandachtspunten leiden. Verwachting is dat op lange termijn minder transport over de weg plaats vindt en meer naar buisleiding gaat. Mede daarom verwachten wij geen aandachtspunten in het kader van het Basisnet.	[P] Omrijden via andere wegen.	Wegtransport vermoedelijk vnl voor tankstation bevoorradend. Waterstof is ingedeeld in een mogelijk te lage risico categorie. Reële risico's dienen verder onderzocht te worden bij nieuwe categorisering
Transport: water	De omgevingsveiligheid voor zeeschepen blijkt niet heel beperkend, zolang transport naar havens gaat dichtbij de kust. Op dit moment mag cryogene waterstof niet vervoerd worden in ingebouwde scheepstanks conform het ADN, enkel als losse eenheden. Als dit gewijzigd moet worden, kost dit jaren. Ook bij een grote toename van transport van vloeibare waterstof zullen er waarschijnlijk geen knel- of aandachtspunten optreden.	De ruimtelijke impact zal zich in eerste instantie concentreren op zeehavens en vraagt om heldere veiligheidsregulering. Wanneer de binnenvaart in de toekomst vloeibare waterstof gaat vervoeren, kunnen er bij de waterwegen ook ruimtelijke consequenties zijn, maar naar verwachting alleen bij extreem grote hoeveelheden waterstof.	[P] Maatregelen zijn er met name in de navigatie te voorzien. Veilige doorvaart, het ontwijken van obstakels.	
Transport: spoor	In afgelopen jaren zijn de risicoplafonds voor een aantal plekken overschreden, waardoor hier al aandachtspunten bestaan. Deze lijken op dit moment niet groter of kleiner te worden bij de beperkte hoeveelheid waterstof die voorzien wordt. Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra knel- of aandachtspunten leiden.	In afgelopen jaren zijn de risicoplafonds voor een aantal plekken overschreden, waardoor hier al aandachtspunten bestaan. Deze lijken op dit moment niet groter of kleiner te worden bij de beperkte hoeveelheid waterstof die voorzien wordt. Afhankelijk van of transport van waterstof additioneel is of ter vervanging van bestaande stromen kan dit tot extra aandachtspunten leiden.	Verschiedende opties genoemd in Robuust Basisnet Spoor. Wanneer in 2023 in nieuwe prognoses grote ontwikkelingen voorzien worden, moet hier actief mee aan de slag gegaan worden.	

Maatschappelijke consequenties
afgezien van de negatieve framing, voorzien wij geen consequenties op dit moment.

Uitstoot en restproducten
*Er moet rekening gehouden worden met enige mate van verdamping van de stof zelf. De uitstoot (boil off) uit een tank is chemisch gezien niet al te verontreinigend, maar de zeer lage temperatuur kan fysieke en ecologische schade toebrengen aan met name de bodem en maaiveld.

De transitie heeft een positief effect als het tot vervanging leidt van meer milieubelastende stoffen.*

* [P] Preventieve maatregelen
[M] Mitigerende maatregelen

Bijlage D.3: Keten LOHC (Tolueen – Methylcyclohexaan)

Weinig tot geen
aandachtspunten

Een aantal belangrijke
aandachtspunten

Veel significante
aandachtspunten

De betekenis van aandachtspunt hier is dat een ketenonderdeel nader beschouwd moet worden in de praktijk op één of meerdere facetten. Aandachtspunt betekent **niet direct dat er significante of onoplosbare veiligheidsproblemen zullen optreden*

Ketenonderdeel	Veiligheid / ruimtelijke consequenties		Maatregelen *	Technische kenmerken
	In directe omgeving	In ruimere omgeving		
Productie (productie LOC)	De productie van tolueen is een standaard proces binnen de petrochemie. Op korte afstand van het productieproces is de veiligheid van tolueen bepalend voor de lokale, ruimtelijke consequenties. Tolueen is een zeer brandbare vloeistof met vooral effecten op korte afstand, waarbij de effecten doorgaans niet verder dan 30 meter merkbaar zullen zijn.	De productie van tolueen is een standaard proces binnen de petrochemie. Omdat dat meestal om een veel groter geheel gaat (raffinaderij), kunnen er effecten in de ruimere omgeving zijn, maar meestal niet vanwege tolueen. Explosies kunnen zich voordoen, maar effecten worden vooral op korte afstand voorzien.	[P/M] Voor de opslag van tolueen zijn de gebruikelijke voorschriften voor vloeibare brandstoffen van toepassing (met name PGS-29 en -31).	De verwachting is dat LOHC alleen voor grootschalig transport en op industriële locaties gebruikt zal worden en geïmporteerd wordt vanuit het buitenland. Deze kolom beschrijft de consequenties wanneer Tolueen in Nederland geproduceerd wordt.
Conversie (omzetting LOHC -> H ₂ & omzetting H ₂ -> LOHC)	Afhankelijk van de schaalgrootte is de veiligheid van waterstof en van tolueen/MCH bepalend voor de lokale, ruimtelijke consequenties. Tolueen en MCH zijn zeer brandbare vloeistoffen met vooral effecten op korte afstand.	Voor de aanwezige hoeveelheid waterstof bepaalt het aandachtsgebied en het risico. Ook het verdere proces (enkel binden of ontbinden, of ook opslag van de stof op locatie) bepaalt tot hoever de effecten kunnen reiken. De ruimtelijke consequenties zijn naar verwachting beperkt.	[P/M] Voor de opslag van tolueen zijn de gebruikelijke voorschriften voor vloeibare brandstoffen van toepassing (met name PGS-29 en -31).	
Opslag: tank	Bij opslag op industrieterreinen is er qua PR 10 ⁻⁶ geen knelpunt. Bij grote opslaghoeveelheden in de openbare ruimte is omgevingsveiligheid een relevant aandachtspunt waar steeds een lokale afweging gemaakt moet worden. Onafhankelijk van de schaal, is de omvang van de PR 10 ⁻⁶ is sterk afhankelijk van de opslag hoeveelheid. Indicatief kan worden aangegeven dat beide stoffen tussen benzine en diesel liggen.	Er is veel ervaring met de opslag van organische vloeistoffen. Bij juiste ontwerpkeuzes zijn er waarschijnlijk geen ruimtelijke knel- of aandachtspunten. Verder is het vergelijkbaar met veiligheid in de directe omgeving.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29, of -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen	Opslag is vergelijkbaar met opslag van andere organische vloeistoffen zoals methanol, benzine etc.
Verladen	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn mede bepalend voor het totale risico beeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij winning, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten.	De invloed van de verladingsseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Hoe groter de verladingsseenheid wordt (tankauto vs. treinwagon vs. binnenvaartschip) hoe meer het zwaartepunt van het risico naar die verladingsseenheid zal schuiven.	P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29, of -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen	
Transport: buisleidingen (alleen mogelijk bij Tolueen – MCH)	Voor de LOHC combinatie tolueen-MCH zijn twee buisleidingen nodig: een voor heen transport en een voor terug transport. Hierbij zijn veiligheidsafstanden nodig die relatief klein zijn (5 meter uit het hart van de buis). Bij nieuwe aanleg kan dit in zeldzame gevallen leiden tot specifieke lokale overwegingen.	Er zijn weinig knel- of aandachtspunten te voorzien op grotere afstanden voor een buisleiding met MCH of tolueen. Wel vraagt het altijd lokaal maatwerk.	[P/M] Men kan aansluiten bij bestaande preventieve en mitigerende maatregelen waaronder KLIC/Wion en markering van het traject.	Alleen geschikt voor Tolueen - MCH. Er zijn 2 leidingen nodig (aanvoer, retour). Grootschalig transport via buisleidingen lijkt geen aannemelijk scenario te zijn.
Transport: weg	Normen worden op dit moment niet tot nauwelijks overschreden en liggen in veel gevallen ver onder de referentiewaarde. Bij vervoer op grote schaal (onder andere vanwege dubbel transport) kan de toename wel aanzienlijk zijn. De stofeigenschappen hebben een beperkt effectgebied van maximaal 30 meter.	Het is niet te verwachten dat overschrijding van de referentiewaarden uit het Basisnet weg op korte termijn zal plaatsvinden, laat staan grootschalig. Overige ruimtelijke consequenties verwachten wij niet vanwege de beperkte effect afstanden van deze stoffen.	Maatregelen voor het transport over de weg zijn vastgelegd in het ADR. Voor wegvervoer is een relatief makkelijk te treffen maatregel het omrijden via andere wegen.	
Transport: water	Omgevingsveiligheid wordt niet als een probleem beschouwd. Het is een bekende stofgroep die al dagelijks op veel plaatsen aanwezig is. Dit transport past ruim binnen de referentiewaarden van het Basisnet water.	De ruimtelijke impact is gering. Het Basisnet water kent geen knel- of aandachtspunten en deze stoffen zorgen niet voor een verhoogde belasting op de ruimtelijke ordening.	Mitigerende maatregelen ten aanzien van deze stoffen zijn al in ruime mate vastgelegd in het ADN (in Nederland: VBG), en verder is de Binnenvaart-regelgeving ten dienste van de veiligheid.	Het vervoer over water van bepaalde LOHC's is een zeer realistische optie en voor andere LOHC's een mogelijke optie, met weinig veiligheidsknelpunten.
Transport: spoor	Extra (dubbel) vervoer van brandbare vloeistoffen heeft een negatieve invloed op het plaatsgebonden risico. Transport op grote schaal kan voor verdere overschrijdingen zorgen van de risicoplafonds in het basisnet spoor.	Brandbare vloeistoffen hebben een relatief beperkt ruimtelijk effect. Een grote toename van deze categorie zal daarom wel effecten hebben, maar waarschijnlijk vooral in de nabijheid.	In het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor zijn hier verschillende opties voor genoemd.	

Maatschappelijke consequenties

Het kan tot maatschappelijke vragen leiden waarom transport van gevaarlijke stoffen twee keer moeten plaatsvinden. Dit kan tot negatieve sentimenten leiden.

Maatschappelijke consequenties zijn er vooral wanneer de stoffen vrijkomen door lekkages. Denk aan stank en geurhinder, of als er een serieus ongeval zou plaatsvinden zware brand- en rook-risico's en lokale verontreinigingen.

Uitstoot en restproducten

Voor deze keten is ook een LOC nodig die teruggevoerd moet worden naar de productielocatie. Hierdoor ontstaat een dubbele transportroute met een gevaarlijke stof.

Het vrijkomen van LOC of LOHC in de open lucht is ongezond en ongewenst. Het vrijkomen door lekkage naar de bodem geeft milieuvervuiling en ecologische schade, maar geen acuut risico voor de mens.

* [P] Preventieve maatregelen
[M] Mitigerende maatregelen

Bijlage D.4: Keten LOHC (DBT-PDBT)

Weinig tot geen
aandachtspunten

Een aantal belangrijke
aandachtspunten

Veel significante
aandachtspunten

De betekenis van aandachtspunt hier is dat een ketenonderdeel nader beschouwd moet worden in de praktijk op één of meerdere facetten. Aandachtspunt betekent **niet direct dat er significante of onoplosbare veiligheidsproblemen zullen optreden*

Ketenonderdeel	Veiligheid / ruimtelijke consequenties		Maatregelen *	Technische kenmerken
	In directe omgeving	In ruimere omgeving		
Productie (productie LOC)	De aandacht gaat niet zozeer uit naar de LOHC zelf. Een stof die in deze keten de veiligheid bepaalt is de benodigde grondstof chloor. Bij grootschalige productie van DBT is tegelijk op grote schaal chloor nodig om het tussenproduct benzylchloride te maken. Een opslageenheid voor chloor heeft directe invloed op de veiligheid en op de mogelijkheden in de ruimtelijke ordening.	Zelfde als overweging als bij veiligheid in directe omgeving. Bij grootschalige productie van DBT is tegelijk op grote schaal chloor nodig om het tussenproduct benzylchloride te maken. Een opslageenheid voor chloor heeft directe invloed op de veiligheid en op de mogelijkheden in de ruimtelijke ordening, met grote effectafstanden.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29, of -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen. [P] Het is het overwegen waard om andere syntheseroutes naar DBT te ontwikkelen, waarbij chloor niet langer de grondstof hoeft te zijn.	Om DBT te maken is chloor nodig. Wanneer DBT in het buitenland gemaakt wordt en dan geïmporteerd levert dat geen grote risico's op, maar wanneer DBT in Nederland gemaakt wordt, is op een bepaald moment chloor nodig dat getransporteerd moet worden. In het eerste geval is daarom de kleur groen. Bij productie in Nederland is de kleur oranje.
Conversie omzetting LOHC -> H ₂ & omzetting H ₂ -> LOHC	De stoffen DPT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. Ze overstijgen niet het effectgebied van waterstof. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, hetgeen voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (door langzamere verspreiding en mogelijk minder groot effectgebied).	Voor de aanwezige hoeveelheid waterstof bepaalt het aandachtsgebied en het risico. De stoffen DPT en PDBT brengen geen opvallende, naar de wijde omgeving reikende effecten mee. De stoffen zijn hoger visceus dan toluen en MCH, hetgeen voor de verspreiding bij incidenten een gunstig aspect is (door langzamere verspreiding en mogelijk minder groot effectgebied).	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29, of -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen	
Opslag: tank	Bij opslag op industrieterreinen is er qua geen knelpunt ten aanzien van de wettelijke normen.	Er is veel ervaring met de opslag van organische vloeistoffen. Bij welbewuste ontwerpkeuzes zijn er waarschijnlijk geen ruimtelijke knel- of aandachtspunten. Mocht men grote opslageenheden in de openbare ruimte nastreven, dan is dit een aandachtspunt waar steeds een lokale afweging gemaakt moet worden.	[P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29, of -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen	Opslag is vergelijkbaar met opslag van andere organische vloeistoffen zoals methanol, benzine etc.
Verladen	De faalkansen van verladingsinstallaties zijn mede bepalend voor het totale risicobeeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij winning, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten.	De invloed van de verladingsseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Hoe groter de verladingsseenheid wordt (tankauto vs. treinwagon vs. binnenvaartschip) hoe meer het zwaartepunt van het risico naar die verladingsseenheid zal schuiven.	P/M] Voor de opslag van vloeibare stoffen zijn toegesneden PGS'en beschikbaar. Al naar gelang de wijze van opslag, kan men met name PGS-29, of -31 erbij nemen als houvast voor adequate preventieve en mitigerende maatregelen	
Transport: buisleidingen	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	Voor PDBT-DBT is een buisleiding niet realistisch. PDBT is nogal visceus en kan bij lage temperaturen gaan klonteren.
Transport: weg	Normen worden op dit moment niet tot nauwelijks overschreden en liggen in veel gevallen ver onder de referentiewaarde. Bij vervoer op grote schaal (onder andere vanwege dubbel transport) kan de toename wel aanzienlijk zijn. De stoffeigenschappen zijn niet dermate dat het tot hele grote zorgen leidt. Visceuzer dan Toluene-MCH wat voor de verspreiding bij een incident een gunstig aspect is (langzamere verspreiding). Wanneer DBT productie om chloor transport vraagt levert dit aanzienlijke risico's op.	Aanvullend op risico's in de directe omgeving moet gesteld worden dat chloor zeer toxisch is en tot op grote afstand van het transport grote effecten kan hebben. Dit levert veel potentiële problemen op, zowel beleidsmatig vanwege de gevoeligheid van chloor als qua risico's.	Voor de LOHC geen voor de hand liggende mitigerende maatregelen op dit moment. [P] Import van DBT of productie van chloor op locatie van het gebruik van DBT.	Chloor is alleen nodig als productie van de LOC in eigen land plaats vindt. Verwachting is dat LO(H)C op grote schaal geïmporteerd wordt van buiten de landsgrenzen. In dat geval is de kleur gele. Bij productie in Nederland is de kleur oranje vanwege het chloor transport.
Transport: water	Wanneer deze vorm opkomt zal dat niet tot problemen leiden binnen het Basinet water. Wel neemt de kans op een ongeval bij meer transporten toe, maar de mogelijke effecten zijn klein van deze stoffen. Dit zal niet tot problemen leiden ten aanzien van de referentiewaarden van het Basinet water.	Gezien de relatief kleine effectafstanden van de stof zien wij hier geen grote risico's in. Dit zal niet tot problemen leiden ten aanzien van de referentiewaarden van het Basinet water.	[P/M] maatregelen ten aanzien van deze stoffen zijn al in ruime mate vastgelegd in het ADN (in Nederland: VBG), en verder is de Binnenvaart-regelgeving ten dienste van de veiligheid. [P] Import van DBT of productie van chloor op locatie van het gebruik van DBT	Chloor is alleen nodig als productie van de LOC in eigen land plaats vindt. Verwachting is dat LO(H)C op grote schaal geïmporteerd wordt van buiten de landsgrenzen.
Transport: spoor	Extra (dubbel) vervoer van brandbare vloeistoffen heeft een negatieve invloed op het plaatsgebonden risico. Transport op grote schaal kan voor verdere overschrijdingen zorgen van de risicoflonds in het basinet spoor. Visceuzer dan Toluene-MCH wat voor de verspreiding bij een incident een gunstig aspect is (langzamere verspreiding). Wanneer DBT productie om chloor transport vraagt levert dit aanzienlijke risico's op. Chloor past moeilijk binnen de referentiewaarden van Basinet spoor	Aanvullend op risico's in de directe omgeving moet gesteld worden dat chloor zeer toxisch is en tot op grote afstand (meerdere kilometers) van het transport grote effecten kan hebben. Dit levert veel potentiële problemen op, zowel beleidsmatig vanwege de gevoeligheid van chloor als qua risico's. Chloor past niet tot nauwelijks binnen de referentiewaarden van het Basinet spoor	Voor de LOHC geen voor de hand liggende mitigerende maatregelen op dit moment. [P] Import van DBT of productie van chloor op locatie van het gebruik van DBT. [P/M] Voor het transport over het spoor kan aangesloten worden bij het speciale spoorregime voor chloortransport.	Chloor is alleen nodig als productie van de LOC in eigen land plaats vindt. Verwachting is dat LO(H)C op grote schaal geïmporteerd wordt van buiten de landsgrenzen.

Maatschappelijke consequenties

De (namen van de) stoffen lijken onbekend in de media. Er is op voorhand geen maatschappelijke onrust te verwachten. Niet de LOHC, maar de grondstof chloor kan tot maatschappelijke ophef leiden wanneer dit in Nederland geproduceerd wordt.

Uitstoot en restproducten

Er kunnen bijproducten in de productieprocessen van de LOC ontstaan, zoals benzylchloride en benzyltoluene.

Bij lekkage van DBT of PDBT zal bodemverontreiniging kunnen optreden. De stoffen verdampen langzaam en zullen daarom langer in de grond achterblijven.

Bij lekkage op een schip zal de stof verdunnen in het water en een lokale verontreiniging veroorzaken.

* [P] Preventieve maatregelen
[M] Mitigerende maatregelen

rouwelijk

Bijlage D.5: Keten Ammoniak (Onder druk vloeibaar gemaakt)

Weinig tot geen
aandachtspunten

Een aantal belangrijke
aandachtspunten

Veel significante
aandachtspunten

De betekenis van aandachtspunt hier is dat een ketenonderdeel nader beschouwd moet worden in de praktijk op één of meerdere facetten. Aandachtspunt betekent **niet direct dat er significante of onoplosbare veiligheidsproblemen zullen optreden*

Ketenonderdeel	Veiligheid / ruimtelijke consequenties		Maatregelen *	Technische kenmerken
	In directe omgeving	In ruimere omgeving		
Productie groene ammoniak	Bij bestaande industriële locaties naar verwachting inpasbaar in bestaande veiligheidsnormen. Voor nieuwe locaties zijn veiligheidscontouren van opslag van ammoniak en productie van waterstof bepalend. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risicobron voor de directe omgeving gelden.	Grote impact op externe veiligheid vanwege de toxische aspecten van ammoniak en een groot potentieel effectgebied. De effectafstand kan enkele kilometers beslaan, afhankelijk van de hoeveelheid stof, temperatuur en/of druk.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	Productie uit waterstof en stikstof via preheater en reactor (drukvat).
Conversie (naar waterstof)	Bij bestaande industriële locaties naar verwachting inpasbaar in bestaande veiligheidsnormen. Voor nieuwe locaties zijn veiligheidscontouren van opslag van ammoniak en productie van waterstof bepalend. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risicobron voor de directe omgeving gelden.	Grote impact op externe veiligheid vanwege de toxische aspecten van ammoniak en een groot potentieel effectgebied. De effectafstand kan enkele kilometers beslaan, afhankelijk van de hoeveelheid stof, temperatuur en/of druk.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	
Opslag: tank	Bij bestaande industriële locaties naar verwachting inpasbaar in bestaande veiligheidsnormen. Voor nieuwe locaties zijn veiligheidscontouren van opslag van ammoniak en productie van waterstof bepalend. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risicobron voor de directe omgeving gelden.	Grote impact op externe veiligheid vanwege de toxische aspecten van ammoniak en een groot potentieel effectgebied. De effectafstand kan enkele kilometers beslaan, afhankelijk van de hoeveelheid stof, temperatuur en/of druk.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	Onder druk: 7-10 bar. In de productie en conversie activiteiten zijn altijd opslagvoorzieningen noodzakelijk om de ammoniak tijdelijk op te slaan. De hieraan verbonden risico aspecten zijn daarom vergelijkbaar.
Verlading	De faalkansen van verladinginstallaties zijn mede bepalend voor het totale risicobebeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden met de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij winning, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten.	De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruimte omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Hoe groter de verladingseenheid wordt (tankauto vs. treinwagon vs. binnenvaartschip) hoe meer het zwaartepunt van het risico naar die verladingseenheid zal schuiven.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	
Transport: buisleidingen	Veiligheidsnormen vereisen een strookbreedte van 70 meter. Bovendien moeten veiligheidscontouren binnen die strookbreedte blijven, dat lijkt bij ammoniak en de hoeveelheden die door buisleidingen gaan niet haalbaar. Ontwikkeling van nieuwe buisleidingen zal waarschijnlijk tot aandachtspunten leiden bij het inpassen in de omgeving.	De kans op incidenten is zeer klein, maar een incident heeft een relatief groot effectgebied van enkele kilometers. Ontwikkeling van nieuwe buisleidingen zal waarschijnlijk tot aandachtspunten leiden bij het inpassen in de omgeving.	[P/M] In de PGS 12 zijn voor het veilig bedrijven van een installatie en transport voorziening de nodige mitigerende maatregelen aangegeven. Met die maatregelen wordt aan de stand der techniek voldaan. Verdergaande maatregelen zijn op dit moment niet bekend	
Transport: weg	In veel gevallen worden referentiewaarden van het Basisnet weg niet of nauwelijks overschreden. Het kan dan zijn dat de PR contour groter wordt op enkele plekken, maar zelden groter dan de afgesproken waarden uit het Basisnet weg.	Effecten zijn vergelijkbaar met veiligheid in de directe omgeving. Er zijn geen ruimtelijke consequenties voorzien zolang geen grote knelpunten t.a.v. Basisnet weg ontstaan.	[M] Deze zijn op dit moment niet van toepassing of nodig. Voor wegvervoer is een relatief makkelijke maatregel omrijden via andere wegen. [P/M] Verder gelden de voorwaarden uit het ADR voor dit type transport.	Door kleine transporthoeveelheden minder geschikt voor grote stromen.
Transport: water	Gezien de overwegingen (mogelijke verdubbeling van het ammoniak transport) zien wij dat dit een vergroting betekent voor de risico's in de directe omgeving. De referentiewaarden voor ammoniak worden in het Basisnet echter niet overschreden en het is ook niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een verdubbeling van dit transport, omdat de referentiewaarden uit het Basisnet water hoog zijn.	Er is een lage kans op een ongeval maar met een groot effect. De effectafstanden kunnen tot meerdere kilometers reiken. De referentiewaarden voor deze stofcategorie (GT3) worden in het Basisnet water echter niet overschreden en het is ook niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een verdubbeling van dit transport.	[M] Aansluiten bij bestaande mitigerende maatregelen. Een bijzondere maatregel, die in noodgevallen wel voor ammoniak en niet voor de meeste andere stoffen geldt, is het benutten van de goede oplosbaarheid van ammoniak in water. Het toxische risico voor de omgeving kan sterk worden verminderd door in geval van nood ammoniak direct op of onder water te lozen.	
Transport: spoor	Referentiewaarden van het Basisnet spoor worden op dit moment op meerdere plekken vrij structureel overschreden. In het Basisnet spoor staan nu bijvoorbeeld relatief lage referentiewaarden ingevuld voor categorie B2. Effecten van ammoniak zijn op grote afstand merkbaar en zijn daarom niet alleen lokaal.	Wanneer een aanzienlijke stroom op gang komt bovenop huidige stromen van gevaarlijke stoffen, dan zal dit op meerdere routes tot extra of nieuwe overschrijdingen van de risicoplafonds kunnen leiden. Het toxische effectgebied is groot (ordegrootte één tot anderhalve kilometer).	Er worden mitigerende opties genoemd in het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor, maar deze zijn lastig uitvoerbaar. Bij voorzie groei van toekomstige stromen is het raadzaam tijdig actie te ondernemen.	

Maatschappelijke consequenties

Afgezien van de negatieve publieke opinie door de negatieve framing, voorzien wij geen aandachtspunten op dit moment. Aanleg van nieuwe buisleidingen kan leiden tot NIMBY acties vanwege grote effectafstanden.

Uitstoot en restproducten

Er is een positief effect op het klimaat wanneer groene ammoniak tot vervanging van fossiele brandstoffen leidt.

Ammoniak is één van de kernstoffen die de 'stikstofproblematiek' veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.

Water: Wanneer ammoniak als brandstof wordt ingezet in de binnenvaart zal NOx vrijkomen en zullen de emissies van de schepen als additionele emissie worden gezien.

* [P] Preventieve maatregelen
[M] Mitigerende maatregelen

Bijlage D.6: Keten Ammoniak (Gekoeld vloeibaar gemaakt)

Weinig tot geen
aandachtspunten

Een aantal belangrijke
aandachtspunten

Veel significante
aandachtspunten

De betekenis van aandachtspunt hier is dat een ketenonderdeel nader beschouwd moet worden in de praktijk op één of meerdere facetten. Aandachtspunt betekent **niet direct dat er significante of onoplosbare veiligheidsproblemen zullen optreden*

Ketenonderdeel	Veiligheid / ruimtelijke consequenties		Maatregelen *	
	In directe omgeving	In ruimere omgeving	Technische kenmerken	
Productie groene ammoniak	Bij bestaande industriële locaties naar verwachting inpasbaar in bestaande veiligheidsnormen. Voor nieuwe locaties zijn de veiligheidscontouren van opslag van ammoniak en productie van waterstof bepalend. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risico voor de directe omgeving gelden.	Grote impact op externe veiligheid vanwege de toxische aspecten van ammoniak en een groot potentieel effectgebied. De effectafstand kan enkele kilometers beslaan, afhankelijk van de hoeveelheid stof, temperatuur en/ of druk.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	
Conversie (naar waterstof)	Bij bestaande industriële locaties naar verwachting inpasbaar in bestaande veiligheidsnormen. Voor nieuwe locaties zijn de veiligheidscontouren van opslag van ammoniak en productie van waterstof bepalend. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risico voor de directe omgeving gelden. Bij de conversie komt stikstof vrij dat bij een calamiteit in de directe omgeving verstikkend is voor de medewerkers.	Grote impact op externe veiligheid vanwege de toxische aspecten van ammoniak en een groot potentieel effectgebied. De effectafstand kan enkele kilometers beslaan, afhankelijk van de hoeveelheid stof, temperatuur en/ of druk.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	
Opslag: tank	Bij bestaande industriële locaties naar verwachting inpasbaar in bestaande veiligheidsnormen. Voor nieuwe locaties zijn de veiligheidscontouren van opslag van ammoniak en productie van waterstof bepalend. Afhankelijk van de situering op het terrein zal ammoniak of waterstof als primaire risico voor de directe omgeving gelden.	Grote impact op externe veiligheid vanwege de toxische aspecten van ammoniak en een groot potentieel effectgebied. De effectafstand kan enkele kilometers beslaan, afhankelijk van de hoeveelheid stof, temperatuur en/ of druk.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	Koelen: ~ -33°C.
Verlading	De faalkansen van verladinginstallaties zijn mede bepalend voor het totale risico beeld. Ze zijn onlosmakelijk verbonden aan de bedrijfsactiviteiten zoals beschreven bij winning, conversie en opslag. De ruimtelijke consequenties zijn daarmee ook vergelijkbaar met de daar beschreven aspecten.	De invloed van de verladingseenheid op de veiligheid in de ruime omgeving is afhankelijk van de schaalgrootte van de verschillende onderdelen van de keten. Hoe groter de verladingseenheid wordt (tankauto vs. treinwagon vs. binnenvaartschip) hoe meer het zwaartepunt van het risico naar die verladingseenheid zal schuiven.	[P/M] Veiligheidsnormen worden bij ontwerp van nieuwe projecten meegenomen aan de hand van onder andere PGS12. Vereist in normen en richtlijnen en als onderdeel van HAZOP studie en CE beoordeling.	
Transport: buisleidingen	Wij sluiten deze optie uit bij lange leidingen. Voor korte leidingen binnen fabrieken of tussen nabijgelegen fabrieken dan wel havens en/ of opslagterminals is dit wel een realistische optie. Vanwege de koude fase van ammoniak kan dit specifieke lokale incidenttypen hebben door bevriezingschade aan objecten en mensen (arbeidsveiligheid), maar is vooral risicovol vanwege het snel verdampende ammoniak en de toxiciteit ervan.	Een grote lekkage zal (langzame, maar gestage) verspreiding veroorzaken naar een steeds grotere omgeving, die uiteindelijk tot meer dan een kilometer kan reiken. Vooral bij late ontdekking van een dergelijk lek zijn ernstige toxische effecten in de wijde omgeving mogelijk.	[P/M] Maatregelen zijn o.a. het technisch perfectioneren van de koelings-omstandigheden en het opstellen van calamiteitenplannen.	Voor het transport over langere afstanden van sterk gekoeld ammoniak is het gebruik van buisleidingen nu niet aan de orde en zal men het ook in de toekomst onrealistisch achten.
Transport: weg	Op dit moment is gekoeld transport over de weg niet toegestaan en is het niet de verwachting dat dit verandert. Indien dat wel zou veranderen zullen in veel gevallen referentiewaarden niet of nauwelijks worden overschreden. Het kan dan zijn dat veiligheidscontouren groter worden op enkele plekken, maar zelden groter dan de afgesproken waarden uit het Basisnet weg.	Op dit moment is gekoeld transport over de weg niet toegestaan en is het niet de verwachting dat dit verandert. Indien dat wel zou veranderen zal, vergelijkbaar met ammoniak transport onder druk, de invloed op het Basisnet weg beperkt zijn en niet of nauwelijks tot overschrijding van referentiewaarden te leiden.	[P] Wanneer het huidige verbod zou worden opgeheven is een pakket maatregelen denkbaar zoals: inspecties, verkeersbegeleiding, opleiding en daarnaast een landelijk calamiteitenplan voor gekoelde ammoniak.	Gekoeld transport van ammoniak is niet toegestaan in het ADR en is het niet te verwachten dat dit op middellange termijn verandert. Als dat toch gebeurt is het niet te voorspellen wat dit met de logistiek doet. Gekoeld transport heeft extra maar onwaarschijnlijk scenario om mee rekening te houden, namelijk explosie of grote brand.
Transport: water	De referentiewaarden voor ammoniak worden in het Basisnet niet overschreden en het is ook niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een verdubbeling van dit transport, omdat de referentiewaarden uit het Basisnet water hoog zijn. Voor gekoelde ammoniak komt er nog extra risico bij op het punt van arbeidsveiligheid.	Mocht dit transport tot ontwikkeling komen dan is er veel ruimte binnen het Basisnet water. De effectafstanden kunnen tot meerdere kilometers reiken. De referentiewaarden voor deze stofcategorie (GT3) worden in het Basisnet water echter niet overschreden en het is niet de verwachting dat dit het geval zal zijn bij een ruimte vergroting of verdubbeling van dit transport.	[M] Aansluiten bij bestaande maatregelen. In noodgevallen kan het toxische risico sterk worden verminderd bij lozen van ammoniak direct op of onder water	Op dit moment vindt dit transport in de praktijk nog niet plaats.
Transport: spoor	Op dit moment is gekoeld transport over het spoor niet toegestaan en is het niet de verwachting dat dit verandert. Indien dat wel zou veranderen zal bij grote groei of verdubbeling van transport dit een extra negatieve ontwikkeling hebben op de ruimte binnen het Basisnet spoor. Scenario brand of explosie is ook mogelijk, maar niet plausibel. Dominante scenario's zijn toxisch van aard.	Op dit moment is gekoeld transport over het spoor niet toegestaan en is het niet de verwachting dat dit verandert. Indien dat wel zou veranderen zal bij grote groei of verdubbeling van transport dit een extra negatieve ontwikkeling hebben op de ruimte binnen het Basisnet spoor. Scenario brand of explosie is ook mogelijk, maar niet plausibel. Dominante scenario's zijn toxisch van aard.	Er worden mitigerende opties genoemd in het onderzoek naar een Robuust Basisnet Spoor, maar deze zijn lastig uitvoerbaar. Bij voorziene groei van toekomstige stromen is het raadzaam tijdig actie te ondernemen.	Gekoeld transport van ammoniak is niet toegestaan in het RID en is het niet te verwachten dat dit op middellange termijn verandert. Als dat toch gebeurt is het niet te voorspellen wat dit met de logistiek doet. Gekoeld transport heeft extra (onwaarschijnlijk) scenario, namelijk explosie of grote brand.

Maatschappelijke consequenties
afgezien van de negatieve publieke opinie door de negatieve framing van dit transport, voorzien wij geen aandachtspunten op dit moment.

Uitstoot en restproducten
Er is een positief effect op het klimaat wanneer groene ammoniak tot vervanging van fossiele brandstoffen leidt.

Ammoniak is één van de kernstoffen die de 'stikstofproblematiek' veroorzaken. Lekkage of verspilling kan hier een bijdrage aan leveren.

Water: Wanneer ammoniak als brandstof wordt ingezet in de binnenvaart zal NOx vrijkomen en zullen de emissies van de schepen als additionele emissie worden gezien.

* [P] Preventieve maatregelen
[M] Mitigerende maatregelen

rouwelijk

Bijlage E: Overzicht mogelijke preventieve en mitigerende maatregelen

Maatregelen ammoniak transport weg

Maatregel (kans beperkend)	Werking van de maatregel
Wegnemen van de risicobron	Het wegnemen van de risicobron neemt de kans op het scenario weg.
Begrenzen van de doorzet	Minder vervoersbewegingen betekent een vermindering van het aantal keer dat het scenario zich voor kan doen en dus neemt de kans op het scenario af.

Maatregel (effect beperkend)	Werking van de maatregel
Afstand houden tot activiteit met gevaarlijke stoffen	Dicht bij de plaats van het scenario zijn de effecten het meest merkbaar. De hittestraling neemt af naarmate de afstand toeneemt.
Verdeling typen gebouwen	Door rekening te houden met het type bebouwing kan het aantal mogelijke slachtoffers bij het scenario worden beperkt. Dat kan bijvoorbeeld door het zodanig verdelen van gebouwen in een gebied dat de meer kwetsbare gebouwen worden beschermd door minder kwetsbare gebouwen.
Venstertijden	Door gebruik te maken van venstertijden voor het verladen worden de risicovolle en kwetsbare activiteiten gescheiden.
Obstakels toevoegen	Er kan geprobeerd worden om met obstakels de verspreiding van een gifwolk te vertragen of zodanig turbulentie te creëren dat de gifwolk mengt met de omringende lucht.
Rekening houden met windrichting	De overheersende windrichting in Nederland is uit het zuidwesten. Door kwetsbare functies niet in de overheersende windrichting vanaf de risicobron te plaatsen, kunnen slachtoffer mogelijk voorkomen worden.

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)	Werking van de maatregel
Duidelijke vluchtroutes aanbrengen	Door duidelijke vluchtroutes aan te brengen kunnen mensen het gebied gemakkelijker verlaten.
Risicocommunicatie	Door te communiceren over de mogelijke scenario's in een gebied het bete handelingsperspectief worden mensen zich meer bewust van wat ze moeten doen bij het scenario.
Onderhouden schuilplaatsen en vluchtwegen	Onderhoud van schuilplaatsen en vluchtwegen is belangrijk, zodat ten alle tijden van een ongeval de schuil- en vluchtmogelijkheden bereikbaar en inzetbaar zijn.
De (bedrijfs)noodplannen oefenen op een gifwolk	Door te oefenen met het gifwolkscenario in de (bedrijfs)noodplannen weten de werknemers wat ze moeten doen in het geval van een echte calamiteit.

Maatregel (bevorderen hulpverlening)	Werking van de maatregel
Werkende communicatiemiddelen	Tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen vindt veel van de communicatie plaats via radio, internet en telefoon. Het is hierbij van belang dat zendmasten op afstand van de activiteiten met gevaarlijke stoffen staan, zodat deze ook tijdens een ongeval werken.
Waarschuwingsmiddelen	Voor een snelle en effectieve waarschuwing tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen is het van belang dat een waarschuwingssysteem de mensen in het effectgebied kan bereiken.
Afstemming hulpdiensten	Het handelingsperspectief dat aan mensen wordt geboden ten tijden van een ongeval met gevaarlijke stoffen moet worden afgestemd met de inzet van hulpdiensten, zodat de inzet van de hulpdiensten kan aansluiten bij dit handelingsperspectief.

Maatregelen waterstof transport weg (tubetrailer)

Maatregel (kans beperkend)
Wegnemen van de risicobron Begrenzen van de doorzet Geïsoleerde opstelplaats voor de tankwagen, met aanrijdbeveiliging Opstelplaats op een (wegrij)strook met een toegestane snelheid van maximaal 70km/u

Maatregel (effect en gevolg beperkend)
Planologisch Ontwerptechnisch Constructietechnisch Installatietechnisch

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)
(nood)uitgangen en vluchtroutes die van de risicobron af zijn gericht In (bedrijfs)noodplannen het explosie scenario opnemen Verzamelpaatsen bepalen en geschikt maken voor een explosie De (bedrijfs)noodplannen oefenen op een explosie

Maatregel (bevorderen hulpverlening)
Middelen om de hulpdiensten snel te kunnen alarmeren Bereikbaarheid over twee verschillende routes vanuit tegengestelde windstreken Openbare bluswatervoorzieningen primair en secundair Dekkend systeem om aanwezigen in het effectgebied te waarschuwen

Maatregelen ammoniak transport spoor

Maatregel (kans beperkend)	Werking van de maatregel
Wegnemen van de risicobron	Het wegnemen van de risicobron neemt de kans op het scenario weg.
Begrenzen van de doorzet	Minder vervoersbewegingen betekent een vermindering van het aantal keer dat het scenario zich voor kan doen en dus neemt de kans op het scenario af.
Maatregel (effect beperkend)	Werking van de maatregel
Afstand houden tot activiteit met gevaarlijke stoffen	Dicht bij de plaats van het scenario zijn de effecten het meest merkbaar. De hittestraling neemt af naarmate de afstand toeneemt.
Verdeling typen gebouwen	Door rekening te houden met het type bebouwing kan het aantal mogelijke slachtoffers bij het scenario worden beperkt. Dat kan bijvoorbeeld door het zodanig verdelen van gebouwen in een gebied dat de meer kwetsbare gebouwen worden beschermd door minder kwetsbare gebouwen.
Venstertijden	Door gebruik te maken van venstertijden voor het verladen worden de risicovolle en kwetsbare activiteiten gescheiden.
Obstakels toevoegen	Er kan geprobeerd worden om met obstakels de verspreiding van een gifwolk te vertragen of zodanig turbulentie te creëren dat de gifwolk mengt met de omringende lucht.
Rekening houden met windrichting	De overheersende windrichting in Nederland is uit het zuidwesten. Door kwetsbare functies niet in de overheersende windrichting vanaf de risicobron te plaatsen, kunnen slachtoffer mogelijk voorkomen worden.

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)	Werking van de maatregel
Duidelijke vluchtroutes aanbrengen	Door duidelijke vluchtroutes aan te brengen kunnen mensen het gebied gemakkelijker verlaten.
Risicocommunicatie	Door te communiceren over de mogelijke scenario's in een gebied het bete handelingsperspectief worden mensen zich meer bewust van wat ze moeten doen bij het scenario.
Onderhouden schuilplaatsen en vluchtwegen	Onderhoud van schuilplaatsen en vluchtwegen is belangrijk, zodat ten alle tijden van een ongeval de schuil- en vluchtmogelijkheden bereikbaar en inzetbaar zijn.
De (bedrijfs)noodplannen oefenen op een gifwolk	Door te oefenen met het gifwolkscenario in de (bedrijfs)noodplannen weten de werknemers wat ze moeten doen in het geval van een echte calamiteit.

Maatregel (bevorderen hulpverlening)	Werking van de maatregel
Werkende communicatiemiddelen	Tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen vindt veel van de communicatie plaatst via radio, internet en telefoon. Het is hierbij van belang dat zendmasten op afstand van de activiteiten met gevaarlijke stoffen staan, zodat deze ook tijdens een ongeval werken.

Maatregel (bevorderen hulpverlening)	Werking van de maatregel
Waarschuwingsmiddelen	Voor een snelle en effectieve waarschuwing tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen is het van belang dat een waarschuwingssysteem de mensen in het effectgebied kan bereiken.
Afstemming hulpdiensten	Het handelingsperspectief dat aan mensen wordt geboden ten tijden van een ongeval met gevaarlijke stoffen moet worden afgestemd met de inzet van hulpdiensten, zodat de inzet van de hulpdiensten kan aansluiten bij dit handelingsperspectief.

Maatregelen waterstof transport spoor

Deze zijn niet uitgesplitst bij het scenariohandboek externe veiligheid. Hieronder staan maatregelen opgenoemd ter vergelijking bij het scenario gaswolk explosie bij LPG (niet dat dit gelijk is aan het scenario waterstof).

Maatregel (kans)	Werking van de maatregel
Wegnemen van de risicobron	Het wegnemen van de risicobron neemt de kans op het scenario weg.
Begrenzen van de doorzet	Minder vervoersbewegingen betekent een vermindering van het aantal keer dat het scenario zich voor kan doen en dus neemt de kans op het scenario af.

Maatregel (effect)	Werking van de maatregel
Afstand houden tot activiteit met gevaarlijke stoffen	Dicht bij de plaats van het scenario zijn de effecten het meest merkbaar. De warmtestraling neemt af naarmate de afstand toeneemt.
Verdeling typen gebouwen	Door rekening te houden met het type bebouwing kan het aantal mogelijke slachtoffers bij het scenario worden beperkt. Dat kan bijvoorbeeld door het zodanig verdelen van gebouwen in een gebied dat de meer kwetsbare gebouwen worden beschermd door minder kwetsbare gebouwen.
Venstertijden	Door gebruik te maken van venstertijden worden de risicovolle en kwetsbare activiteiten gescheiden.
Bouwwerken als afscherming	Ook door middel van bouwwerken, zoals gebouwen of tunnels, kan schaduwwerking gerealiseerd worden. Een gebouw tussen de activiteit met gevaarlijke stoffen en kwetsbare objecten/vluchtroutes kan dienen als afscherming. Eerstelijns bebouwing kan een deel van de kracht van de explosie breken.
Objecten loodrecht op de bron plaatsen	Door objecten loodrecht op de risicobron te plaatsen, met de kortste zijde aan de kant van de risicobron, wordt het grootste deel van de gevels beschermd tegen de frontale effecten van een drukgolf.
Obstakelvrije ruimte tussen bron en bebouwing	Een obstakelvrije ruimte tussen de risicobron en de risico-ontvanger beperkt rondvliegend puin bij een explosie.

Maatregel (effect)	Werking van de maatregel
Toepassen van brandwerend metselwerk	De keuze van het metselwerk bepaalt de brandwerendheid van de gevel.
Gebruik maken van minerale wolisolatie	Minerale wolisolatie is onbrandbaar.
Toepassen van brand- en hittewerende beglazing	Brand- en hittewerende beglazing bestaat uit gelaagd glas, samengesteld uit twee of meer lagen blank floatglas en één of meer speciale opschuimende tussenlagen. In geval van brand vormen deze tussenlagen een beschermend schild.
Toepassen van explosiewerend glas	Explosiewerende gelaagde veiligheidsbeglazingen blijven op hun plaats in de sponning na een schokgolf als gevolg van een explosie van buitenaf.
Gebruik maken van houten en stalen kozijnen	Houten en stalen kozijnen zijn getest voor een brandwerende toepassing. Kunststof kozijnen (zonder stalen vulling) zijn niet brandwerend.
Scherfwerking beperken	Materialen gebruiken die mensen beschermen tegen scherfwerking, zoals daktegels ipv grind.
Dikke gevel	Een dikkere gevel kan bescherming bieden tegen een explosie. Het bedekken van de muur met cortenstaal kan een gevel ook explosiebestendig maken.
Stevige wanden	Wanden voorzien van blastproof wallpaper kunnen het risico op verwondingen door rondvliegend puin beperken.
Toepassen van een gesprinkelde buitengevel	Bij een gesprinkelde buitengevel wordt water automatisch over de gevel gespoten in geval van een calamiteit.
Hoogteverschillen creëren en benutten	Door hoogteverschillen in de omgeving te creëren of te benutten kan schaduwwerking gerealiseerd worden om mensen meer tijd te bieden om te vluchten naar veiligere plekken. Hoogteverschillen kunnen bijvoorbeeld gecreëerd worden door het aanbrengen van een wal of scherm.
Aarden wal aanbrengen	Door een aarden wal aan te brengen tussen de risicobron en de risico-ontvanger wordt de risico-ontvanger bij een explosie afgeschermd van rondvliegende scherven/puin en de drukgolf wordt afgebogen.

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)	Werking van de maatregel
Duidelijke vluchtroutes aanbrengen	Door duidelijke vluchtroutes aan te brengen kunnen mensen het gebied gemakkelijker verlaten.
Risicocommunicatie	Door te communiceren over de mogelijke scenario's in een gebied het betede handelingsperspectief worden mensen zich meer bewust van wat ze moeten doen bij het scenario.
Galerij / trappenhuis aan de schaduwzijde van een gebouw plaatsen	Door de galerij/trappenhuis aan de schaduwzijde van een gebouw te realiseren, vormt het gebouw zelf een bescherming tegen de warmtestraling.

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)	Werking van de maatregel
Onderhouden schuilplaatsen en vluchtwegen	Onderhoud van schuilplaatsen en vluchtwegen is belangrijk, zodat ten alle tijden van een ongeval de schuil- en vluchtmogelijkheden bereikbaar en inzetbaar zijn.
Verzamelplaatsen bepalen en geschikt maken voor een (dreigende) bleve-gaswolkexplosie	De verzamelplaats dient dan als een schuilplaats als mensen binnen in het gebouw niet meer voldoende beschermt zijn tegen het scenario.
De (bedrijfs)noodplannen oefenen op een bleve-gaswolkexplosie	Door te oefenen met het bleve-gaswolkexplosie-scenario in de (bedrijfs)noodplannen weten de werknemers wat ze moeten doen in het geval van een echte calamiteit.

Maatregel (bevorderen hulpverlening)	Werking van de maatregel
Werkende communicatiemiddelen	Tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen vindt veel van de communicatie plaatst via radio, internet en telefoon. Het is hierbij van belang dat zendmasten op afstand van de activiteiten met gevaarlijke stoffen staan, zodat deze ook tijdens een ongeval werken.
Waarschuwingsmiddelen	Voor een snelle en effectieve waarschuwing tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen is het van belang dat een waarschuwingssysteem de mensen in het effectgebied kan bereiken.
Afstemming hulpdiensten	Het handelingsperspectief dat aan mensen wordt geboden ten tijden van een ongeval met gevaarlijke stoffen moet worden afgestemd met de inzet van hulpdiensten, zodat de inzet van de hulpdiensten kan aansluiten bij dit handelingsperspectief.
Bluswater	Voor een adequate hulpverlening van de brandweer is het van belang dat voldoende bluswater aanwezig is bij de activiteit met gevaarlijke stoffen. Door de waterbron onderdeel te laten zijn van een doorlopend watersysteem, wordt het water steeds aangevuld.

Maatregelen ammoniak transport binnenvaart

Maatregel (kansbeperkend)	Werking van de maatregel
Wegnemen van de risicobron	Het wegnemen van de risicobron neemt de kans op het scenario weg.
Begrenzen van de doorzet	Minder vervoersbewegingen betekent een vermindering van het aantal keer dat het scenario zich voor kan doen en dus neemt de kans op het scenario af.
Scheiden van de doorgaande vaart en overslagkade	Het scheiden van deze twee activiteiten verlaagd de kans op aanvaringen.

Maatregel (effectbeperkend)	Werking van de maatregel
Afstand houden tot activiteit met gevaarlijke stoffen	Dicht bij de plaats van het scenario zijn de effecten het meest merkbaar. De hittestraling neemt af naarmate de afstand toeneemt.

Maatregel (effectbeperkend)	Werking van de maatregel
Verdeling typen gebouwen	Door rekening te houden met het type bebouwing kan het aantal mogelijke slachtoffers bij het scenario worden beperkt. Dat kan bijvoorbeeld door het zodanig verdelen van gebouwen in een gebied dat de meer kwetsbare gebouwen worden beschermd door minder kwetsbare gebouwen.
Venstertijden	Door gebruik te maken van venstertijden voor het verladen worden de risicovolle en kwetsbare activiteiten gescheiden.
Obstakels toevoegen	Er kan geprobeerd worden om met obstakels de verspreiding van een gifwolk te vertragen of zodanig turbulentie te creëren dat de gifwolk mengt met de omringende lucht.
Rekening houden met windrichting	De overheersende windrichting in Nederland is uit het zuidwesten. Door kwetsbare functies niet in de overheersende windrichting vanaf de risicobron te plaatsen, kunnen slachtoffer mogelijk voorkomen worden.

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)	Werking van de maatregel
Duidelijke vluchtroutes aanbrenen	Door duidelijke vluchtroutes aan te brengen kunnen mensen het gebied gemakkelijker verlaten.
Risicocommunicatie	Door te communiceren over de mogelijke scenario's in een gebied het bete handelingsperspectief worden mensen zich meer bewust van wat ze moeten doen bij het scenario.
Onderhouden schuilplaatsen en vluchtwegen	Onderhoud van schuilplaatsen en vluchtwegen is belangrijk, zodat ten alle tijden van een ongeval de schuil- en vluchtmogelijkheden bereikbaar en inzetbaar zijn.
De (bedrijfs)noodplannen oefenen op een gifwolk	Door te oefenen met het gifwolkscenario in de (bedrijfs)noodplannen weten de werknemers wat ze moeten doen in het geval van een echte calamiteit.

Maatregel (bevorderen hulpverlening)	Werking van de maatregel
Werkende communicatiemiddelen	Tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen vindt veel van de communicatie plaatst via radio, internet en telefoon. Het is hierbij van belang dat zendmasten op afstand van de activiteiten met gevaarlijke stoffen staan, zodat deze ook tijdens een ongeval werken.
Waarschuwingsmiddelen	Voor een snelle en effectieve waarschuwing tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen is het van belang dat een waarschuwingssysteem de mensen in het effectgebied kan bereiken.
Afstemming hulpdiensten	Het handelingsperspectief dat aan mensen wordt geboden ten tijden van een ongeval met gevaarlijke stoffen moet worden afgestemd met de inzet van hulpdiensten, zodat de inzet van de hulpdiensten kan aansluiten bij dit handelingsperspectief.

Maatregelen waterstof transport binnenvaart

Deze zijn niet uitgesplitst bij het scenariohandboek externe veiligheid. Hieronder staan maatregelen opgenoemd ter vergelijking bij het scenario fakkelbrand bij LPG (niet dat dit gelijk is aan het scenario waterstof).

Maatregel (kans beperkend)	Werking van de maatregel
Wegnemen van de risicobron	Het wegnemen van de risicobron neemt de kans op het scenario weg.
Begrenzen van de doorzet	Minder vervoersbewegingen betekent een vermindering van het aantal keer dat het scenario zich voor kan doen en dus neemt de kans op het scenario af.
Scheiden van de doorgaande vaart en overslagkade	Het scheiden van deze twee activiteiten verlaagd de kans op aanvaringen.

Maatregel (effect beperkend)	Werking van de maatregel
Afstand houden tot activiteit met gevaarlijke stoffen	Dicht bij de plaats van het scenario zijn de effecten het meest merkbaar. De warmtestraling neemt af naarmate de afstand toeneemt.
Verdeling typen gebouwen	Door rekening te houden met het type bebouwing kan het aantal mogelijke slachtoffers bij het scenario worden beperkt. Dat kan bijvoorbeeld door het zodanig verdelen van gebouwen in een gebied dat de meer kwetsbare gebouwen worden beschermd door minder kwetsbare gebouwen.
Venstertijden	Door gebruik te maken van venstertijden voor het verladen worden de risicovolle en kwetsbare activiteiten gescheiden.
Bouwwerken als afscherming	Ook door middel van bouwwerken, zoals gebouwen of tunnels, kan schaduwwerking gerealiseerd worden. Een gebouw tussen de activiteit met gevaarlijke stoffen en kwetsbare objecten/vluchtroutes kan dienen als afscherming.
Toepassen van brandwerend metselwerk	De keuze van het metselwerk bepaalt de brandwerendheid van de gevel.
Gebruik maken van minerale wolisolatie	Minerale wolisolatie is onbrandbaar.
Toepassen van brand- en hittewerende beglazing	Brand- en hittewerende beglazing bestaat uit gelaagd glas, samengesteld uit twee of meer lagen blank floatglas en één of meer speciale opschuimende tussenlagen. In geval van brand vormen deze tussenlagen een beschermend schild.
Gebruik maken van houten en stalen kozijnen	Houten en stalen kozijnen zijn getest voor een brandwerende toepassing. Kunststof kozijnen (zonder stalen vulling) zijn niet brandwerend.
Gebruik maken van dakpannen	Dakpannen houden straling tegen en zijn onbrandbaar.
Toepassen van een gesprinkelde buitengevel	Bij een gesprinkelde buitengevel wordt water automatisch over de gevel gespoten in geval van een calamiteit.
Hoogteverschillen creëren en benutten	Door hoogteverschillen in de omgeving te creëren of te benutten kan schaduwwerking gerealiseerd worden om mensen meer tijd te bieden om te vluchten naar veiligere plekken. Hoogteverschillen kunnen bijvoorbeeld gecreëerd worden door het aanbrengen van een wal of scherm.

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)	Werking van de maatregel
Duidelijke vluchtroutes aanbrengen	Door duidelijke vluchtroutes aan te brengen kunnen mensen het gebied gemakkelijker verlaten.
Risicocommunicatie	Door te communiceren over de mogelijke scenario's in een gebied het betelingsperspectief worden mensen zich meer bewust van wat ze moeten doen bij het scenario.

Maatregel (bevorderen zelfredzaamheid)	Werking van de maatregel
Galerij / trappenhuis aan de schaduwzijde van een gebouw plaatsen	Door de galerij/trappenhuis aan de schaduwzijde van een gebouw te realiseren, vormt het gebouw zelf een bescherming tegen de warmtestraling.
Onderhouden schuilplaatsen en vluchtwegen	Onderhoud van schuilplaatsen en vluchtwegen is belangrijk, zodat ten alle tijden van een ongeval de schuil- en vluchtmogelijkheden bereikbaar en inzetbaar zijn.
Verzamelpaatsen bepalen en geschikt maken voor een (dreigende) fakkelbrand	De verzamelplaats dient dan als een schuilplaats als mensen binnen in het gebouw niet meer voldoende beschermt zijn tegen het scenario.
De (bedrijfs)noodplannen oefenen op een fakkelbrand	Door te oefenen met het fakkelbrandscenario in de (bedrijfs)noodplannen weten de werknemers wat ze moeten doen in het geval van een echte calamiteit.

Maatregel (bevorderen van hulpverlening)	Werking van de maatregel
Werkende communicatiemiddelen	Tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen vindt veel van de communicatie plaatst via radio, internet en telefoon. Het is hierbij van belang dat zendmasten op afstand van de activiteiten met gevaarlijke stoffen staan, zodat deze ook tijdens een ongeval werken.
Waarschuwingsmiddelen	Voor een snelle en effectieve waarschuwing tijdens een ongeval met gevaarlijke stoffen is het van belang dat een waarschuwingssysteem de mensen in het effectgebied kan bereiken.
Afstemming hulpdiensten	Het handelingsperspectief dat aan mensen wordt geboden ten tijden van een ongeval met gevaarlijke stoffen moet worden afgestemd met de inzet van hulpdiensten, zodat de inzet van de hulpdiensten kan aansluiten bij dit handelingsperspectief.
Bluswater	Voor een adequate hulpverlening van de brandweer is het van belang dat voldoende bluswater aanwezig is bij de activiteit met gevaarlijke stoffen. Door de waterbron onderdeel te laten zijn van een doorlopend watersysteem, wordt het water steeds aangevuld.

Bijlage F: Geconsulteerde partijen

Geconsulteerde partijen	Rol
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat	Opdrachtgever, begeleidingscommissie
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat	Begeleidingscommissie
RIVM	Begeleidingscommissie, review eindrapportage
CBRB	Klankbordgroep
CTGG	Klankbordgroep
DB Cargo	Klankbordgroep
Gasunie	Klankbordgroep
Havenbedrijf Rotterdam	Klankbordgroep
KIWA	Klankbordgroep
VELIN	Klankbordgroep
VNCI	Klankbordgroep
EVO-Fenedex	Consultatie

De leden van de klankbordgroep zijn ad hoc benaderd op enkele momenten in het onderzoeksproces, om hun mening te vragen over bijvoorbeeld de volledigheid van een opgestelde inventarisatie of een voorgestelde selectie van focuspunten voor het verdere onderzoek. De uiteindelijke keuzen zijn steeds gemaakt door het projectteam in overleg met de opdrachtgever.