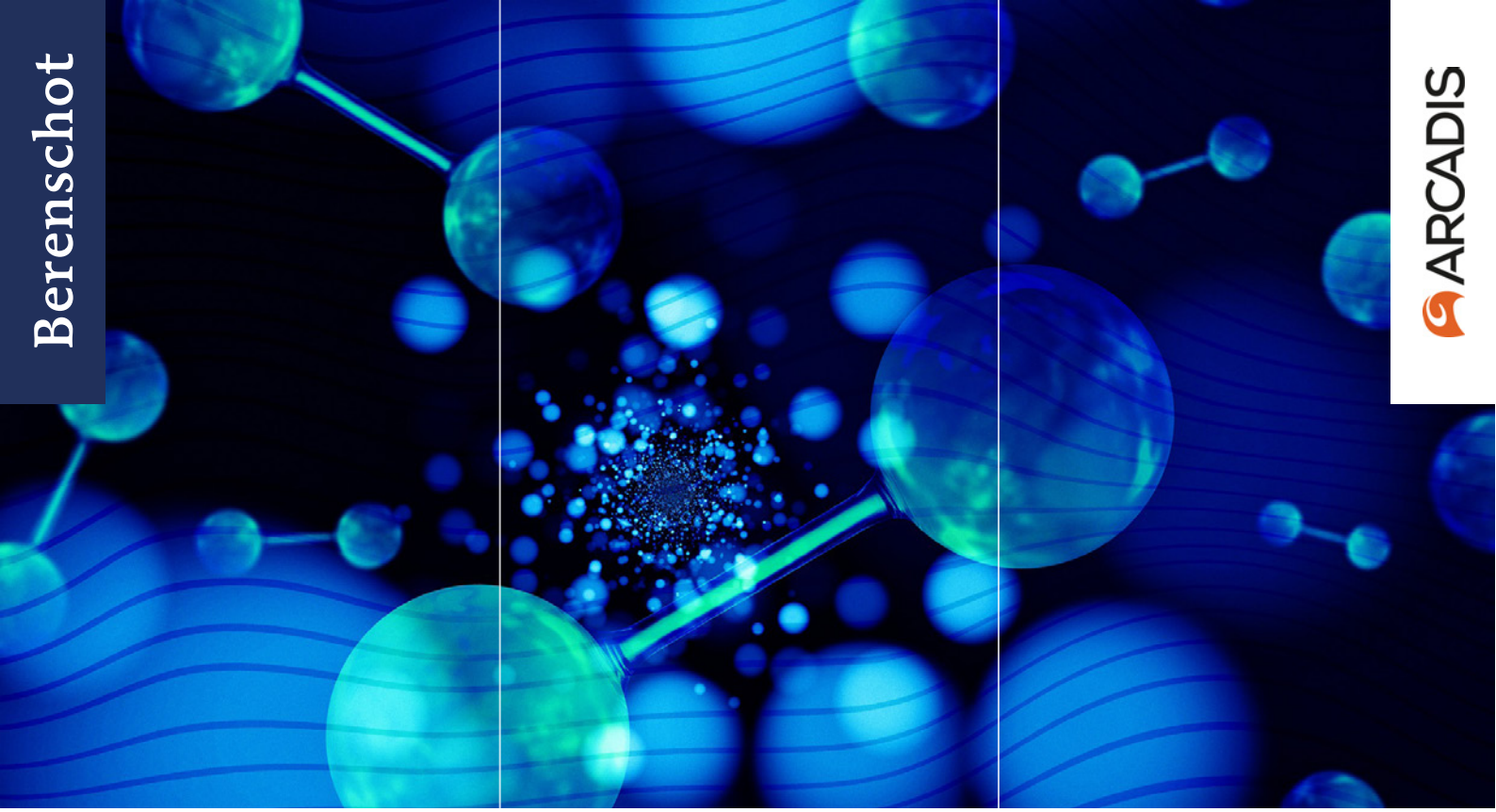
Berenschot

ARCADIS



RAPPORT

MKBV waterstofdragers

MKBV waterstofdragers

11 maart 2024

Samenvatting

Met het verduurzamen van de energievoorziening komt Nederland te staan voor nieuwe keuzes met betrekking tot hernieuwbare energiebronnen en -dragers, en grondstoffen. Een van de opties is het gebruik van waterstofdragers. De voor- en nadelen verschillen per drager. Er moeten transparante en gewogen beslissingen worden genomen met betrekking tot de te prefereren energiedragers en de wijze waarop hiermee in ons land wordt omgegaan.

In dit onderzoek vergelijken we de maatschappelijke kosten en baten van vijf ketens voor het omgaan met op- en overslag, conversie en transport van waterstofdragers die worden geïmporteerd in Nederland. Dit doen we aan de hand van de methode 'Maatschappelijke kosten-batenvergelijking' (MKBV). Hierdoor kunnen we onder andere veiligheidsaspecten, emissies en andere effecten als gevolg van de ketens in euro's uitdrukken. Op deze manier is het mogelijk de ketens met elkaar te vergelijken. De maatschappelijke kosten en baten van de alternatieven (variant 2 t/m 5) worden vergeleken met het referentiealternatief (variant 1). De vijf beschouwde varianten zijn:

- Ammoniak rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via 1) binnenvaart en 2) spoor.
- Ammoniak rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen (onder druk, niet gekoeld).
- Ammoniak kraken in de haven en verder als waterstof vervoeren door (aardgas)buisleidingen.
- Liquified Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via 1) binnenvaart en 2) spoor.
- LOHC's kraken in de haven en verder als waterstof vervoeren door (aardgas)buisleidingen.

In het onderzoek is er voor gekozen de totale beschouwde vervoerstroom steeds volledig af te handelen per alternatief. Dit is gedaan voor een zuivere onderlinge vergelijking. Er is uitgegaan van tracés die representatief zijn voor de Nederlandse situatie.

We constateren dat er geen grote verschillen zijn tussen de kosten-batensaldi van de ketens. Omgerekend gaat het om verschillen van zo'n 11 eurocent per kg waterstof. Wel geeft de uitgevoerde analyse goed weer op welke aspecten de verschillende ketens zich van elkaar onderscheiden.

Variant 5, LOHC's kraken in de haven en als waterstof vervoeren door (aardgas)buisleidingen, komt met het meest positieve saldo uit de vergelijking. Alle varianten hebben een positief saldo ten opzichte van het referentie-alternatief (ammoniak rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor).

Uit gevoeligheidsanalyses is duidelijk geworden dat twee factoren de grootste impact hebben op het resultaat van de vergelijking:

- De importprijs van LOHC en NH_3 kan de vergelijking aanzienlijk veranderen, waardoor andere alternatieven als beste uit de vergelijking kunnen komen.

- De preventieve monitorings- en veiligheidskosten en de ruimtelijke impact hebben een significant effect op de vergelijking. Zeker omdat de kosten voor het treffen van veiligheidsmaatregelen – conform de bestaande regelgeving - behoudend zijn ingeschat. De kosten kunnen hoger uitvallen als lokale overheden meer maatregelen eisen om hun bewoners te beschermen dan verondersteld in het onderzoek.

Andere factoren die impact hebben op het kosten-batensaldo:

- Het conversieverlies dat optreedt bij het kraken of dehydrogeneren van waterstofdragers. Als dit verlies anders blijkt dan aangenomen, kan dat de uitkomst wezenlijk veranderen.

- De ruimtelijke impact van transport van ammoniak via spoor, binnenvaart of buisleiding. Deze kan aanzienlijk zijn, maar dit is grotendeels afhankelijk van de politieke keuzes met betrekking tot de preventieve maatregelen die worden genomen. Wij hebben bedenkingen bij de accuraatheid van de rekenmethodiek van RBM-II voor de grote volumes ammoniak die in deze studie aan de orde zijn. Wanneer de methode aangepast wordt, kan dit tot andere resultaten leiden. De ruimtelijke impact van krakers, dehydrogenatie-installaties en buisleidingen zelf is relatief beperkt.

Verder verschillen de ketens op factoren die niet verwerkt konden worden in het *gekwantificeerde* kosten-batensaldo. Deze kwalitatieve factoren zijn wel belangrijk bij het onderling vergelijken van de verschillende ketens:

- Het risico op lock-ins is het grootst bij alternatieven met grote investeringen in nieuwe infrastructuur (kraakinstallaties en buisleidingen ammoniak en 'krakers' voor LOHC's).

- Overbelasting van beschikbare infrastructuur is op termijn te verwachten bij vervoer over water, spoor en weg. Bij de opties met 'centraal kraken' is dit niet aan de orde en (in het onderzoek) evenmin bij de ammoniakbuisleiding, omdat aangenomen is dat dan alles via die buis gaat.

- Bij een grote calamiteit zijn de gevolgen groter bij ammoniak dan bij LOHC, vanwege de toxische eigenschappen van ammoniak.

Inhoudsopgave

Samenvatting 3

1. Inleiding 6

2. MKBV-methodiek 8

2.1 Introductie MKBV 9
2.2 Het gebruik van een MKBV 9
2.3 Het stappenplan van de MKBV 10

3. Scope 11

3.1 Veldanalyse en betekenis voor het onderzoek 12
3.2 Volumes 13
3.3 De ketens 14

4. Algemene uitgangspunten analyse 21

5. Resultaten 23

5.1 Wijze van presentatie resultaten 24
5.2 Resultaten 24
5.3 Overzicht niet-gemonetariseerde effecten en aspecten in het kader van brede welvaart 33
5.4 Gevoeligheidsanalyse 33
5.5 Vergelijking zonder directe verbranding van ammoniak 39

6. Conclusies 41

Bijlage 1. Tracés 43
Bijlage 2. Kengetallen en onderliggende berekeningen 45
Bijlage 3. Monetarisatie 69
Bijlage 4. RBM II 76
Bijlage 5. Conversietabel 77



HOOFDSTUK 1

Inleiding

In dit onderzoek vergelijken we de maatschappelijke kosten en baten van opslag, conversie, transport en eindgebruik van verschillende ketens van waterstofdragers in Nederland.

Met het verduurzamen van de energievoorziening komt Nederland te staan voor nieuwe keuzes met betrekking tot hernieuwbare energiebronnen en -dragers, en grondstoffen. Een van de opties is het gebruik van waterstofdragers. Deze hebben voordelen voor de energie- en grondstoffentransitie, maar in sommige gevallen ook risico's voor de omgevingsveiligheid. De voor- en nadelen verschillen per drager. Er moeten transparante en gewogen beslissingen worden genomen met betrekking tot de te prefereren energiedragers en de wijze waarop hiermee in ons land wordt omgegaan. De eerdere studies *Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers* en *Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers* hebben de mogelijke volumes respectievelijk de risico's voor de omgevingsveiligheid geschetst.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat wil zicht krijgen op de maatschappelijke kosten en baten van verschillende ketens voor op- en overslag, conversie, transport en gebruik van waterstof(dragers) in Nederland bij de verduurzaming van de energievoorziening en het grondstoffengebruik. Het ministerie wil de resultaten van dit onderzoek gebruiken bij de herijking van het kabinetsstandpunt over ammoniak uit 2004, dat was gebaseerd op de ketenstudies lpg, chloor en ammoniak uit die periode. Ook de hierboven genoemde keten- respectievelijk volumestudie worden inbegrepen. Daarbij wordt samengewerkt met het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en met andere betrokken ministeries. De centrale vraag is hoe fysieke stromen van waterstofdragers in Nederland gefaciliteerd en gestimuleerd moeten worden.

Dit rapport presenteert de resultaten van een onderzoek naar maatschappelijke kosten en baten van vijf ketens voor het omgaan met op- en overslag, conversie en transport van waterstofdragers die worden geïmporteerd in Nederland. Het onderzoek betreft een Maatschappelijke kosten-batenvergelijking (MKBV). Door deze methodiek te hanteren, kunnen we onder andere veiligheidsaspecten, emissies en andere effecten als gevolg van de ketens in euro's uitdrukken. Dat maakt het mogelijk de ketens met elkaar te vergelijken. De vijf beschouwde varianten zijn:

- Ammoniak rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via 1) binnenvaart en 2) spoor.
- Ammoniak rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen (onder druk, niet gekoeld).
- Ammoniak kraken in de haven en verder als waterstof vervoeren door (aardgas)buisleidingen.
- Liquified Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via 1) binnenvaart en 2) spoor.
- LOHC's kraken in de haven en verder als waterstof vervoeren door (aardgas)buisleidingen.

Omwille van de duidelijkheid is er bewust voor gekozen om bij elk van deze varianten steeds de volledige stroom aan waterstofdragers te beschouwen (met enkele kanttekeningen, die later worden toegelicht). De opdrachtgever en onderzoekers realiseren zich dat er in de praktijk altijd een mix van varianten zal ontstaan.



HOOFDSTUK 2

MKBV-methodiek

In dit onderzoek voeren wij een Maatschappelijke kosten-batenvergelijking (MKBV) uit. In dit hoofdstuk leggen we deze methodiek uit.

2.1 Introductie MKBV

Het gevraagde onderzoek heeft een aantal kenmerken van een Maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA). Toch spreken wij bewust niet over een MKBA. Een belangrijke reden daarvoor is dat er bij een MKBA sprake is van een vastomlijnde methodiek met vastgestelde uitgangspunten. Die uitgangspunten zijn hier niet allemaal relevant, noodzakelijk of gewenst. Zo gaat een standaard MKBA uit van een echt nulalternatief (ongewijzigd beleid), terwijl dat op het gebied van waterstofketens niet aan de orde is. Geen beleid maken over de import van waterstofdragers is geen optie, omdat waterstofimport hoe dan ook zal gaan plaatsvinden ten behoeve van de energietransitie. In deze Maatschappelijke kosten-batenvergelijking (MKBV) hanteren we wel een referentiealternatief: het meest waarschijnlijke alternatief bij weinig beleid. We laten ons voor de MKBV ook inspireren door de verschillende MKBA-leidraden en best practices.

Bij het uitvoeren van een MKBV worden alle relevante kosten en baten in kaart gebracht en zo veel mogelijk in euro's uitgedrukt. Kosten betreffen onder meer investeringskosten, onderhoudskosten maar ook kosten door bijvoorbeeld milieuschade, ongevallen en doden bij calamiteiten. Baten kunnen onder andere voortkomen uit besparingen, opbrengsten, verbeterde kwaliteit van leven, het voorkomen van voorvallen en ongevallen of milieueffecten. Het streven is om zowel de directe als de indirecte effecten van een beslissing in de MKBV op te nemen, zodat een zo volledig mogelijk beeld ontstaat van de consequenties ervan.

Een MKBV biedt een gestructureerde methode om de verschillende kosten en baten tegen elkaar af te wegen. Hierbij wordt vaak gebruikgemaakt van een discontovoet, waarmee toekomstige maatschappelijke kosten en baten worden teruggebracht naar hun contante waarde in het heden. Op deze manier kunnen de kosten en baten op eenzelfde basis met elkaar worden vergeleken.

Het resultaat van een MKBV is een samenvattend overzicht waarin de maatschappelijke kosten en baten worden opgeteld en het saldo wordt berekend. Een positief saldo duidt op een maatregel of project dat rendabel is en meer baten oplevert dan het kost. Een negatief saldo betekent dat de kosten hoger zijn dan de baten, wat erop kan wijzen dat een alternatieve aanpak of investering nodig is.

Door het gebruik van een MKBV kunnen beleidsmakers en investeerders beslissingen nemen op basis van objectieve en kwantitatieve informatie. Het stelt hen in staat om de verschillende opties te vergelijken en de meest kosteneffectieve en maatschappelijk voordelige keuze te maken.

2.2 Het gebruik van een MKBV

Een MKBV moet genuanceerd gebruikt worden. Een MKBV is geen absolute waarheid op basis waarvan direct een besluit genomen kan worden, maar geeft slechts een indicatie die vervolgens door beleidsmakers en politici gewogen moet worden. Anderzijds moet het nut van een MKBV ook niet worden onderschat: het geeft een zeer systematisch en gestructureerd overzicht van voor- en nadelen. Om het instrument genuanceerd te gebruiken, is het belangrijk goed op de hoogte te zijn van de voor- en nadelen ervan.

Er zijn grote voordelen te behalen bij het gebruik van een MKBV. Een MKBV biedt in **ordegrootte** inzicht in de verschillende welvaartseffecten van een beleidskeuze en een **ordegrootte** in de baten-kostenverhouding van een beleidskeuze. De MKBV maakt duidelijk wat de beleidskeuze de belastingbetalers ongeveer kost en wat het hun oplevert. Zo vergroot de MKBV de transparantie en controleerbaarheid van de overheid.

Naast voordelen kent het instrument ook belangrijke nadelen die niet genegeerd mogen worden bij het gebruik ervan. Een MKBV-studie is **nooit volledig**. Zo neemt een MKBV-studie veel welvaartseffecten mee, maar niet de zogenaamde onberekenbare welvaartseffecten. Lastig te schatten effecten hebben snel een zwakkere positie in het MKBV-rapport, doordat over het algemeen vooral de te kwantificeren baten worden vergeleken.

Daarnaast heeft een MKBV-studie als **inherente beperking** dat de uitkomsten van berekeningen **aanvechtbaar en onzeker zijn.** Er moeten namelijk veel aannames gedaan worden. Enerzijds omdat een MKBV-studie vaak de toekomst probeert te modelleren. Anderzijds omdat er vaak gebruikt gemaakt wordt van standaard kengetallen die niet altijd gelden voor specifieke alternatieven.

2.3 Het stappenplan van de MKBV

Bij het uitvoeren van deze MKBV wordt een gestructureerd stappenplan gevolgd. Hieronder volgt een beknopte samenvatting van dit stappenplan, dat grotendeels gebaseerd is op het stappenplan van een MKBA.[1] Vervolgens lichten we enkele stappen verder toe in aparte (deel)bijlagen.
Het stappenplan bestaat uit zeven stappen:

- **Veldanalyse.** In deze stap werd de scope van het onderzoek bepaald en werd geduid voor welke afweging de MKBV gebruikt dient te worden.

- **Bepaling van het referentiealternatief.** Het referentiealternatief is de referentie waartegen de alternatieven zijn afgezet.

- **Schatten van effecten.** Bij het schatten van effecten is eerst een **verschillenanalyse** uitgevoerd. Hierbij is het referentiealternatief met de andere alternatieven vergeleken. De aspecten en effecten die verschillen, zijn vervolgens **geschat of doorgerekend.** De effecten zijn zowel op een kwalitatieve als een kwantitatieve manier geschat.

- **Monetariseren van de effecten.** In deze stap zijn de geschatte of doorgerekende effecten omgezet naar in geld uitgedrukte kosten en baten.

- **Verdisconteren.** De gemonetariseerde effecten uit stap 4 zijn met een discontovoet teruggerekend naar één basisjaar.

- **Gevoeligheidsanalyse.** Bij het uitvoeren van een MKBV kunnen onzekerheden bestaan met betrekking tot de gebruikte aannames en schattingen. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd om te beoordelen hoe gevoelig de uitkomsten van de MKBV zijn voor veranderingen in bepaalde variabelen of aannames. Dit geeft inzicht in de robuustheid van de resultaten.

- **Rapportage.** Tot slot zijn de uitkomsten in een MKBV-rapport gepresenteerd. Deze rapportage ligt nu voor u.

1 N. Mouter, Factsheet Maatschappelijke Kosten- en Batenanalyse (MKBA) (2013).



HOOFDSTUK 3

Scope

In dit hoofdstuk bespreken we de scope van dit onderzoek.

3.1 Veldanalyse en betekenis voor het onderzoek

De verwachting is dat binnenlandse productie van waterstof via elektrolyse of anderszins, voornamelijk plaatsvindt in of nabij de grote industrieclusters aan de kust rond de grote zeehavens. Als import van waterstof en waterstofdragers al plaatsvindt in de periode 2030-2035, dan zal dat ook via de havens gaan. Naar verwachting zal er rond die tijd nog geen volledig ontwikkelde Europese infrastructuur zijn die import van gasvormige waterstof via buisleidingen mogelijk maakt uit Noord-Afrika, mediterraan Europa of andere delen van Europa. De havens die een centrale rol spelen bij productie en import, zijn:

- de haven van Rotterdam (inclusief de Maasvlakte)
- de haven van Amsterdam (Noordzeekanaalgebied)
- North Sea Port (het Nederlandse gedeelte, namelijk Vlissingen en Terneuzen)
- Groningen Seaports (Delfzijl en Eemshaven).

Het grootste deel van de vraag naar waterstof in Nederland bevindt zich ook rond deze havens, en hierin kan dus lokaal worden voorzien. Daarnaast zal een deel van de waterstof en de waterstofdragers door Nederland moeten worden vervoerd naar Chemelot en afnemers buiten de industrieclusters rond de havens (de cluster 6-bedrijven, verspreid over Nederland). Omdat dit laatste kleinere stromen zijn en onduidelijk is hoe deze stromen precies zullen lopen, wordt dit niet meegenomen. De voornaamste bestemmingslocaties buiten de havenindustriële complexen zijn:

- Chemelot
- Duitsland (en mogelijk verder)
- cluster 6-bedrijven.

Naast transport naar de voornaamste bestemmingslocaties wordt verwacht dat er ook onderlinge uitwisseling van waterstof tussen de industrieclusters zal plaatsvinden via het landelijk waterstofnetwerk (aangelegd en beheerd door Gasunie-dochter Hynetwork Services (HNS)), als dit rond 2030 gerealiseerd is.

Verder zijn ook verwachtingen rond waterstof in België van belang voor Nederland. Indien de import van waterstofdragers naar de Antwerpse haven gaat plaatsvinden, verloopt dit via de Westerschelde (in Nederland). Daarmee heeft deze import eveneens invloed op de omgevingsveiligheid in Nederland. Ook bestaat de kans dat stromen van waterstofdragers van België naar Duitsland vervoerd worden over Nederlands grondgebied.

De import van waterstof op korte termijn zal waarschijnlijk plaatsvinden in de vorm van ammoniak, maar er komen ook steeds meer alternatieven in beeld. De technologie voor ammoniak is immers al beschikbaar, aangezien ammoniak een chemische commodity is die al wereldwijd wordt geproduceerd en verhandeld. Op dit moment is ammoniak nog eenvoudiger in grote hoeveelheden te transporteren per schip dan bijvoorbeeld gasvormige of vloeibare waterstof. Ook is vervanging van de ammoniakproductie op Chemelot (ten behoeve van kunstmestproductie) door geïmporteerde ammoniak een mogelijkheid. Bij transport van ammoniak naar Duitsland en Chemelot zal dit een grote stijging van het aantal vervoersbewegingen met ammoniak tot gevolg hebben ten opzichte van de huidige situatie.

Voor het transport van gasvormige waterstof is het waterstofnetwerk van HNS een voorwaarde. Hiervoor is het nodig dat de geïmporteerde waterstofdragers ‘gekraakt’ of ‘uitgepakt’ worden, voordat de gasvormige waterstof in de buisleidingen geïnjecteerd kan worden.

Om een visie te kunnen vormen op de verschillende opties, is het nodig zicht te krijgen op de (verschillen in de) maatschappelijke kosten en baten van de ketens die we vergelijken in deze studie. De verschillen in maatschappelijke kosten en baten tussen de ketens moeten in kaart gebracht en gekwantificeerd worden. Het gaat daarbij in elk geval om de economische kosten en baten, de kosten van ruimtelijke consequenties (direct en indirect, ook via risico-contouren en aandachtsgebieden), duurzaamheid, waaronder gevolgen voor klimaat, milieu en natuur (inclusief stikstofemissies (NO_x)), veiligheidskosten en de kosten van te nemen (extra) mitigerende maatregelen en te ontwikkelen competenties. Ook de verschillen tussen de ketenopties in de verdeling van de kosten en baten over maatschappelijke actoren dienen in beeld gebracht te worden.

Daarom onderzoeken we vijf alternatieven voor import, transport en eindgebruik van waterstofdragers. De alternatieven zijn:

- Ammoniak rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via 1) binnenvaart en 2) spoor; dit is het **referentiealternatief.**

- Ammoniak rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen (onder druk, niet gekoeld) inclusief het kraken bij eindgebruiker.

- Ammoniak kraken in de haven en verder als waterstof vervoeren door (hergebruikte aardgas) buisleidingen.

- Liquified Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) rechtstreeks vervoeren naar eindgebruikers via 1) binnenvaart en 2) spoor, inclusief het ontkoppelen/ kraken op locatie bij eindgebruikers.

- Liquified Organic Hydrogen Carriers (LOHC's) uitpakken/kraken in de haven en verder als waterstof vervoeren door (aardgas)buisleidingen.

In dit onderzoek vergelijken wij de maatschappelijke kosten en baten van de vijf verschillende ketens. Afgezien van het gebruik van het landelijk waterstofnetwerk voor transport van binnenlands geproduceerde waterstof, houden we geen rekening met de mogelijkheid dat verschillende ketens naast elkaar kunnen bestaan. Wij zijn ons ervan bewust dat in werkelijkheid waarschijnlijk meerdere ketens gebruikt worden om waterstof naar de eindgebruiker te vervoeren. We doen dit echter om een heldere vergelijking te kunnen maken tussen de ketens. Wanneer we een mix van modaliteiten vergelijken met een andere mix van modaliteiten, worden de voor- en nadelen van de individuele modaliteiten niet goed duidelijk. Dit willen we voorkomen door aan te nemen dat het volledige volume via één keten wordt getransporteerd.

3.2 Volumes

Het volume aan waterstofdragers zoals aangeduid in variant 2 uit de studie *Omgevingsveiligheid toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers*, die op 17 maart 2023 is aangeboden aan de Tweede Kamer, is het uitgangspunt voor alle alternatieven (zie tabel 1 en 2 voor de gebruikte volumes). Voor het onderzoek gaan we ervan uit dat de waterstofdragers volledig groen zijn geproduceerd. In de omvang van de volumes is naast het gebruik als energiedrager ook rekening gehouden met het gebruik van waterstofdragers als grondstof.

Omdat enkel naar de verschillen tussen de ketens wordt gekeken, maken stromen die in alle alternatieven hetzelfde zijn geen deel uit van de vergelijking:

- De stroom Steam Methane Reforming[2] (SMR)-productie + CCS (bestaande productie) en het gebruik hiervan achten wij hetzelfde voor elke variant. Als deze veranderen of verdwijnen geldt dat voor alle varianten. Dit betreft waterstofstromen die binnen Nederland zullen blijven en via het landelijk waterstofnetwerk getransporteerd kunnen worden.

- De binnenlandse productie door middel van elektrolyse is ongeacht het alternatief hetzelfde. Daarmee valt 595 kt productie en ook afname uit de vergelijking. Anders gezegd: in de vergelijking gaat het om de waterstof(dragers) die worden geïmporteerd.

- We nemen aan dat de binnenlandse productie zo veel mogelijk binnen Nederland (via het landelijk waterstofnetwerk) afgenomen wordt en dat het restant geïmporteerd wordt. Dit betekent dat in 2035 566 kt H_2-eq van de 1.161 kt H_2-eq vraag in Nederland geïmporteerd moet worden.

- Als er voor een proces groene ammoniak als grondstof nodig is, ligt het voor de hand om ook groene ammoniak te importeren en naar de eindverbruiker te vervoeren via één van de modaliteiten. Daarom wordt verondersteld dat de stroom groene ammoniak als grondstof voor elk alternatief hetzelfde is. Dat betekent dat deze stroom geen deel uitmaakt van de vergelijking. Het is onwaarschijnlijk dat er LOHC geïmporteerd wordt om vervolgens ammoniak te maken.

Dit betekent dat er een verbruik van 280 kt H_2-eq in Nederland overblijft in het vergelijk tussen de alternatieven, naast de stromen naar het buitenland. Het Nederlandse verbruik kan worden opgesplitst in hogetemperatuurproceswarmte en het overig eindgebruik. Dit is opgesplitst omdat de hogetemperatuurproceswarmte ingevuld kan worden met waterstof of met ammoniak.

2 Deze waterstofproductiemethode maakt gebruik van stoom op hoge temperatuur om waterstof te produceren uit een methaanbron, zoals aardgas of kolen.

Tabel 1 **Opbouw eindgebruik waterstofdragers in Nederland, als beschouwd in het onderzoek. Deze aangepaste volumes komen uit de studie *Omgevingsveiligheid toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers*.**

Onderdeel	kt H_2-eq
Eindgebruik in Nederland	1.161
Binnenlandse elektrolyse	-595
Groene ammoniak	-286
Beschouwd waterstofgebruik in Nederland	280
Waarvan HT-proceswarmte	124
Waarvan ander eindgebruik	156

Doordat wij aannemen dat er 1.578 kt H_2-eq geïmporteerd wordt, komen wij tot het volgende totale stromenoverzicht voor het onderzoek:

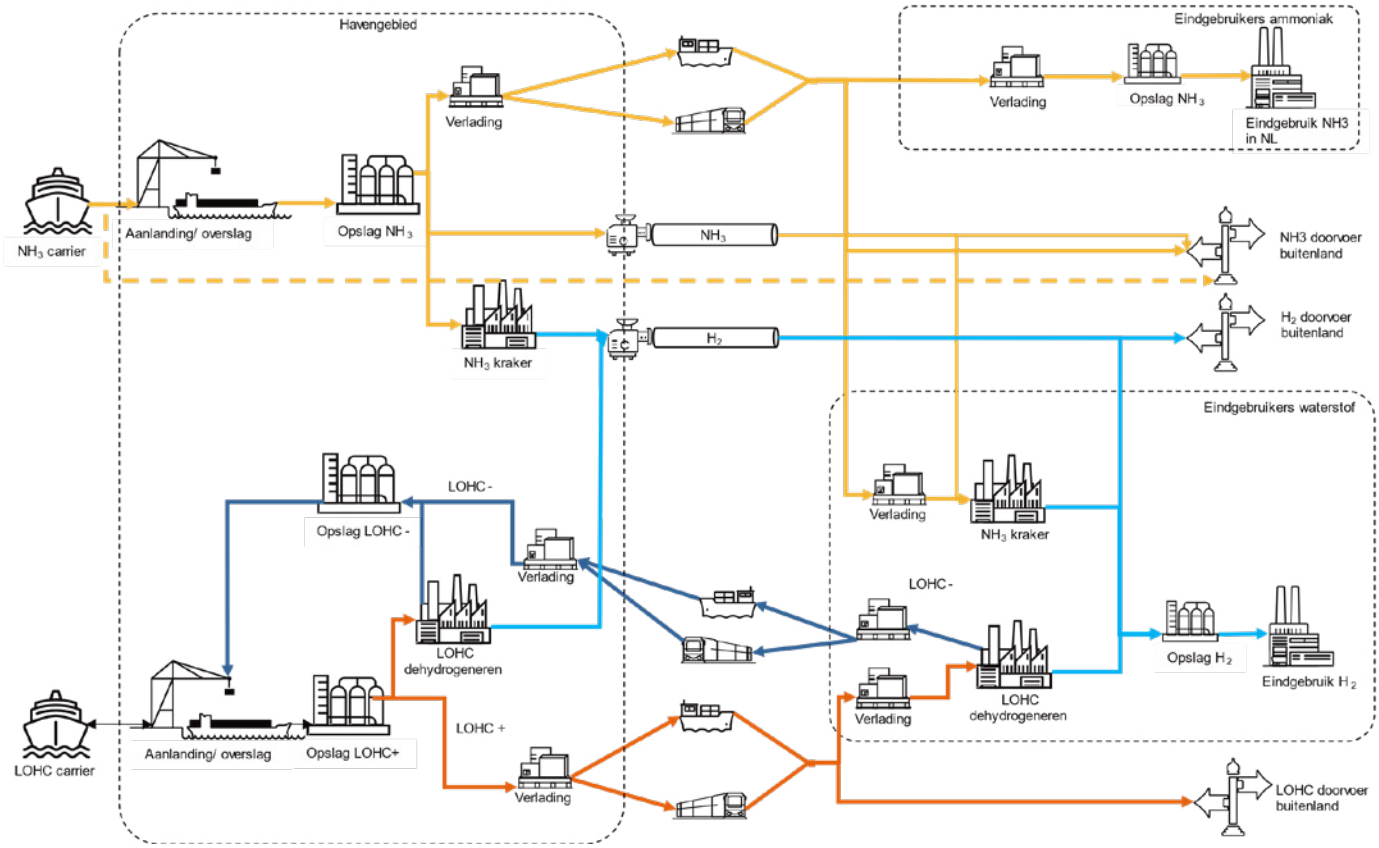
Tabel 2 **Totale stromen door Nederland**

Onderdeel	kt H_2-eq
Hogetemperatuur- proceswarmte	124
Ander eindgebruik in Nederland	156
Doorvoer naar het buitenland	1.298
Totaal	1.578

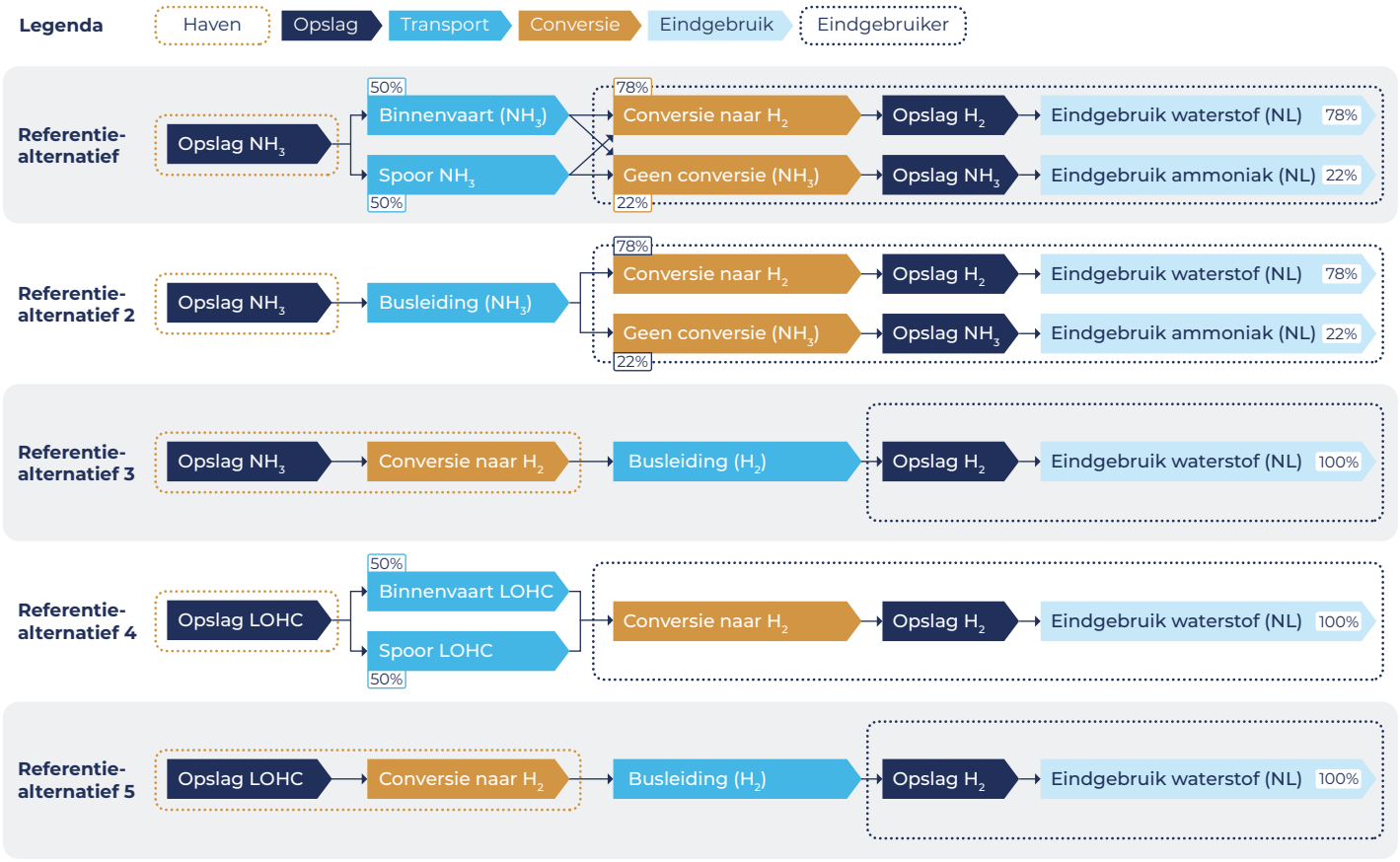
3.3 De ketens

Startpunt voor de te beschouwen ketens zijn de plaatsen waar waterstofdragers ons land binnenkomen (aanlandlocaties). Eindpunt is de gebruiks- of exportlocatie in Nederland. Hieronder schetsen we hoe naar verwachting de hele waterstofimportketen eruit zal zien. Zichtbaar is dat veel verschillende modaliteiten naast elkaar bestaan.

De vijf ketens die we beschouwen in het onderzoek bestaan uit verschillende stappen. De stappen in de ketens die wij onderscheiden, zijn: opslag, transport, conversie en eindgebruik van de waterstofdrager. Een overzicht van de stappen per keten voor binnenlands gebruik zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 1 **Gecombineerd overzicht van alle vijf de ketens.**



Figuur 2 **Schematisch overzicht van de vijf ketens. De doorvoer naar het buitenland is niet meegenomen in dit overzicht.**

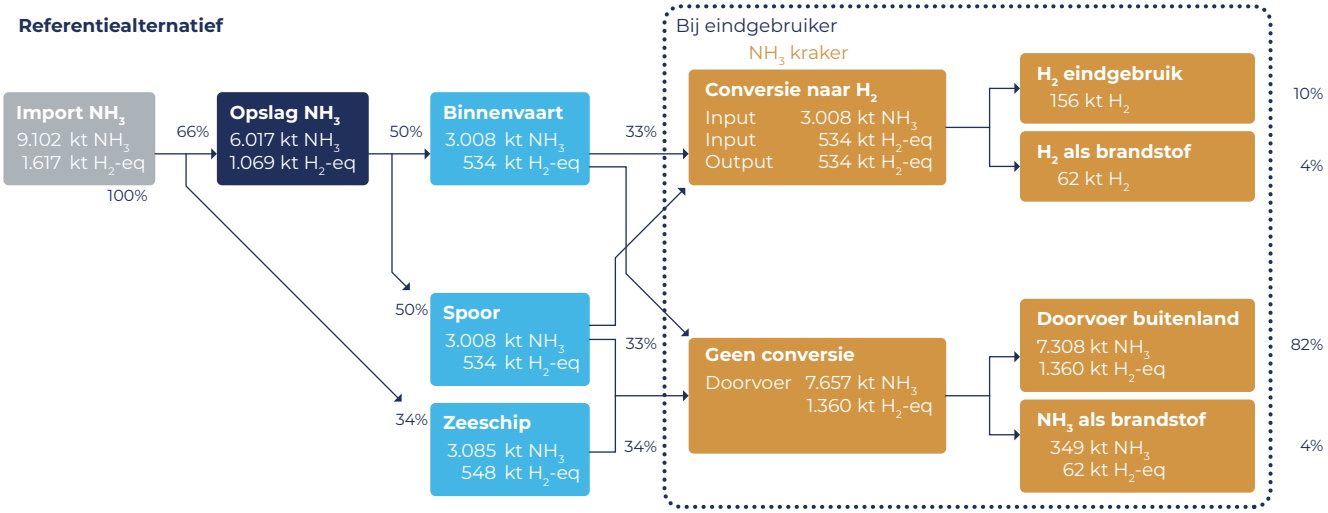
Voor deze MKBV beschouwen we de gehele ketens, maar kijken we ook naar de effecten van de verschillende modaliteiten afzonderlijk. Op die manier kunnen beleidsmakers de verschillende alternatieve routes vergelijken. Dit betekent ook dat in elke keten het volledige volume zoals geschetst in paragraaf 3.2 beschouwd wordt.

3.3.1 Ammoniak vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor (referentiealternatief)

In het referentiealternatief, het meest beleidsarme alternatief, wordt enkel ammoniak geïmporteerd. Daarbij zijn ten behoeve van het onderzoek de volgende aannames gehanteerd. De geïmporteerde ammoniak wordt opgeslagen in de haven in 3 terminals met een gezamenlijke capaciteit van 260 kt ammoniak. Jaarlijks bevoorraden 121 schepen deze terminals. Daarnaast is er een importstroom ammoniak die geen Nederlandse haven aandoet maar direct naar het buitenland gaat. We gaan hierbij uit van het volume dat voor België bestemd is.

De opgeslagen ammoniak wordt overgeslagen naar een binnenvaartschip of naar het spoor (onder druk) en vervoerd naar de eindgebruiker of naar het buitenland. Deze stromen worden gelijkelijk verdeeld over beide modaliteiten. Voor de binnenvaart zijn er 15 binnenvaartschepen die 1.220 tochten maken per jaar. Er zijn 12 treinen nodig die in totaal 1.273 tochten maken per jaar.

Bij de eindgebruiker zijn er twee opties: de ammoniak kraken naar gasvormige waterstof of het direct als ammoniak opslaan en gebruiken. De gasvormige waterstof wordt gebruikt als brandstof ter vervanging van aardgas, als grondstof voor chemische processen of directe ingezet in bijvoorbeeld brandstofcellen. De ammoniak kan direct worden gebruikt als brandstof voor hogetemperatuurprocessen of gebruikt worden in het buitenland. Het rechterdeel van de keten in figuur 3 toont de verdeling van het eindgebruik.



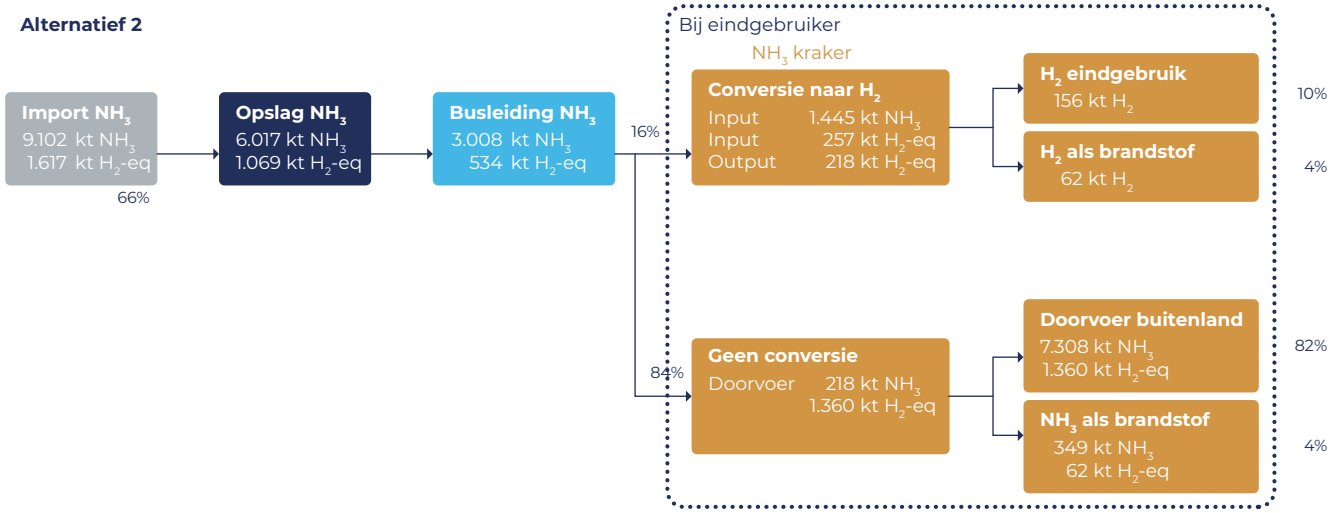
Figuur 3 **Ketenelementen en totale volumes op jaarbasis in het referentiealternatief. De kleuren komen overeen met de legenda van figuur 2.**

3.3.2 Ammoniak vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen

In dit alternatief wordt ook enkel ammoniak geïmporteerd. De geïmporteerde ammoniak wordt opgeslagen in de haven in 4 terminals met een totale capaciteit van 400 kt ammoniak. Jaarlijks bevoorraden 183 schepen deze terminals. Dit is meer dan bij het referentiealternatief omdat het volledige volume dat bestemd is voor doorvoer naar het buitenland in een Nederlandse haven binnenkomt. Hierdoor is de terminalcapaciteit groter ten opzichte van het referentiealternatief, waarbij een deel van de zeeschepen direct doorvaart naar het buitenland.[3]

De ammoniak wordt onder druk gebracht en via buisleidingen getransporteerd naar de eindgebruiker. Hier wordt uitgegaan van één nieuw aan te leggen buisleidingtracé vanuit één haven naar één afnemer over een afstand van 200 km.

Bij de eindgebruiker zijn er twee opties; de ammoniak kraken naar gasvormige waterstof of het direct als ammoniak opslaan en gebruiken. De gasvormige waterstof wordt gebruikt als brandstof ter vervanging van aardgas, als grondstof voor chemische processen of directe inzet in bijvoorbeeld brandstofcellen. De ammoniak kan direct worden gebruikt als brandstof voor hogetemperatuurprocessen of gebruikt worden in het buitenland. Het rechterdeel van de keten in figuur 4 toont de in het onderzoek gehanteerde verdeling van het eindgebruik.



Figuur 4 **Ketenelementen en totale volumes op jaarbasis in alternatief 2. De kleuren komen overeen met de legenda van figuur 2.**

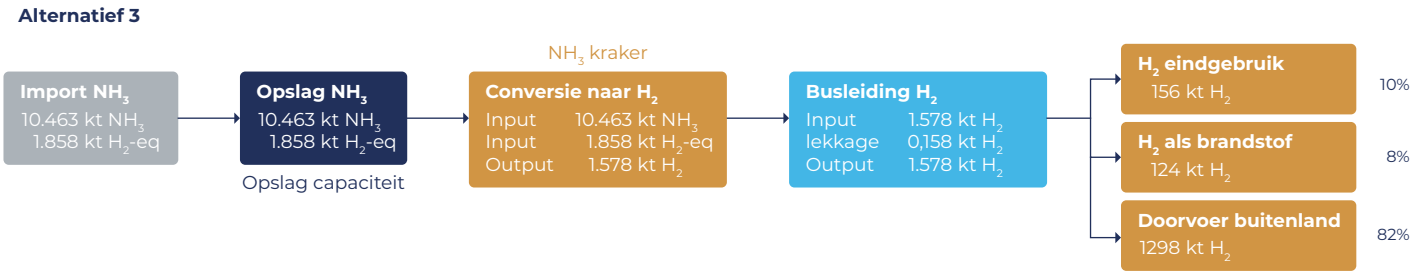
3 In deze variant is het uitgangspunt dat het volledige volume ammoniak getransporteerd wordt door buisleidingen.

3.3.3 Ammoniak kraken in de haven

In dit alternatief wordt ook enkel ammoniak geïmporteerd. De geïmporteerde ammoniak wordt opgeslagen in de haven in 4 terminals met een totale capaciteit van 460 kt ammoniak. Jaarlijks bevoorraden 211 schepen deze terminals. De volledige stroom ammoniak voor doorvoer naar het buitenland wordt in dit alternatief geïmporteerd. In de haven wordt de ammoniak vervolgens gekraakt naar gasvormige waterstof. Hier zijn 16 krakers voor nodig met een totale capaciteit van 1.590 kt waterstof per jaar. De totale importbehoefte is in dit alternatief hoger dan in het referentiealternatief en alternatief 2. Dit komt doordat in dit alternatief alle ammoniak gekraakt wordt en er daarom meer conversieverlies is. Omdat de energiebehoefte in het eindgebruik hetzelfde is, moet er meer ammoniak geïmporteerd worden. Vanwege het hogere importvolume is ook de terminalcapaciteit relatief groter dan in de eerdere alternatieven.

Dit betekent dat er ook 16 compressorstations zijn bij de invoerpunten op het netwerk. De gasvormige waterstof wordt onder druk gebracht en via buisleidingen getransporteerd naar de eindgebruiker of gaat over de grens. Ongeveer 0,158 kt (0,01%) gaat verloren door lekkage in het buisleidingsysteem.[4]

Bij de eindgebruiker komt nog enkel gasvormige waterstof aan. Het rechterdeel van de keten in figuur 5 toont de verdeling van het eindgebruik.



Figuur 5 **Ketenelementen en totale volumes op jaarbasis in alternatief 3. De kleuren komen overeen met de legenda van figuur 2.**

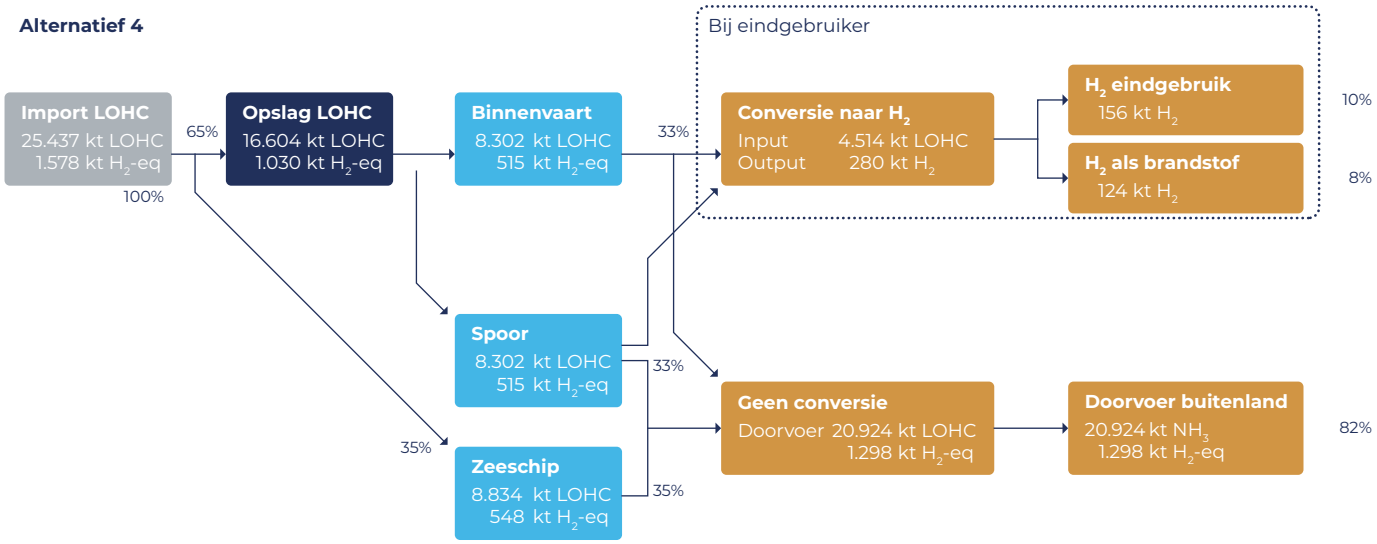
4 Het kengetal 0,01% hebben wij gebruikt naar aanleiding van gesprekken met Gasunie. Gasunie geeft aan de lekkage te kunnen beperken tot 0,01% van het volume dat door de buis stroomt. Dit wordt verder toegelicht in hoofdstuk 4.

3.3.4 LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor

In dit alternatief wordt enkel LOHC geïmporteerd. De geïmporteerde LOHC wordt opgeslagen in de haven. Hiervoor zijn 3 opslagterminals nodig met een gezamenlijke opslagcapaciteit van 700 kt LOHC. Jaarlijks bevoorraden 119 schepen deze terminals. Daarnaast is er nog eens eenzelfde capaciteit nodig om de ongeladen LOHC weer te exporteren, zodat die opnieuw gehydrogeneerd kan worden. Daarnaast is er een importstroom LOHC die geen Nederlandse haven aandoet maar direct naar het buitenland gaat: we gaan hierbij uit van het volume dat voor België bestemd is.

De LOHC wordt via het spoor of de binnenvaart getransporteerd naar de eindgebruiker of naar het buitenland. De volumes zijn gelijk verdeeld over de binnenvaart en het spoor. Er zijn 18 LOHC-schepen nodig die in totaal bijna 1.480 retourtochten (met de geladen en ongeladen drager) maken om de LOHC te vervoeren. Over het spoor moeten 5.450 retourritten gemaakt worden door 33 treinen.

Bij de eindgebruiker wordt de LOHC gehydrogeneerd tot gasvormige waterstof. Aangenomen is dat hier 3 installaties nodig zijn met een totale capaciteit van 280 kt waterstof per jaar. Het rechterdeel van de keten in figuur 6 toont de verdeling van het eindgebruik.

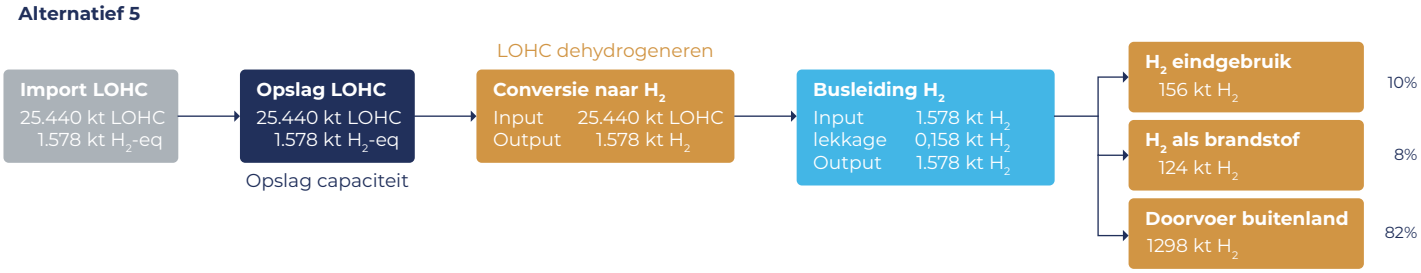


Figuur 6 **Ketenelementen en totale volumes op jaarbasis in alternatief 4. De kleuren komen overeen met de legenda van figuur 2.**

3.3.5 LOHC's kraken in de haven en de waterstof vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen

In dit alternatief wordt enkel LOHC geïmporteerd. De geïmporteerde LOHC wordt opgeslagen in de haven. Hiervoor zijn 7 opslagterminals nodig met een gezamenlijke opslagcapaciteit van 1100 kt LOHC. Jaarlijks bevoorraden 183 schepen deze terminals. Daarnaast is er nog eens eenzelfde capaciteit nodig om de ongeladen LOHC weer te exporteren zodat het opnieuw geladen kan worden. Ook het volledige volume dat bestemd is voor doorvoer naar het buitenland, wordt in dit alternatief geïmporteerd en daarom is de terminalcapaciteit groter dan in alternatief 4. In de havens wordt alle LOHC gedehydrogeneerd. Hier zijn 16 installaties voorzien met een totale capaciteit van 1.590 kt waterstof per jaar. De ongeladen LOHC kan via de exportterminal weer geëxporteerd worden, zodat het opnieuw geladen kan worden. De onttrokken gasvormige waterstof wordt onder druk gebracht en via buisleidingen getransporteerd naar de eindgebruiker. Er zijn 16 intakpunten en dus ook 16 compressorstations. Ongeveer 0,158 kt (0,01%) gaat verloren door lekkage in het buisleidingsysteem.[5]

Bij de eindgebruiker komt nog enkel gasvormige waterstof aan. Het rechterdeel van de keten in figuur 7 toont de verdeling van het eindgebruik.



Figuur 7 **Ketenelementen en totale volumes op jaarbasis in alternatief 5. De kleuren komen overeen met de legenda van figuur 2.**

5 Het kengetal 0,01% hebben wij gebruikt naar aanleiding van gesprekken met Gasunie. Gasunie geeft aan de lekkage te kunnen beperken tot 0,01% van het volume dat door de buis stroomt. Dit wordt verder toegelicht in hoofdstuk 4.



HOOFDSTUK 4

Algemene uitgangspunten analyse

In dit hoofdstuk bespreken we de belangrijkste uitgangspunten die we bij de analyse hanteren.

We hanteren in deze MKBV de volgende algemene uitgangspunten:

- We gaan uit van een vastgesteld eindverbruik dat gelijk is voor alle voorgestelde routes. Op deze manier zijn de alternatieven vergelijkbaar.

- We hanteren een zichtperiode van 2025 t/m 2080. Buisleidingen hebben veelal een levensduur van vijftig jaar. Door de maatschappelijke kosten en baten voor de periode gelijk aan de grootste relevante levensduur te vergelijken, zorgen we dat alternatieven met veel investeringen goed vergelijkbaar zijn met alternatieven met hoge operationele kosten.

- We hanteren 2023 als prijspeil en verdisconteren ook naar dat jaar.

- We hanteren standaard een discontovoet van 2,25% (reëel) en sluiten daarbij aan bij het rapport van de Werkgroep discontovoet 2020.[6] Voor investeringen in buisleidingen is sprake van vaste, verzonken kosten. De kosten van investeringen in deze buisleidingen verdisconteren we met een discontovoet van 1,6%. Zo wordt rekening gehouden met het feit dat een dergelijke investering geen alternatieve aanwendingsmogelijkheden kent. Ook dit sluit aan bij de aanbevelingen van de Werkgroep discontovoet 2020.[7]

- De MKBV heeft betrekking op Nederland. Dat betekent dat we alleen dat deel van de kosten en baten meenemen dat in Nederland neerslaat. Wel beschouwen we kwalitatief, in het kader van brede welvaart, de internationale effecten van het voorstel. In de praktijk komt dit er onder andere op neer dat we ervan uitgaan dat economische voordelen grotendeels in het buitenland terechtkomen, omdat het buitenland een groot volume afneemt. Externaliteiten van aanlanding, transport en eventueel conversie landen echter wel volledig in Nederland.

- Gelet op de ontwikkelingen in de markt gaan we uit van (D)BT als LOHC die hier gehanteerd moet worden.

Voor **transport** doen we de volgende aannames:

- Uitgangspunt bij transport van ammoniak is dat dit onder druk gebeurt.

- Bij transport van waterstof via buisleidingen wordt een lekkage van 0,01% gehanteerd. Deze waarde is aanzienlijk lager dan in andere bronnen is vermeld. Terwijl de brede JRC-studie uitgaat van een lekverlies van 0,7%, stelt Gasunie in communicatie met ons onderzoeksteam dat men vanwege de eigen prestaties in staat is het lekverlies te beperken tot 0,01%.

- De stromen worden per alternatief gelijk verdeeld over de beschikbare modaliteiten.

- Het landelijk waterstofnetwerk speelt richting 2035 een belangrijke rol voor het vervoer van in Nederland geproduceerde waterstof. In basis moeten de kosten voor ombouw gasnet/gereedmaken van het landelijk waterstofnetwerk daarmee worden meegenomen in alle alternatieven. Kosten die echter in álle alternatieven zitten, zijn voor de vergelijking niet relevant (wiskundig vallen ze tegen elkaar weg). Het verschil in intensiteit van het gebruik van het landelijk waterstofnetwerk komt wel naar voren in andere aspecten van de MKBV, zoals de operationele kosten voor gebruik van het landelijk waterstofnetwerk (deze nemen we in alternatief 3 en 5 mee). Zo zullen grotere volumes leiden tot veranderingen in de operationele kosten. Maar de basis, zoals de CAPEX gemoeid met de ombouw, is in alle alternatieven gelijk. Een belangrijke kanttekening bij deze aanname is dat wanneer het gebruik van het landelijk waterstofnetwerk achterblijft bij de verwachting, de kosten voor het transport per eenheid van de resterende stroom (veel) hoger worden dan bij een intensiever gebruik van het landelijk waterstofnetwerk.

- Om een zuivere vergelijking te maken tussen de alternatieven, is ervoor gekozen om gestileerde tracés te beschouwen in plaats van geografische tracés. Het is nog niet duidelijk hoe bepaalde stromen op gang komen. Omdat er met hypothetische toekomstscenario's wordt gewerkt, is het niet altijd mogelijk om deze accuraat te plotten op de kaart van Nederland. We hanteren voor de vergelijking voor elk van de alternatieven een representatief tracé van 200 km waarvoor we het volledige gehanteerde volume vervoeren. Meer informatie over het representatieve tracé is te vinden in bijlage 1.

Met betrekking tot **eindgebruik** veronderstellen we het volgende:

- Bij eindgebruikers is sprake van een buffer van drie tot vier dagen (1% van een jaar).

- Eindgebruik vindt alleen plaats in de grote industriële clusters bij bedrijven met een aanzienlijke omvang.

6 Rapport Werkgroep discontovoet 2020, p. 7.
7 Rapport Werkgroep discontovoet 2020, p. 20.



HOOFDSTUK 5

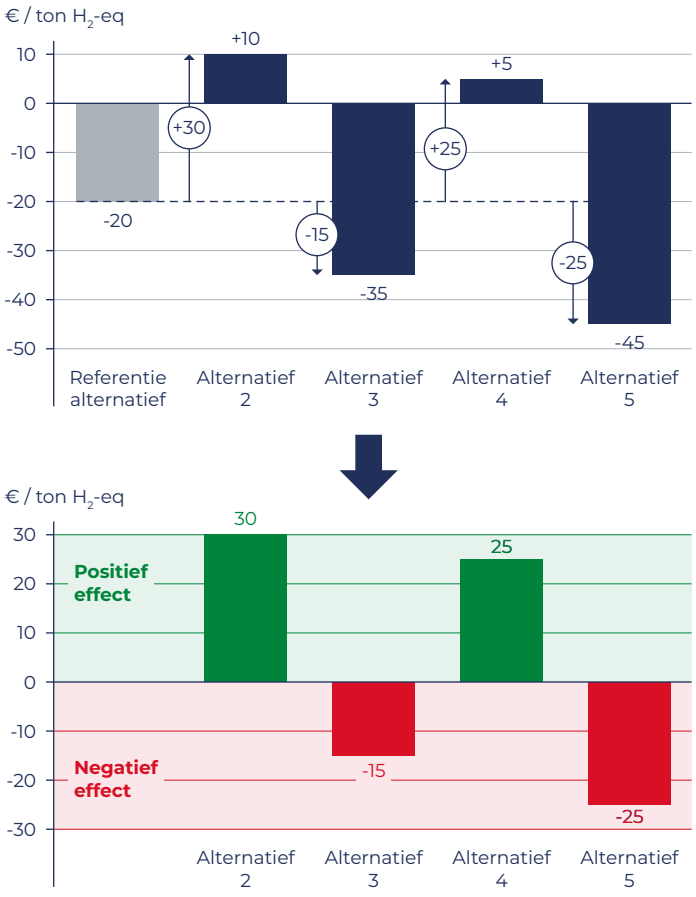
Resultaten

In dit hoofdstuk beschrijven we de belangrijkste resultaten.

Als eerste bespreken we de manier waarop de resultaten gepresenteerd worden. Vervolgens gaan we in op de resultaten zelf. We beschrijven de geaggregeerde resultaten eerst en behandelen daarna elk deelresultaat afzonderlijk. Bij elk resultaat leggen we uit op welke manier er gemonetariseerd[8] is. De onderliggende aannames en technische doorrekening worden in de bijlage gepresenteerd.

5.1 Wijze van presentatie resultaten

In dit onderzoek hebben we de maatschappelijke kosten en baten van de vier alternatieven ten opzichte van het referentiealternatief berekend. De resultaten die we in dit hoofdstuk presenteren, zijn daarom niet de absolute resultaten maar de resultaten (kosten of baten) ten opzichte van het referentiealternatief. De resultaten worden altijd in €'s of in €/ton H_2-eq uitgedrukt. In de figuur hieronder illustreren we hoe de resultaten in dit hoofdstuk worden gepresenteerd.



Figuur 8 **Illustratie van presentatie resultaten. De weergegeven waardes zijn fictief.**

In de figuur 8 zijn twee grafieken weergegeven. De bovenste grafiek geeft de absolute resultaten kosten en baten weer van de vijf verschillende ketens ten opzichte van een bepaalde uitgangssituatie. De onderste grafiek is een resultante van de bovenste grafiek en geeft het verschil van de vier alternatieven ten opzichte van het referentiealternatief weer. Alle resultaten in dit hoofdstuk worden altijd gepresenteerd op de manier zoals in de onderste grafiek. In de onderste grafiek representeren de kolommen boven de x-as de baten (positieve effecten). De kolommen onder de x-as representeren de kosten (negatieve effecten). Een negatief effect kan nog steeds (in absolute zin) positief zijn, maar in vergelijking met het referentiealternatief negatief weergegeven worden. We geven de resultaten bewust alleen conform de onderste grafiek weer, omdat we de ketens alleen onderling hebben vergeleken en niet met een betekenisvolle uitgangssituatie zoals bijvoorbeeld het volledig afzien van transport van waterstofdragers (met de bijbehorende maatschappelijke gevolgen).

5.2 Resultaten

In deze paragraaf presenteren we de resultaten. Om te beginnen de resultaten van de volledige ketens en vervolgens de resultaten van de verschillende aspecten. De aspecten die we onderscheiden, zijn:

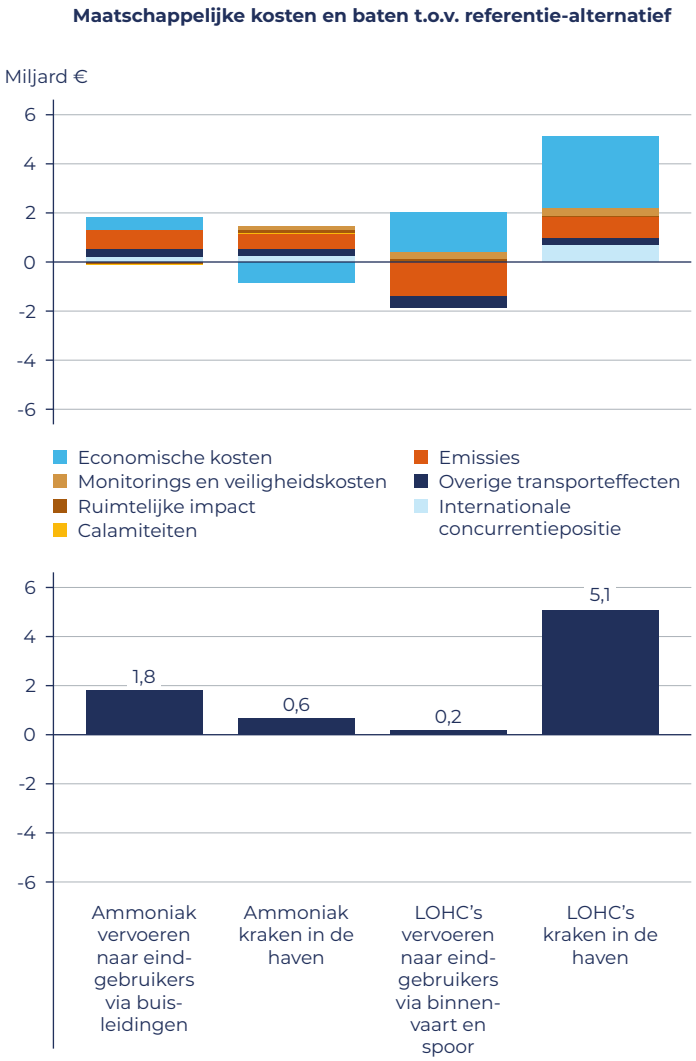
- economische kosten (paragraaf 5.2.2)
- monitorings- en veiligheidskosten (paragraaf 5.2.3)
- ruimtelijke impact (paragraaf 5.2.4)
- calamiteiten (paragraaf 5.2.5)
- emissies (paragraaf 5.2.6)
- overige transporteffecten (paragraaf 5.2.7)
- internationale concurrentiepositie (paragraaf 5.2.8).

Belangrijke opmerking: bij de presentatie van de resultaten worden verschillende ranges gebruikt op de y-as. Ook kunnen dezelfde kleuren in verschillende figuren wat anders representeren. Kijk daarom altijd goed naar de legenda.

5.2.1 Totaalbeeld vergelijking

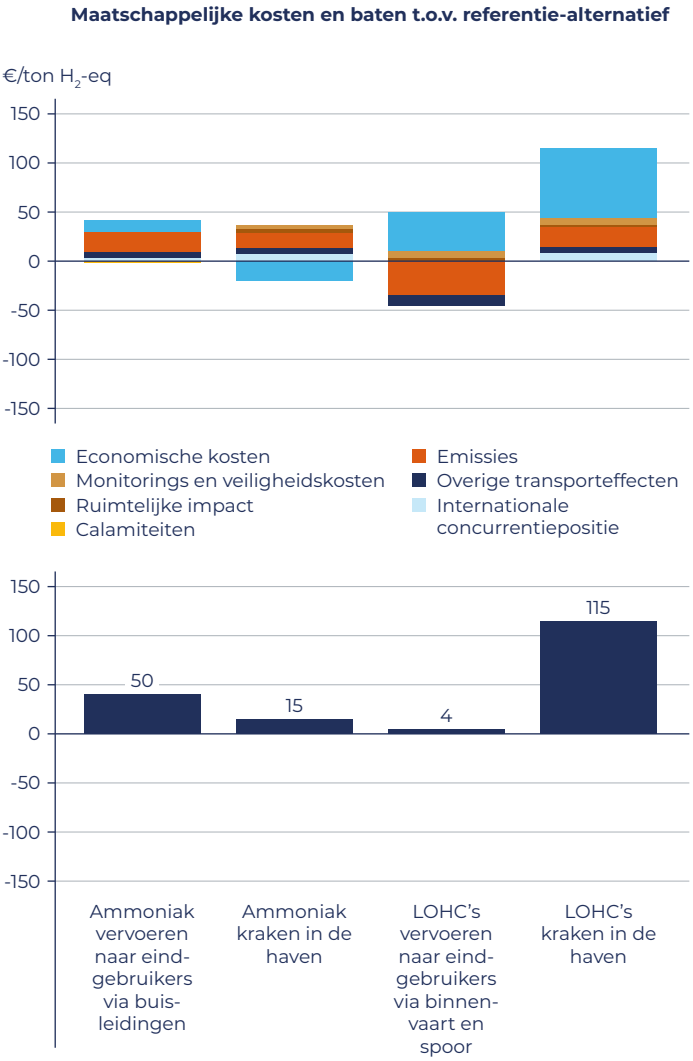
In figuur 9 en 10 staan de totaalresultaten van de vergelijking. Figuur 9 geeft de resultaten in (miljarden) euro's weer; figuur 10 de resultaten in €/ton H_2-equivalent. In beide figuren toont de bovenste grafiek de maatschappelijke kosten en baten van elk aspect. De onderste grafiek is een resultante van de bovenste grafiek: alle baten (alle kolommen boven de x-as) minus alle kosten (alle kolommen onder de x-as).

8 Monetariseren is het vertalen van effecten in geld. Op deze manier kunnen verschillende effecten met elkaar vergeleken worden.



Figuur 9 **Resultaten – Volledige ketens in miljard €. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

In figuur 9 is te zien dat alle alternatieven maatschappelijke baten hebben ten opzichte van het referentiealternatief. 'Ammoniak kraken in de haven' heeft opvallend meer economische kosten dan het referentiealternatief. In dit alternatief worden veel kosten gemaakt omdat er meer conversieverlies (als gevolg van het kraken) wordt toegerekend aan de Nederlandse markt. Doordat wij corrigeren voor de doorvoer naar het buitenland wordt conversieverlies (en dus de bijbehorende kosten) in het buitenland niet meegerekend in de andere alternatieven. In het alternatief 'LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor' zijn de emissiekosten van het transport hoog ten opzichte van het referentiealternatief. Dit is het gevolg van het feit dat bij LOHC er meer massa vervoerd moet worden voor dezelfde hoeveelheid waterstofequivalent. Alle alternatieven scoren beter op de aspecten 'internationale concurrentiepositie', 'monitorings- en veiligheidskosten' en 'ruimtelijke impact' dan het referentiealternatief. Opvallend is verder dat het verschil in maatschappelijke kosten en baten voor calamiteiten in de onderlinge vergelijking in het niet valt bij de verschillen in maatschappelijke kosten en baten van de andere aspecten. Dit houdt verband met de gehanteerde rekenmethode, zoals later nader wordt toegelicht.

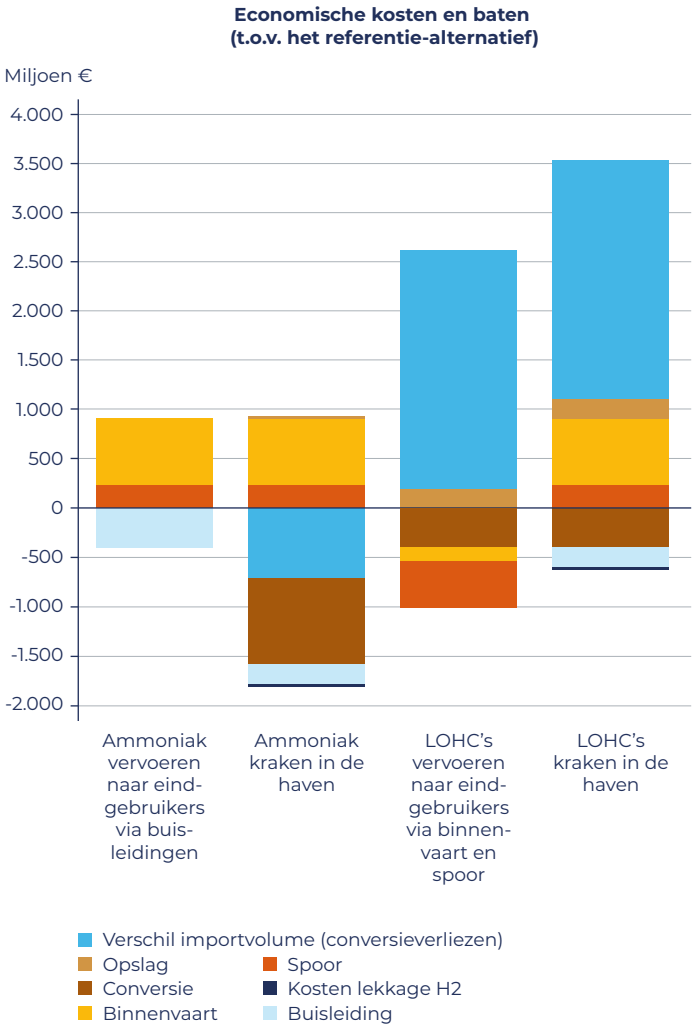


Figuur 10 **Resultaten – Volledige ketens in €/ton H_2-eq. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

De resultaten in figuur 10 zijn een afgeleide van de resultaten weergegeven in figuur 9. In figuur 10 worden namelijk dezelfde kosten gepresenteerd, alleen dan in €/ton H_2-equivalent. In algemene zin zijn de verschillen tussen de alternatieven klein; tussen 9 €/ton en 109 €/ton. Dat is een verschil van 10 eurocent per kg.

5.2.2 Economische kosten

In deze paragraaf beschrijven we de resultaten van het aspect economische kosten. In figuur 11 zijn de resultaten van de economische kosten per variabele weergegeven.



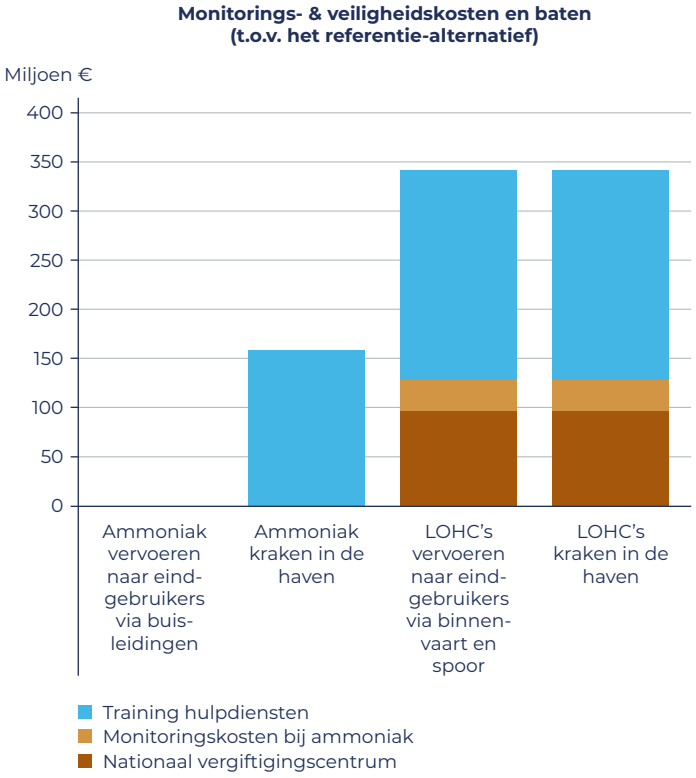
Figuur 11 **Resultaten – Economische kosten en baten. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

Opvallend zijn de hoge kosten voor het alternatief 'ammoniak kraken in de haven'. De lichtblauwe kolom onder de x-as representeert de extra kosten voor de import van grotere volumes ammoniak ten opzichte van het referentiealternatief. Dit komt doordat er meer conversieverlies is in het alternatief 'ammoniak kraken in de haven' dan in het referentiealternatief. In het alternatief 'ammoniak kraken in de haven' wordt namelijk het volledige geïmporteerde volume waterstofdrager bij aankomst in de haven opgeslagen én geconverteerd. In de gehanteerde systematiek neemt vanwege het conversieverlies het te importeren volume toe en daarmee ook de kosten.

Het is belangrijk om te vermelden dat kosten gemaakt in het referentiealternatief als baten worden weergegeven bij de andere alternatieven. Andersom geldt hetzelfde: kosten die niet in het referentiealternatief worden gemaakt maar wel bij de andere alternatieven worden weergegeven als kosten (effecten onder de x-as). Zo zien we dat de effecten voor spoor en binnenvaart positief zijn bij de alternatieven waar buisleidingen gebruikt worden. Er worden namelijk kosten gemaakt voor spoor en binnenvaart in het referentiealternatief en daarom worden diezelfde kosten in de alternatieven waar buisleidingen worden gebruikt als baten weergegeven. Andersom zien we dat er kosten voor buisleidingen zijn bij de alternatieven waar buisleidingen gebruikt worden. Het effect van de kosten voor de lekkage van waterstof (H_2) is zeer klein en daardoor nauwelijks zichtbaar in de alternatieven waar waterstofbuisleidingen worden gebruikt ('ammoniak kraken in de haven' en 'LOHC's kraken in de haven').

5.2.3 Monitorings- en veiligheidskosten

Bij het transport van gevaarlijke stoffen zoals ammoniak en LOHC moeten er veiligheidsmaatregelen getroffen worden. In dit onderzoek nemen wij aan dat er geen extra monitorings- en/of veiligheidskosten zijn bij het transport van LOHC (DBT). De stofgroep LOHC verschilt niet veel van bestaande koolwaterstoffen die veel vervoerd worden. Daarom veronderstellen wij dat er geen extra maatschappelijke kosten zijn om veilig transport van LOHC te waarborgen. In de verschillende alternatieven zal het transport van ammoniak naar verhouding enorm toenemen ten opzichte van de huidige praktijk. Als gevolg hiervan is in de uitvoering een intensivering van veiligheidsmaatregelen nodig. In figuur 12 zijn de resultaten van het aspect 'monitorings- en veiligheidskosten' weergegeven.



Figuur 12 **Resultaten – Monitorings- en veiligheidskosten. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

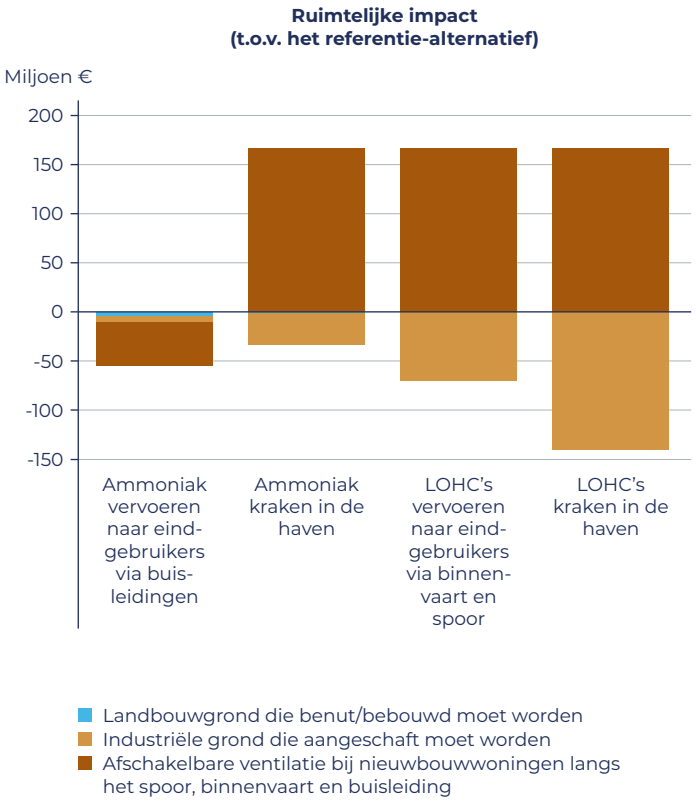
Omdat in het referentiealternatief veel kosten moeten worden gemaakt voor de training van hulpdiensten, toont de figuur voor de alternatieven 'ammoniak kraken in de haven', 'LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor' en 'LOHC's kraken in de haven' maatschappelijke baten (dus een positief effect ten opzichte van het referentiealternatief).

De kosten voor de training van hulpdiensten hebben het grootste aandeel in de totale monitorings- en veiligheidskosten. In bijlage B.3.2 staan de onderliggende aannames die we hebben gebruikt bij het berekenen van deze kosten. Een belangrijke aanname is dat deze training en uitbreiding gericht is op calamiteiten met ammoniak. Omdat, zoals eerder aangegeven, de intensiteit van het transport ten opzichte van nu aanzienlijk zal toenemen, stijgen ook de hiermee samenhangende maatschappelijke kosten in de hulpverleningskolom, veiligheidsregio's, GGD, politie, etc. In het scenario 'ammoniak kraken in de haven' gaan we ervan uit dat minder veiligheidsregio's getraind hoeven te worden, omdat de ammoniak zich alleen in en rond de haven bevindt en niet over het gehele tracé. We kiezen hiervoor omdat in dit alternatief alleen in de haven met ammoniak wordt gewerkt. Hierdoor hoeven minder veiligheidsregio's zich voor te bereiden op incidenten met ammoniak. Voor het alternatief 'ammoniak vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen' rekenen we dezelfde kosten als in het referentiealternatief.

Verder zien we bij de alternatieven met LOHC's nog twee effecten die in dit geval ontbreken: monitoringskosten bij ammoniak en opschaling van de capaciteit van de hulpdiensten. Vanwege de toename van het vervoer van ammoniak zullen deze diensten significant moeten 'meegroeien'. Het faciliteren van een expertcentrum voor ammoniak is hierbij voorzien om die inspanningen te bundelen. De baten in deze alternatieven zijn opnieuw kosten die wel worden gemaakt in het referentiealternatief, maar niet in de LOHC-alternatieven. In bijlage B.3.2 wordt toegelicht waarom we deze kosten meenemen en hoe ze berekend worden.

5.2.4 Ruimtelijke impact

In deze paragraaf bespreken we de resultaten op het aspect 'ruimtelijke impact'. Onder ruimtelijke impact scharen we drie kosten en/of baten; 1) de landbouwgrond die benut of bebouwd moet worden bij de aanleg van infrastructuur, 2) de industriële grond die aangeschaft moet worden voor de bouw van infrastructuur en 3) de beschermingsmaatregel voor huizen langs het spoor, de binnenvaart en ammoniakbuisleidingen. Hiermee bedoelen wij een *centraal afsluitbaar ventilatiesysteem*, wat verder gaat dan de wetgeving van het Besluit Bouwwerken Leefomgeving (BBL, Artikel 4.124) die verordonneert dat het systeem handmatig kan worden uitgeschakeld (dat de aanzuiging stopt), zonder de eis dat inlaat en uitlaat echt sluiten In figuur 13 zijn de resultaten van het aspect 'ruimtelijke impact' weergegeven. Als gevolg van beleidsmatige aspecten is de ruimtelijke impact voor toxische verspreiding bij spoor een factor 5 kleiner dan bij de buisleiding (300 m versus 1.500 m). Hierdoor zijn de kosten bij de buisleiding hoger.



Figuur 13 **Resultaten – Ruimtelijke impact. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

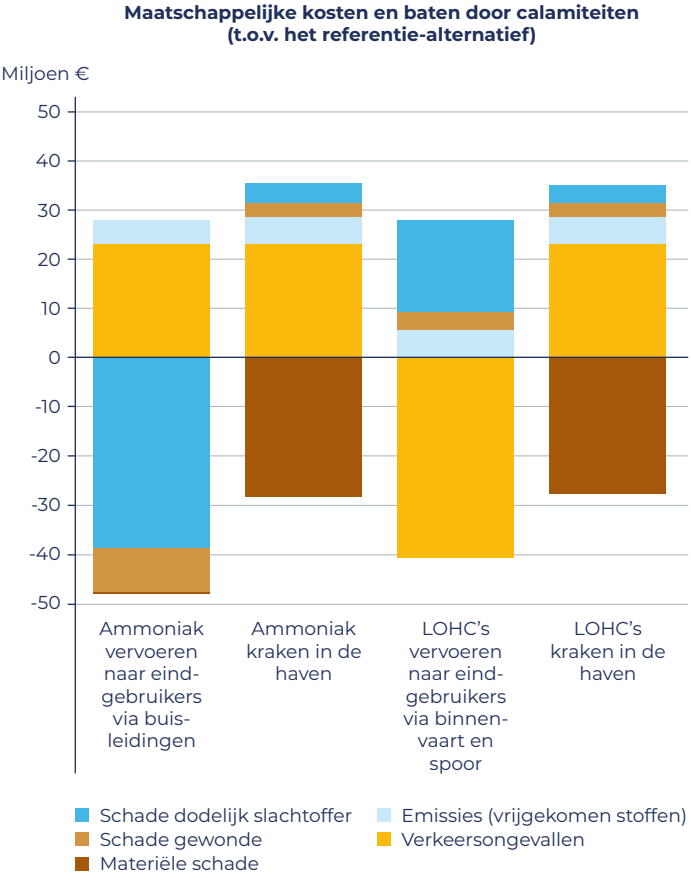
Drie alternatieven hebben aanzienlijke baten ten opzichte van het referentiealternatief. Dit is toe te rekenen aan één variabele: 'een centraal afsluitbaar ventilatiesysteem bij nieuwbouwwoningen langs het spoor, de binnenvaart en buisleiding'. Regelgeving geeft aan dat het bij bestaande woningen niet verplicht is om dergelijke maatregelen door te voeren. Daardoor zijn bestaande woningen niet meegenomen in de berekening van dit effect. Wij nemen aan dat deze kosten wel gemaakt worden in het referentiealternatief en het alternatief waarbij ammoniak wordt vervoerd naar eindgebruikers via buisleidingen.

In de huidige RBM II-rekenmethodiek wijzigen de 10-6 contouren niet significant bij het transport van grote volumes ammoniak over het spoor en de binnenvaart. Wij hebben bedenkingen bij de geschiktheid van de RBM II-methode voor het bepalen van contouren bij de transportvolumes waarvan sprake is in dit onderzoek. Ook het RIVM heeft hier twijfels over uitgesproken. Wanneer de methode aangepast wordt, kan dit tot andere resultaten leiden. We zijn ons ervan bewust dat voor berekeningen rondom rangeerterreinen en/of stationsgebieden, waar zogenaamde specifieke vervoersactiviteiten plaatsvinden zoals het wisselen van tractie, samenstellen van treinen en kopmaken, het programma Safeti-NL het voorgeschreven rekenpakket is voor het berekenen van de risico's. In dit onderzoek zijn geen verkennende berekeningen gemaakt met Safeti-NL.

De effecten van het aanschaffen of bebouwen van grond zijn kleiner dan de kosten die gepaard gaan met de hierboven beschreven maatregel.

5.2.5 Calamiteiten

Bij de opslag, conversie en het transport van waterstofdragers kunnen er calamiteiten optreden. In deze studie berekenen we de maatschappelijke kosten van deze calamiteiten. In figuur 14 zijn de resultaten van het aspect 'calamiteiten' weergegeven.



1) Een tonkilometer is de uniforme meeteenheid voor de vervoersprestatie, overeenkomend met de verplaatsing van een ton lading (1000 kg) over een afstand van 1 km.

Figuur 14 **Resultaten – Calamiteiten. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

In de figuur is te zien dat alle alternatieven op totaalniveau weinig verschillen ten opzichte van het referentiealternatief. Wel is helder dat de aard van de kosten voor calamiteiten verschilt.

Verder heeft het alternatief 'ammoniak vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen' meer kosten voor de variabele 'schade dodelijk slachtoffer'. Dit is opvallend omdat in de publieke opinie buisleidingen over het algemeen veiliger worden

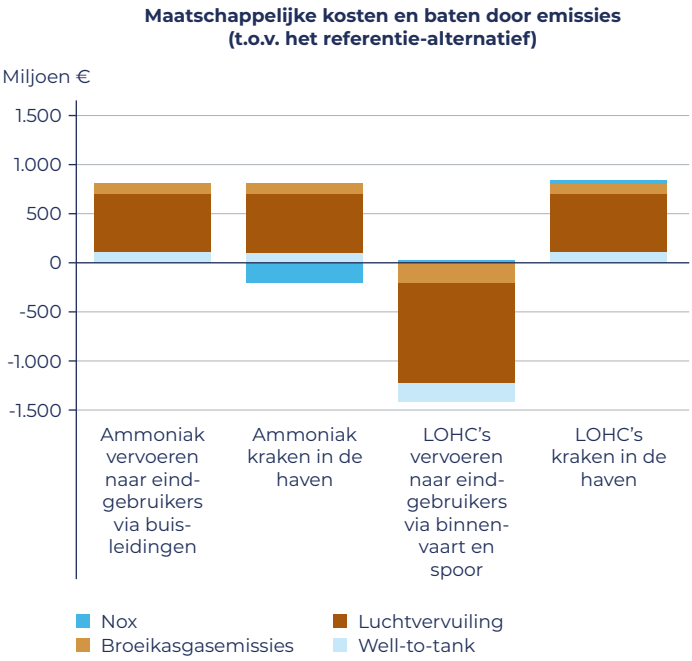
geschat dan het vervoer via het spoor en de binnenvaart, zoals in het referentiealternatief (hetgeen op basis van faalcijfers ook juist is, echter een calamiteit met een buisleiding heeft een grotere impact, wat resulteert in een groter risico).
De kosten voor de buisleidingen zijn overgenomen van het onderzoek van de MKBA over de Delta Rijn Corridor (zie bijlage B.2.3). Wij houden dus niet expliciet rekening met extra veiligheidsmaatregelen. Wel hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waar we de kosten van ammoniakbuisleidingen flink laten oplopen als mogelijk gevolg van het nemen van extra veiligheidsmaatregelen (zie paragraaf 5.4). Bij buisleidingen komen net als bij de andere modaliteiten incidenten voor. De koepelorganisatie VELIN vermeldt op haar website de incidenten in jaarlijkse overzichten.

De reden dat het alternatief 'ammoniak vervoeren naar eindgebruikers via buisleidingen' hogere kosten heeft, is dat bij dit alternatief het risico bestaat dat de drukstations falen. Deze calamiteit kan ook voorkomen bij (compressoren voor) het transport van gasvormige waterstof of aardgas. Echter, doordat er (toxische) ammoniak door het pompstation gaat, leidt een incident hier tot extra gevaar en mogelijke slachtoffers in vergelijking daarmee.

Tot slot zien we twee bruine kolommen (verwachte materiële schade) bij de alternatieven 'ammoniak en LOHC's kraken in de haven'. Dit komt doordat er in deze alternatieven gasvormige waterstof getransporteerd wordt via buisleidingen. Buisleidingen zijn kostbaar en daardoor veroorzaken calamiteiten relatief veel materiële schade.

5.2.6 Emissies

Bij opslag, conversie en het transport van waterstofdragers treden verschillende emissies op. In figuur 15 zijn de resultaten van het aspect 'emissies' weergegeven.



1) Een tonkilometer is de uniforme meeteenheid voor de vervoersprestatie, overeenkomend met de verplaatsing van een ton lading (1000 kg) over een afstand van 1 km.

Figuur 15 **Resultaten – Emissies. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

De figuur hierboven laat twee opvallende dingen zien. Ten eerste dat drie alternatieven baten (of vermeden kosten) hebben ten opzichte van het referentiealternatief. In deze alternatieven wordt een buisleiding als modaliteit gebruikt. Hierdoor zijn er minder broeikasgasemissies en luchtvervuiling[9] ten opzichte van het referentiealternatief.

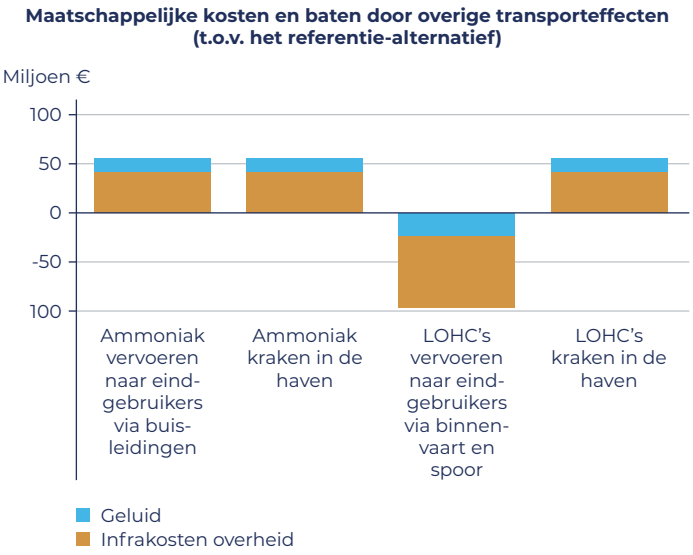
In het alternatief 'ammoniak kraken in de haven' zien we dat de kosten door de emissie van NO_x groter zijn dan in het referentiealternatief. Dit is het gevolg van de grote volumes ammoniak die worden geconverteerd naar gasvormige waterstof. Bij conversie van ammoniak naar gasvormige waterstof komt stikstof (NO_x) vrij.

Het effect 'well-to-tank'[10] is in elk alternatief klein.

9 Onder luchtvervuiling scharen we verschillende emissies van stoffen zoals fijnstof en NO_2 (stikstofdioxide).
10 Hiermee worden de emissies bedoeld die vrijkomen bij de productie en het transport van de brandstof'.

5.2.7 Overige transporteffecten

Bij het transport van de waterstofdragers kunnen naast emissies en calamiteiten nog andere transporteffecten optreden. Dit betekent dat we de maatschappelijke kosten als gevolg van geluid bij kraakinstallaties van ammoniak en LOHC negeren. In figuur 16 zijn de resultaten van het aspect 'overige transporteffecten' weergegeven.



1) Een tonkilometer is de uniforme meeteenheid voor de vervoersprestatie, overeenkomend met de verplaatsing van een ton lading (1000 kg) over een afstand van 1 km.

Figuur 16 **Resultaten – Overige transporteffecten. Range y-as en kleuren kolommen kunnen per figuur verschillen.**

Het alternatief 'LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor' heeft als enige alternatief forse kosten ten opzichte van het referentiealternatief. De reden hiervoor is dat, net als bij de aspecten calamiteiten en emissies, in dit alternatief veel tonkilometers worden gemaakt.

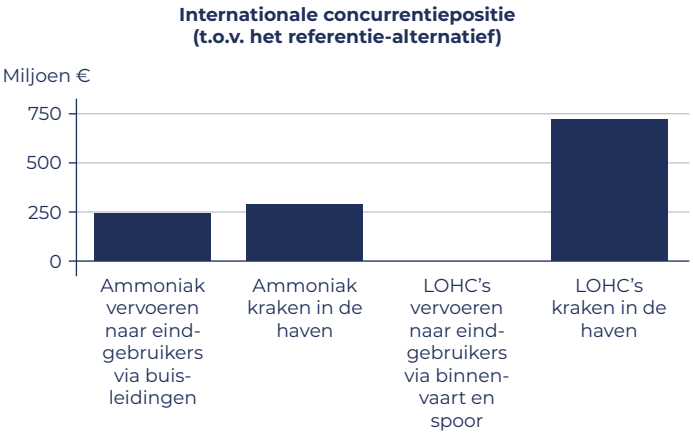
Andere alternatieven hebben kleine baten (of vermeden kosten) in vergelijking met het referentiealternatief. Dit komt doordat in deze alternatieven buisleidingen worden gebruikt voor het transport van de waterstofdragers. Buisleidingen hebben geen kosten voor de aspecten 'geluid' en 'infrakosten overheid'.

5.2.8 Internationale concurrentiepositie

De beschikbaarheid van infrastructuur in Nederland kan leiden tot een aantrekkelijk vestigingsklimaat voor bedrijven, waardoor ze zich in Nederland willen (blijven) vestigen. Het ene alternatief is in dat opzicht aantrekkelijker dan het andere. Wij nemen aan dat met name ketens waarbij infrastructuur is aangelegd om doorvoer van waterstofdragers te faciliteren, aantrekkelijker zijn dan alternatieven waarbij geen infrastructuur is aangelegd. Omdat we er in alle alternatieven van uitgaan dat sprake is van een landelijk waterstofnetwerk, vormt de waarde hiervan geen onderscheidend criterium.

In dit onderzoek hanteren we die vuistregel en hanteren we een opslag van 15% op de directe baten van een alternatief ten opzichte van het referentiealternatief voor die ketens waarbij sprake is van aanleg van infrastructuur.[11] Voor het alternatief 'LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor' rekenen we geen verbetering in internationale concurrentiepositie ten opzichte van het referentiealternatief, omdat deze alternatieven alleen in waterstofdrager van elkaar verschillen en we daar geen voordeel in concurrentiepositie kunnen onderscheiden.

In figuur 17 zijn de resultaten van het aspect 'internationale concurrentiepositie' weergegeven. Het verschil tussen de kolommen representeert het verschil in baten (dus niet kosten én baten) van de alternatieven ten opzichte van het referentiealternatief.



Figuur 17 **Resultaten – Internationale concurrentiepositie. Range y-as kan per figuur verschillen.**

11 In de leidraad OEI indirecte effecten (Elhorst et al. 2004) is een advies opgenomen: "Blijf de directe kosten en baten centraal stellen, omdat de additionele indirecte baten meestal niet kleiner of groter zijn dan 0% tot 30% van de directe baten." De vuistregel die hieruit volgt en veel gebruikt wordt in de MKBA-methodologie, is om een opslag voor indirecte effecten van tussen de 0% en 30% te hanteren.

5.2.9 Niet gemonetariseerde effecten

Een aantal effecten kunnen we niet goed monetariseren. Hieronder beschrijven we deze effecten kwalitatief.

5.2.9.1 Veiligheidsbeleving

Naast objectieve veiligheid bestaat ook het fenomeen veiligheidsbeleving, in de wetenschap vaak risicoperceptie genoemd. Onderzoek heeft aangetoond dat risicoperceptie van zeer veel omstandigheden afhankelijk is.[12]

Voor het vervoer van gevaarlijke stoffen zijn geen uitgebreide onderzoeken gedaan om de risicoperceptie te kwantificeren. Daarom moeten we terugvallen op het effect in vergelijkbare situaties. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat huizenprijzen in het risicogebied voor aardbevingen, ondanks compensatie voor geleden schade, gemiddeld zo'n 2% daalden in vergelijking met prijzen voor vergelijkbare woningen waar dit risico niet speelde. Tegelijkertijd toont ander onderzoek aan dat klimaatrisico's nog niet zijn verrekend in de huizenprijzen.[13] Dit sluit aan bij wat in de leidraad Veiligheid in Maatschappelijke Kosten-Batenanalyse staat: mensen voelen zich kwetsbaar wanneer er net een bepaalde ramp gebeurd is, maar dit effect neemt in de loop van de tijd weer af.

We hebben geprobeerd het effect op de veiligheidsbeleving te kwantificeren en te monetariseren. Hiervoor zijn we in gesprek gegaan met makelaars die werken in gebieden nabij de tracés van gevaarlijke stoffen om hun te vragen wat naar verwachting de impact is van additioneel vervoer van gevaarlijke stoffen op de huizenprijs. Enkele ondervraagde makelaars gaven aan geen signalen uit de markt te ontvangen dat additioneel vervoer van stoffen zoals ammoniak en LOHC een drukkende werking zouden hebben op de huizenprijs.

Tijdens de klankbordgroepen van dit onderzoek is duidelijk geworden dat er ook zorgen bestaan over veiligheidsrisico's voor ammoniakvervoer per buisleiding. Desondanks verschilt – al dan niet terecht – bij veel betrokkenen de perceptie van de veiligheid van ammoniakvervoer per spoor en binnenvaart en die van ammoniakvervoer per buisleiding, in het voordeel van de buisleidingen.[14]

5.2.9.2 Maatschappelijke ontwrichting

Naar verwachting kan met name een grootschalig incident met ammoniak leiden tot maatschappelijke ontwrichting. Daarbij kan een gifwolk ontstaan die lang aanhoudt (door plasvorming die dan langzaam uitdampt). Dit zou bij grote volumes (buis) zelfs dagen kunnen duren. De volumes die vrijkomen bij een incident met een binnenvaartschip of ketelwagen zijn kleiner.

Het bedoelde type incident kan een enorm beroep doen op regionale medische zorg en ondersteuning, zodanig dat regionale ziekenhuizen niet eens in staat zullen zijn deze medische ondersteuning te leveren. De brandweer zal alleen personen in regio's kunnen evacueren in plaats van de calamiteit bij de bron te bestrijden. Hoe groot de impact daarvan is, is vooralsnog feitelijk niet te kwantificeren, mede omdat de kans zeer klein is en de impact sterk afhankelijk van de precieze locatie van het incident.

5.2.9.3 Beveiligingsmaatregelen

De internationale vervoerschriften ADR (weg), ADN (binnenvaart) en RID (Spoorvervoer) omvatten ook instructies met betrekking tot fysieke beveiligingsmaatregelen bij stoffen met een hoog gevarenpotentieel. Ammoniak valt daaronder. Sommige LOHC's vallen ook hieronder, anderen niet (Tolueen en Methylclohexaan wel, maar benzyltolueen bijvoorbeeld niet). Bij deze maatregelen moet worden gedacht aan persoons- en toegangscontrole, informatiebeperkingen, databescherming, etc. De instructies gelden voor bedrijven zoals vervoerders, afzenders, ontvangers en infrabeheerders. De kosten van deze maatregelen zijn niet meegenomen in de studie, maar in de praktijk kunnen deze verschillen tussen de beschouwde ketens, mede afhankelijk van de LOHC's die worden verondersteld.

5.2.9.4 Lokale distributie waterstofdragers

De gehele vraag naar waterstofdragers in Nederland zal niet bij één eindgebruiker liggen maar bij tientallen en misschien nog wel meer. De waterstofdragers zullen in de praktijk tot op het terrein van de eindgebruiker getransporteerd worden. In dit onderzoek rekenen we niet de maatschappelijke kosten en baten door van de lokale distributie van de waterstofdragers. Met lokale distributie bedoelen we de laatste kilometers richting de kleinere eindgebruikers.

De vraag bij welk alternatief de lokale distributie het beste maatschappelijke effect heeft, is situatieafhankelijk en valt dus op voorhand niet exact aan te geven. De locatie van de eindgebruiker is hierin een belangrijke variabele. In sommige gevallen ligt het waterstofnetwerk dichtbij en in andere gevallen

12 M. Zonneveld, Verkenning thema veiligheidsbeleving van vervoer van gevaarlijke stoffen, RIVM.
13 ABN AMRO, Is flood risk already affecting house prices: Lessons learned from an impact assessment study in the Netherlands, 2002.
14 Zie bijlage B.2.3 voor een beschrijving van de veiligheidsrisico's van ammoniakbuisleidingen.

juist ver van het spoor of het binnenwater. Bij alternatief 2, een ammoniakbuisleiding, is vermoedelijk echter sprake van slechts één leiding. Lokale distributie zal bij deze variant naar verwachting dus duurder zijn.

5.2.10 Brede welvaart

Het is bekend dat bepaalde aspecten in een MKBA niet nadrukkelijk terugkomen. Zo heeft een MKBA alleen betrekking op Nederland en wordt niet gekeken naar verdelingsvraagstukken. Het verdient dan ook aanbeveling om deze aspecten wél kwalitatief te beschouwen. In deze paragraaf doen we dat voor de door ons uitgevoerde MKBV.

5.2.10.1 Risico's op de lange termijn: stranded assets & lock-in situaties

Stranded assets & lock-in situaties zijn ook aspecten die we in het kader van brede welvaart beschouwen. Op de lange termijn wordt een grotere rol voorspeld voor (vloeibare) waterstof in het Nederlandse energiesysteem. De investeringen die voor die tijd worden gedaan in waterstofdragers, zijn hierdoor mogelijk niet terug te verdienen. Voor lock-in situaties geldt dat de keuze voor een bepaalde keten zorgt voor een afhankelijkheid van diezelfde keten, waardoor het verder ontwikkelen van alternatieven bemoeilijkt wordt. Het risico van stranded assets & lock-in situaties speelt voornamelijk bij ketens waarvoor infrastructuur met een lange levensduur moet worden aangelegd. In de vergelijking die wij maken, speelt dit met name wanneer ammoniakbuisleidingen moeten worden aangelegd of wanneer wordt geïnvesteerd in krakers voor ammoniak of LOHC-dehydrogenatie-installaties.

5.2.10.2 Effect op intergenerationele verdeling van welvaart

Op zichzelf leidt het aanleggen van waterstofinfrastructuur mogelijk tot veranderingen in de intergenerationele verdeling van de welvaart, bijvoorbeeld doordat maatschappelijke kosten op korte termijn worden gemaakt en op lange termijn sprake is van maatschappelijke baten. Bij deze MKBV is de vraag aan de orde hoe de intergenerationele verdeling van welvaart tussen de ketens verschilt. Wij zien geen aanleiding om te veronderstellen dat er sprake is van grote verschillen tussen ketens op de intergenerationele verdeling van welvaart.

5.2.10.3 Effect op de verdeling van welvaart tussen bevolkingsgroepen

De negatieve externe effecten van waterstofdoorvoer slaan in het referentiealternatief en in alternatief 4 (LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor) mogelijk neer bij specifieke bevolkingsgroepen. Veiligheidsrisico's zijn met name aanwezig rond het spoor, langs de binnenvaart en nabij buisleidingen. De bevolking in de nabijheid van zo'n tracé ondervindt dan de negatieve (externe) effecten. Het is lastig te bepalen of verschillende bevolkingsgroepen (bijvoorbeeld lage, midden- of hoge inkomens) verschillende effecten ervaren.

5.2.10.4 Grensoverschrijdende effecten

Grensoverschrijdende effecten spelen bij de uitgevoerde vergelijking een belangrijke rol. Economische voordelen van de waterstofdoorvoer door Nederland komen veelal in het buitenland (Duitsland en België) terecht, terwijl de negatieve externe effecten grotendeels in Nederland landen. In die zin is het verstandig om als Nederland bij het maken van beleidskeuzes rekening te houden met de negatieve externe effecten en niet louter naar de economisch meest voordelige keten te kijken. In onze vergelijking hebben we de economische kosten voor doorvoer niet bij het Nederlandse saldo laten meetellen en alle externe effecten wel.

Wel kan het hebben van infrastructuur Nederland aantrekkelijker maken voor bedrijven om zich in Nederland te vestigen. Dit effect hebben we door middel van een opslag van 15% op de directe baten al in de kwantitatieve vergelijking opgenomen.

5.2.10.5 Stikstofemissies bij verbranding

In de literatuur is er veel minder onderzoek gedaan naar NO_x-emissies bij de verbranding van ammoniak dan bij de verbranding van waterstof. Het is daarom nog te vroeg om conclusies te trekken over mogelijke reductiemogelijkheden of emissieniveaus bij de verbranding van ammoniak. Uit de literatuur blijkt wel aan dat de verbranding van ammoniak problematischer is dan die van waterstof omdat ammoniak van zichzelf al veel stikstof bevat.[15]

15 TNO. Waterstofverbranding en stikstofemissies (2023).

5.3 Overzicht niet-gemonetariseerde effecten en aspecten in het kader van brede welvaart

Hieronder hebben we een inschatting gegeven van de niet-gemonetariseerde effecten ten opzichte van het referentiealternatief.

Effect	Alternatief 2: Ammoniak vervoeren via buisleidingen	Alternatief 3: Ammoniak kraken in de haven	Alternatief 4: LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor	Alternatief 5: LOHC's kraken in de haven
Veiligheidsbeleving	+	++	+	++
Maatschappelijke ontwrichting bij een calamiteit	-	+	+	+
Beveiligingsmaatregelen	0	0	0/+	0/+
Lokale distributie waterstof	-	0	0	0
Risico's op de lange termijn: stranded assets & lock-in situaties	-	-	0	-
Effect op de verdeling van welvaart tussen bevolkingsgroepen	+	+	0	+
Stikstofemissies bij verbranding	0	+	+	+

5.4 Gevoeligheidsanalyse

Via enkele gevoeligheidsanalyses willen wij inzicht krijgen op het effect van de verandering van een aanname op het resultaat van het onderzoek. We doen een gevoeligheidsanalyse voor de volgende aannames:

- **Volume (-50%; +100%).** In de analyses wordt uitgegaan van het volume aan waterstofdragers uit variant 2 van de studie *Omgevingsveiligheid toekomstige stromen waterstofdragers*. Via de gevoeligheidsanalyse willen inzicht krijgen op de mate waarin de maatschappelijke kosten en baten veranderen in geval van een verdubbeling en een halvering van deze volumes.

- **Economische kosten (-50%; +100%)**. Voor de economische kosten maken we gebruik van inschattingen en aannames. We rekenen door wat het effect is wanneer de economische kosten veel hoger of juist veel lager uitvallen. De externe kosten houden we in deze gevoeligheidsanalyse gelijk.

- **Importprijzen ammoniak en LOHC (-50%; +100%)**. Voor de importprijzen van ammoniak en LOHC gaan we uit van een specifieke prijs die per jaar verschilt. We rekenen in de gevoeligheidsanalyse door wat het effect is wanneer de prijzen voor ammoniak en LOHC halveren dan wel verdubbelen.

- **Grijze en blauwe versus groene waterstof.** In de analyses wordt ervan uitgegaan dat de waterstof(dragers) op duurzame manier (groen) zijn geproduceerd. Dit is immers de intentie van de energie- en grondstoffentransitie. We willen inzicht krijgen op de mate waarin de maatschappelijke baten dalen wanneer de waterstofdragers met fossiele energie (grijs) worden geproduceerd, eventueel met CCS (blauw). Hierbij zijn ook de broeikasgasemissies over de volledige keten van belang. We hanteren een CO_2-productie van 10 kilogram per kilogram grijze waterstof. Voor blauwe waterstof hanteren we een afvangpercentage van 90%. De waterstof wordt buiten Nederland gemaakt, dus in de praktijk komen de emissies die vrijkomen bij de productie van de waterstofdragers terecht in het buitenland. Voor deze gevoeligheidsanalyse rekenen we de kosten van de emissies echter toe aan Nederland.

- **Adressendichtheid (-50%; +100%).** In dit onderzoek hanteren we een representatief tracé. Dit betekent dat we voor de bevolkingsdichtheid voornamelijk gemiddelde

waardes nemen. Om een inzicht krijgen op het effect van transport van waterstofdragers door dicht- of dunbevolkt gebied halveren én verdubbelen we de adressendichtheid.

- **Kosten ammoniakbuisleiding (+200%; +500%).** Voor de kosten van de ammoniakbuisleiding maken we gebruik van de MKBA van de Delta Rijn Corridor.[16] In Nederland is nog geen ervaring met de aanschaf, de aanleg en het operationeel zijn van grote ammoniak-buisleidingen. Doordat Nederland dichtbevolkt is kunnen de kosten van dergelijke ammoniakbuisleidingen hoger uitvallen als gevolg van strenge veiligheidseisen. In de gevoeligheidsanalyse rekenen we het effect door van hogere kosten voor de ammoniakbuisleiding.

- **Modal shift (alleen spoor, alleen binnenvaart, wegvervoer LOHC).** In dit onderzoek wordt in twee alternatieven de waterstofdrager via het spoor én de binnenvaart vervoerd. Via deze gevoeligheidsanalyse willen we inzicht krijgen op het effect wanneer de waterstofdrager alleen via het spoor óf alleen via de binnenvaart naar de eindgebruiker wordt vervoerd. Daarnaast rekenen we ook het effect door als in het alternatief 'LOHC's vervoeren via binnenvaart en spoor' wegvervoer eveneens onderdeel is van de modaliteitsmix.

- **Amoveren woningen (1%; 5%).** De grote volumes ammoniak die getransporteerd worden, gaan langs huizen die soms dicht tegen de transportroutes gelegen zijn. Het is mogelijk dat met de grote volumes en een wijziging in de RBM II-methodiek de veiligheidscontouren groter worden en daarmee een aantal huizen binnen de veiligheidscontouren valt. Een gevolg kán zijn dat enkele bewoners van de desbetreffende huizen uitgekocht moeten worden. Via deze gevoeligheidsanalyse proberen we een inzicht krijgen op de kosten als gevolg van het amoveren van deze woningen. We gebruiken hiervoor de gemiddelde woningprijs in Nederland.

- **Externe kosten (onder- en bovenwaarde).** Voor het waarderen van externaliteiten worden kengetallen gebruikt (zoals de kosten voor milieuschade, ruimtegebruik en slachtoffers). We rekenen de MKBV ook door, waarbij we voor al deze externaliteiten de onder- en bovenwaardes hanteren. De economische kosten en baten houden we in deze gevoeligheidsanalyse gelijk. De onder- en bovenwaardes staan weergegeven in bijlage B.3.5 en bijlage B.3.6.

Interpretatie resultaten gevoeligheidsanalyse

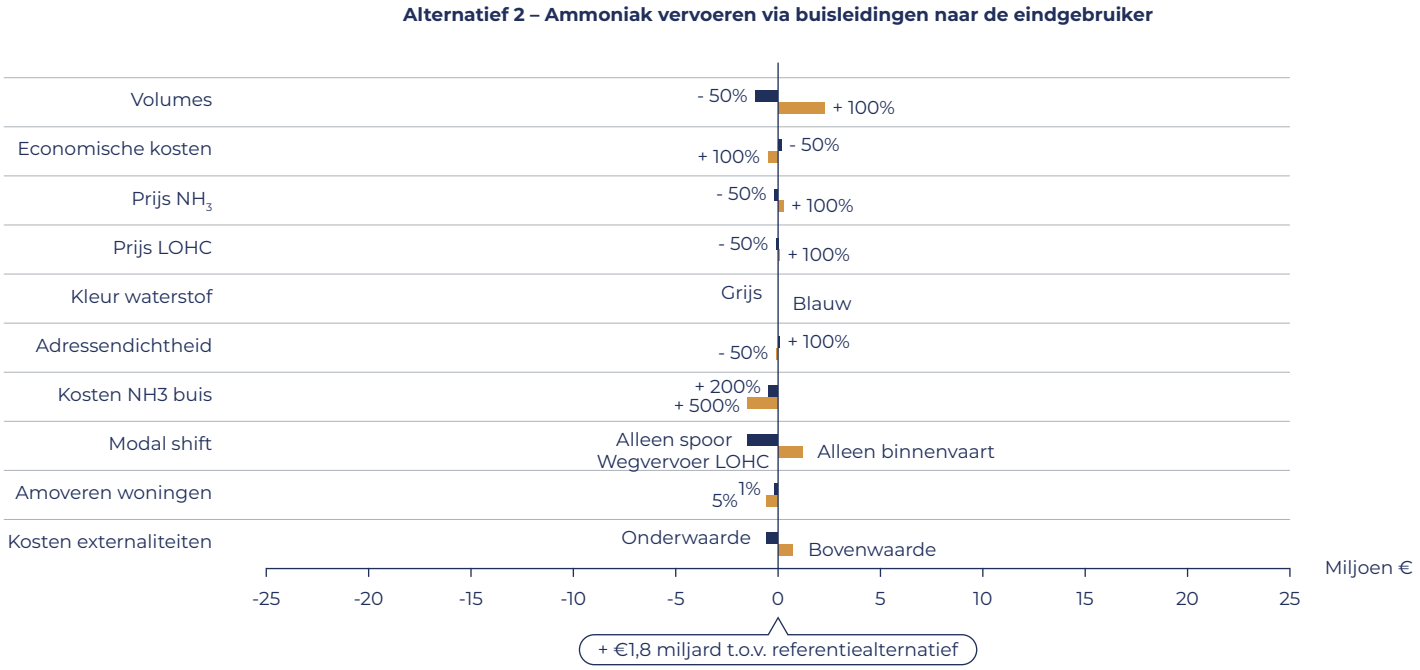
De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden op vergelijkbare wijze gepresenteerd als de resultaten in paragraaf 5.2. Dat wil zeggen dat we altijd de resultaten laten zien ten opzichte van het referentiealternatief. Bij de gevoeligheidsanalyse veranderen we de waarde van één effect. Dit doen we voor het referentiealternatief én voor het specifieke alternatief dat wordt vergeleken met het referentiealternatief. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden in vier grafieken gepresenteerd (één per alternatief). Het is belangrijk om de resultaten in de figuren goed te interpreteren. Ter illustratie daarom een voorbeeld van hoe de resultaten gelezen kunnen worden:

De 0-as in de figuren representeert het verschil in maatschappelijke kosten en baten tussen een specifiek alternatief en het referentiealternatief zoals gepresenteerd in figuur 9 in paragraaf 5.2.1. Voor alternatief 3 (ammoniak kraken in de haven) staat de 0-as dus gelijk aan + 400 miljoen euro. Dit betekent dat dit alternatief 400 miljoen euro minder maatschappelijke kosten heeft dan het referentiealternatief. De gevoeligheidsanalyse waar we economische kosten in zowel het referentiealternatief als het alternatief 'ammoniak kraken in de haven' halveren (-50%) in figuur 19 geeft als resultaat - 700 miljoen euro. We kunnen dus concluderen dat wanneer de economische kosten halveren het alternatief 'ammoniak kraken in de haven' meer maatschappelijke kosten (en dus baten) heeft dan het referentiealternatief (+ 400 miljoen euro minus 700 miljoen euro is kleiner dan 0).

16 MKBA Delta Rhine Corridor Fase 2, link

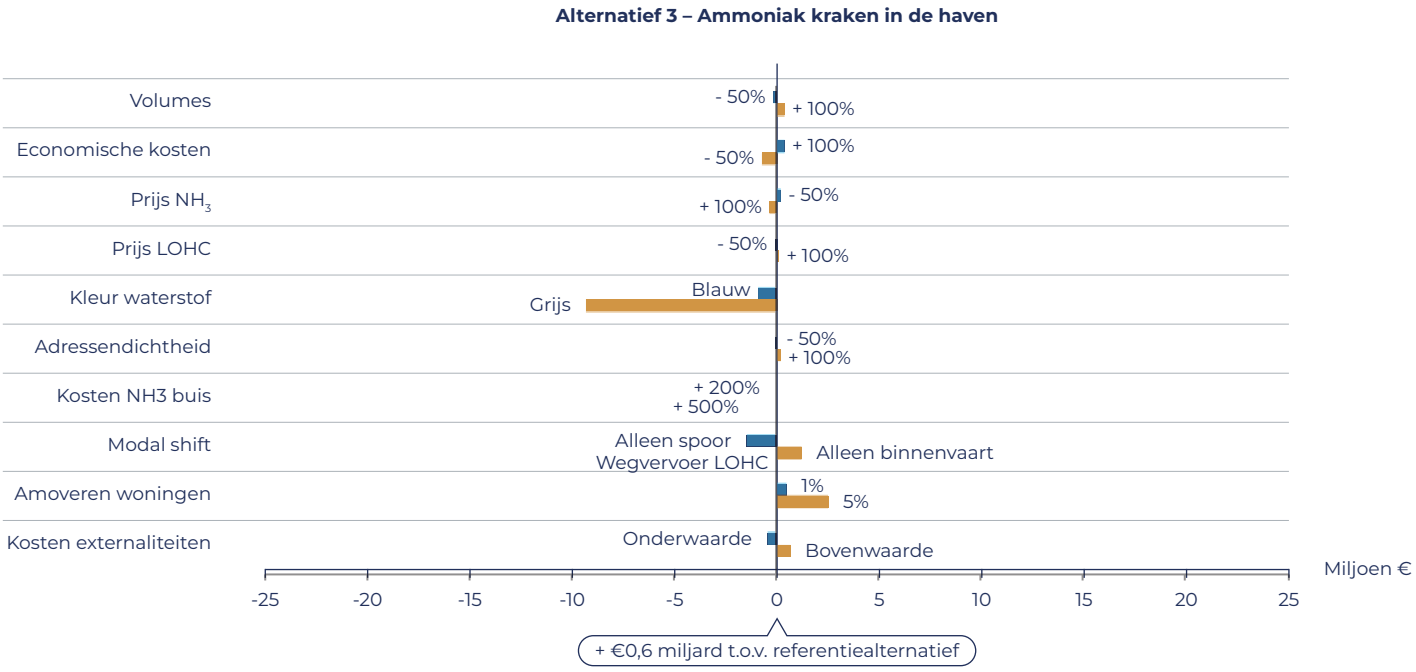
Resultaten gevoeligheidsanalyse

In figuur 18 worden de resultaten weergegeven van de gevoeligheidsanalyse van het alternatief 'ammoniak vervoeren via buisleidingen naar de eindgebruiker'. We zien dat het resultaat van drie effecten het grootst is: volumes, kosten voor de ammoniakbuisleiding en de modal shift. Een verandering in volumes werkt door in de economische kosten, in calamiteiten (meer volumes is meer kans op een incident) maar ook in de ruimtelijke impact. De gevoeligheidsanalyse waarmee we de kosten voor de ammoniakbuisleiding (NH_3-buis) halveren en verdubbelen laat logische resultaten zien. Wanneer de kosten voor de ammoniakbuisleiding stijgen, zullen de maatschappelijke kosten van dit alternatief toenemen ten opzichte van het referentiealternatief. Er is immers geen ammoniakbuisleiding aanwezig in het referentiealternatief. Voor de gevoeligheidsanalyse 'modal shift' laten we de waterstofdrager via één modaliteit transporteren in plaats van dat de volumes verdeeld worden over de twee modaliteiten. Wanneer we al het vervoer over het spoor laten gaan, nemen de maatschappelijke kosten van dit alternatief significant toe. Tegelijkertijd dalen de kosten significant wanneer de binnenvaart volledig verantwoordelijk is voor het transport van ammoniak.



Figuur 18 **Resultaten gevoeligheidsanalyse alternatief 'ammoniak vervoeren via buisleidingen naar de eindgebruiker'.**

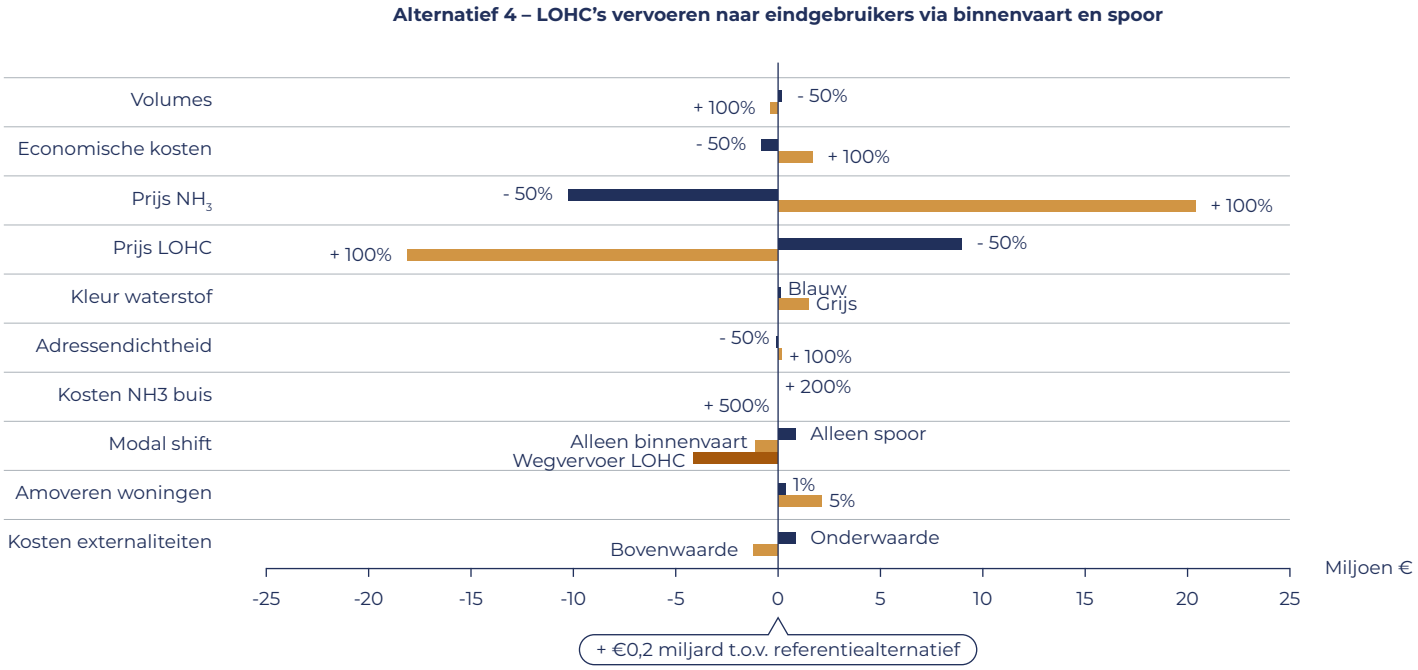
In figuur 19 worden de resultaten weergegeven van de gevoeligheidsanalyse van het alternatief 'ammoniak kraken in de haven'. In de figuur is één grote uitschieter te zien: de maatschappelijke kosten van dit alternatief stijgen significant ten opzichte van het referentiealternatief wanneer we aannemen dat de waterstof die binnenkomt 'grijs' is en de maatschappelijke kosten voor CO_2-uitstoot worden meegerekend. Dit is een logisch gevolg, aangezien in dit alternatief veel meer ammoniak wordt geïmporteerd dan in het referentiealternatief vanwege het conversieverlies in dit alternatief. De waterstof wordt buiten Nederland gemaakt, dus in de praktijk komen de emissies die vrijkomen bij de productie van de waterstofdragers terecht in het buitenland. Voor deze gevoeligheidsanalyse rekenen we de kosten van de emissies echter toe aan Nederland. Zoals eerder benoemd wordt in het alternatief 'ammoniak kraken in de haven' namelijk het volledige geïmporteerde volume waterstofdrager bij aankomst in de haven opgeslagen én geconverteerd. Door de conversie is dus meer ammoniak nodig dan in het referentiealternatief en deze additionele ammoniak leidt, wanneer deze grijs (of blauw) geproduceerd is, tot additionele CO_2-uitstoot.



Figuur 19 **Resultaten gevoeligheidsanalyse alternatief 'ammoniak kraken in de haven'.**

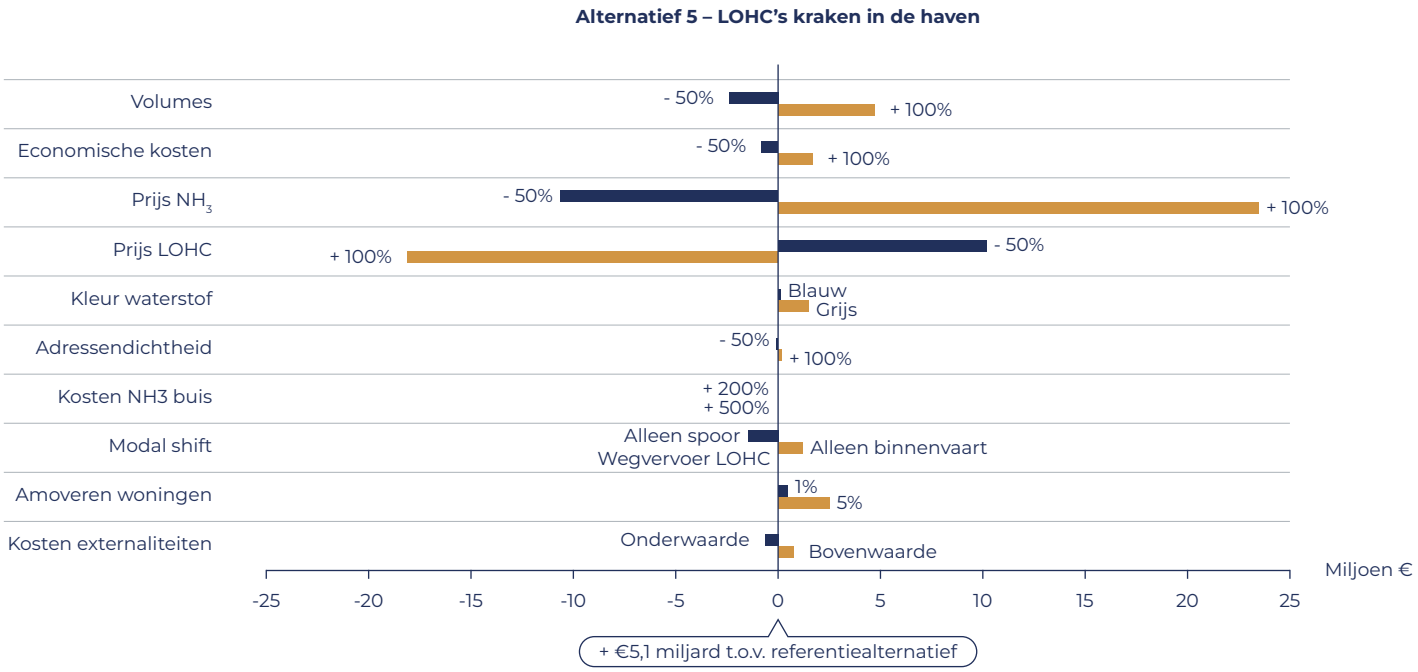
In figuur 20 worden de resultaten weergegeven van de gevoeligheidsanalyse van het alternatief 'LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor'. In de figuur zijn twee uitschieters te zien: bij de importprijzen van zowel ammoniak (NH_3) als LOHC. Doordat we vergelijken met het referentiealternatief vergelijken we voor dit alternatief de import van LOHC met de import van ammoniak. Hierdoor krijgen we de logische resultaten: meer maatschappelijke kosten bij een lage prijs voor ammoniak of een hoge prijs voor LOHC. Andersom geldt hetzelfde: meer maatschappelijke baten bij een hoge prijs voor ammoniak en een lage prijs voor LOHC.

Voor dit alternatief hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd die niet geldt voor de andere alternatieven. Voor dit alternatief hebben we namelijk doorgerekend wat het effect is als LOHC niet alleen via binnenvaart en spoor maar ook via de weg naar eindgebruikers wordt vervoerd. In figuur 20 is te zien dat het wegvervoer van LOHC meer maatschappelijke kosten met zich meebrengt (ongeveer € 3 miljard). De hoge maatschappelijke kosten van wegvervoer van LOHC zijn het gevolg van de kosten door emissies, congestie en verkeersongevallen. De kosten voor emissies, congestie en verkeersongevallen per tonkilometer zijn namelijk hoger voor wegvervoer dan voor spoor of binnenvaart.



Figuur 20 **Resultaten gevoeligheidsanalyse alternatief 'LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor'.**

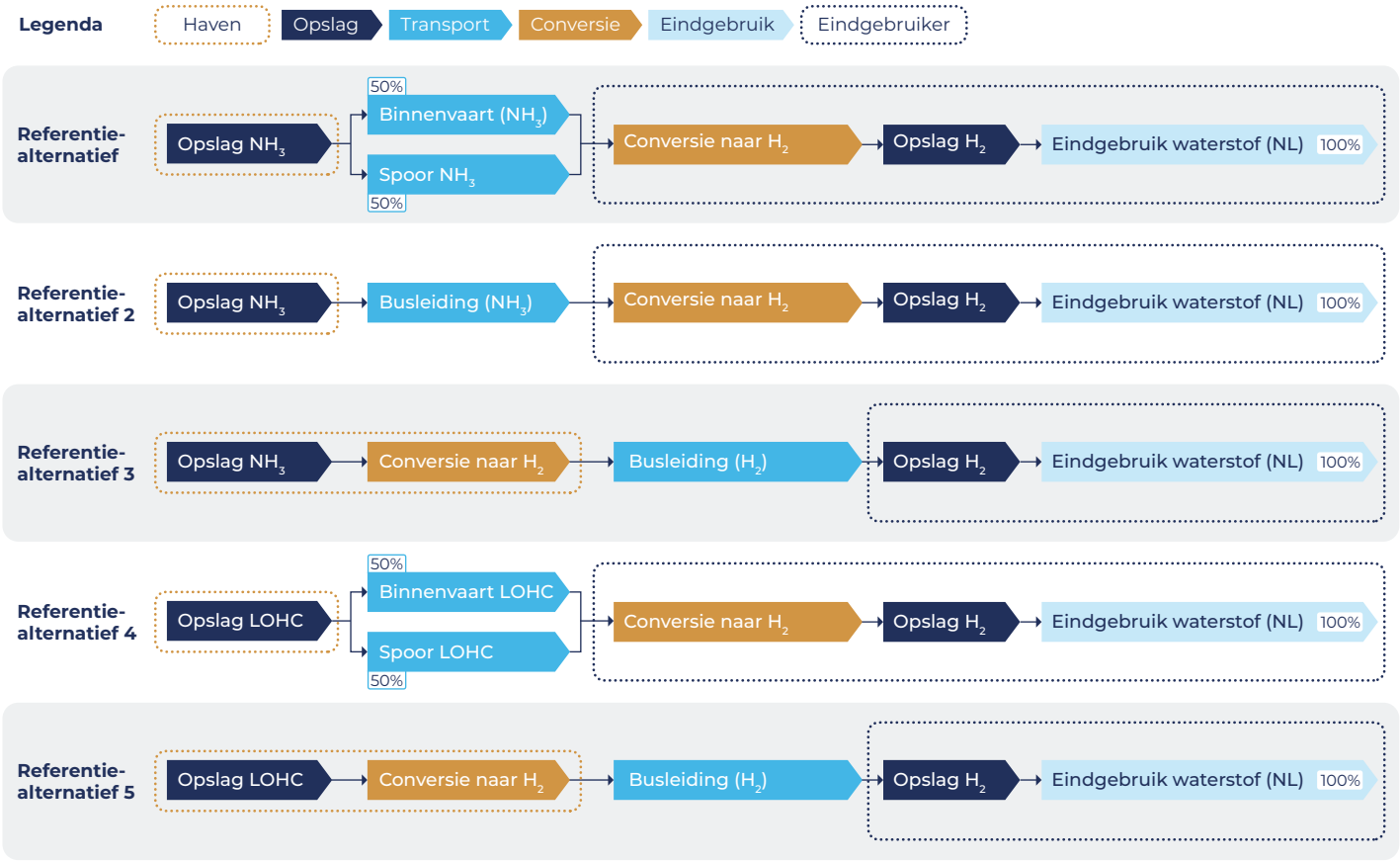
In figuur 21 worden de resultaten weergegeven van de gevoeligheidsanalyse van het alternatief 'LOHC's kraken in de haven'. Net als in figuur 20 zien we in figuur 21 dat er meer maatschappelijke kosten zijn bij een lage prijs voor ammoniak of een hoge prijs voor LOHC. Andersom geldt hetzelfde: meer maatschappelijke baten bij een hoge prijs voor ammoniak en een lage prijs voor LOHC.



Figuur 21 **Resultaten gevoeligheidsanalyse alternatief 'LOHC's kraken in de haven'.**

5.5 Vergelijking zonder directe verbranding van ammoniak

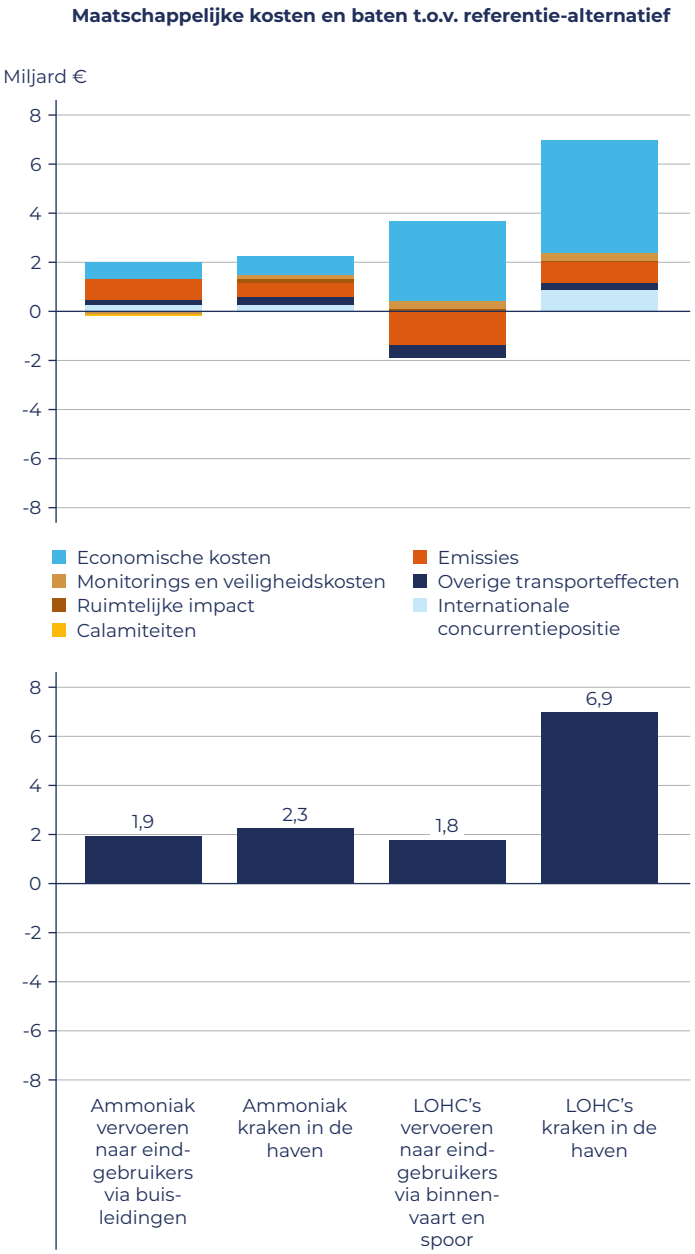
In ons onderzoek is ervoor gekozen directe verbranding van ammoniak als mogelijkheid mee te nemen in het referentiealternatief en in alternatief 2. Gedurende het traject is echter meermaals de vraag opgeworpen wat het resultaat van de analyse is zonder directe verbranding van ammoniak. Die analyse hebben we ook uitgevoerd. Hierbij gaan we ervan uit dat het eindgebruik voor directe verbranding van ammoniak wordt vervangen door conversie naar en verbranding van waterstof.[17] De ketens zien er dan als volgt uit.



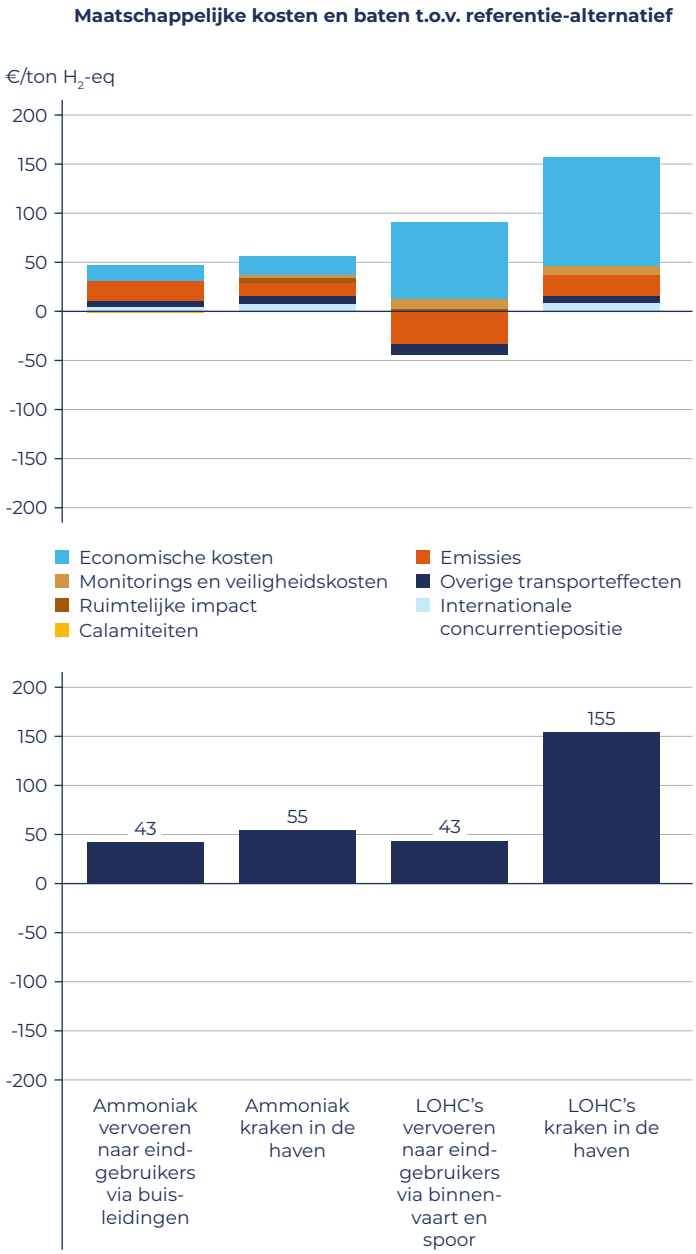
Figuur 22 **Ketens zonder directe verbranding van ammoniak.**

17 We gaan hierbij ook uit van drie in plaats van twee krakers bij eindgebruikers.

We hebben de MKBV-analyse opnieuw uitgevoerd.
Onderstaand overzicht toont het resultaat van deze vergelijking.



Figuur 23 **Resultaten – Volledige ketens in miljard € wanneer geen sprake is van directe verbranding van ammoniak.**



Figuur 24 **Resultaten – Volledige ketens in €/ton H_2-eq wanneer geen sprake is van directe verbranding van ammoniak.**

We zien dat het verschil tussen ammoniak kraken in de haven ten opzichte van het referentiealternatief en LOHC's vervoeren naar eindgebruikers ten opzichte van het referentiealternatief groter is geworden, terwijl het verschil tussen ammoniak vervoeren via buisleidingen ten opzichte van vervoeren via spoor en binnenvaart nagenoeg gelijk is gebleven. Op basis van de gehanteerde aannames laat LOHC's kraken in de haven nog steeds het meest positieve kosten-batensaldo zien.



HOOFDSTUK 6

Conclusies

In dit hoofdstuk presenteren we de belangrijkste conclusies uit dit onderzoek.

Kosten-batensaldo van de alternatieven verschilt niet substantieel

In dit onderzoek hebben we vijf ketens met elkaar vergeleken. De maatschappelijke kosten en baten van deze vijf alternatieve ketens verschillen licht van elkaar. Omgerekend gaat het om een verschil van ongeveer 11 eurocent per kg waterstof tussen het alternatief 'LOHC's kraken in de haven' (het best scorende alternatief) en het referentiealternatief (ammoniak vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor). Op een waterstofprijs van enkele euro's is dat weinig. Wanneer de importprijs van bepaalde dragers hoger of lager uitvalt, kan dit ertoe leiden dat een ander alternatief het beste kosten-batensaldo heeft. Zeker wanneer we rekening houden met de grote onzekerheden waarmee de vergelijking gepaard gaat en de grote hoeveelheid aannames die gedaan is, valt niet met zekerheid te zeggen welk alternatief qua maatschappelijk kosten-batensaldo in zijn algemeenheid het beste scoort. Wel laat de uitgevoerde analyse goed zien op welke aspecten de verschillende ketens zich van elkaar onderscheiden.

Bij de door ons gehanteerde aannames komt LOHC's kraken in de haven en als waterstof vervoeren via buisleidingen met het meest positieve saldo uit de vergelijking (€ 5,1 miljard ten opzichte van vervoer van ammoniak via spoor en binnenvaart). Op alle onderdelen scoort het alternatief 'LOHC's kraken in de haven' beter dan het referentiealternatief: van economische kosten tot emissies. Dit komt doordat in dit alternatief gebruik wordt gemaakt van het landelijke waterstofnetwerk wat de kosten drukt, er weinig aanvullende veiligheidsmaatregelen vereist zijn en geen vervoer via weg, spoor en binnenvaart plaatsvindt. Belangrijke kanttekening hierbij is dat de (langetermijn)milieueffecten van LOHC's zoals (D)BT nog niet volledig duidelijk zijn. Ook de andere alternatieven zijn met onzekerheid omgeven: zo bestaat er bijvoorbeeld grote onzekerheid over hoe de investeringskosten voor een ammoniakbuisleiding zullen uitvallen.

Aantal aspecten van belang bij beoordelen wenselijkheid waterstofdragers en modaliteiten

Het onderzoek laat zien dat bepaalde factoren een aanzienlijke impact hebben op het kosten-batensaldo. De twee met de grootste impact op het resultaat van de vergelijking zijn:

- De importprijs van LOHC en NH_3.
- De preventieve monitorings- en veiligheidskosten en de ruimtelijke impact. De kosten voor het treffen van veiligheidsmaatregelen zijn in het onderzoek behoudend ingeschat, in lijn met de bestaande regelgeving. De kosten kunnen hoger uitvallen als lokale overheden meer maatregelen eisen om hun bewoners te beschermen dan verondersteld in het onderzoek. Dat is hun bevoegdheid en nu al hebben sommige partijen aangegeven dat zij de transporten in het geheel niet willen.

Andere factoren die impact hebben op het kosten-batensaldo:

- Het conversieverlies dat optreedt bij het kraken of dehydrogeneren van waterstofdragers. Als dit anders blijkt dan aangenomen, kan dat de uitkomst wezenlijk veranderen.
- De ruimtelijke impact van transport van ammoniak via spoor, binnenvaart of buisleiding. Dit kan aanzienlijk zijn, maar dit is grotendeels afhankelijk van de politieke keuzes met betrekking tot de preventieve maatregelen die worden genomen. Wij hebben bedenkingen bij de accuraatheid van de rekenmethodiek van RBM II voor de grote volumes ammoniak die in deze studie aan de orde zijn. Wanneer de rekenmethode aangepast wordt, kan dit tot wezenlijk andere resultaten leiden. De ruimtelijke impact van krakers, dehydrogenatie-installaties en buisleidingen zelf is relatief beperkt.

Verder verschillen de ketens op factoren die niet verwerkt konden worden in het *gekwantificeerde* kosten-batensaldo. Deze kwalitatieve factoren zijn wel belangrijk bij het onderling vergelijken van de verschillende ketens:

- Het risico op lock-ins is het grootst bij alternatieven met grote investeringen in nieuwe infrastructuur (kraakinstallaties en buisleidingen ammoniak en 'krakers' voor LOHC's).
- Overbelasting van beschikbare infrastructuur is op termijn te verwachten bij vervoer over water, spoor en weg. Bij de opties met 'centraal kraken' is dit niet aan de orde en (in het onderzoek) evenmin bij de ammoniakbuisleiding, omdat aangenomen is dat dan alles via die buis gaat.
- Bij een grote calamiteit zijn de gevolgen bij ammoniak groter dan bij LOHC, vanwege de toxische eigenschappen van ammoniak.

Bijlage 1. Tracés

B.1.1 Keuze voor representatieve tracés

Om alle effecten uit de MKBV goed door te rekenen, zijn er tracés opgesteld. Deze tracés worden gebruikt voor:

- afgelegde afstand per modaliteit en bijbehorende brandstofverbruik en emissies
- berekenen van de impact op externe veiligheid

Om een zuivere vergelijking te maken tussen de alternatieven, is ervoor gekozen om gestileerde tracés te beschouwen in plaats van geografische tracés. Het is nog niet duidelijk hoe bepaalde stromen op gang komen. Omdat er met hypothetische toekomstscenario's wordt gewerkt, is het niet altijd mogelijk om deze accuraat te plotten op de kaart van Nederland. In de alternatieven waar enkel ammoniak geïmporteerd wordt, is het bijvoorbeeld niet realistisch om grote stromen ammoniak door het Noordzeekanaalgebied te transporteren omdat het havenbedrijf aangeeft niet te willen inzetten op grootschalige import van ammoniak.[18] Onderstaand overzicht toont de voor- en nadelen van het werken met deze representatieve tracés.

Tabel 3 **Voor- en nadelen van het werken met representatieve tracés.**

Voordelen	Nadelen
Gelijkheid van situaties wordt zo veel mogelijk nagestreefd	Verschillen met de lokale situatie en praktijk (geografisch)
Objectiviteit wordt bevorderd	Geen directe inzichten in de Nederlandse 'risicokaart'
Berekeningen kunnen snel worden gevarieerd	Niet geschikt om reële, extreme knelpunten te vinden en de zwaarte ervan te beschrijven
Uitgangspunten zijn goed herleidbaar	
Bijdragen aan (on)veiligheid worden goed zichtbaar	
Geen last van onjuiste details ten opzichte van de werkelijkheid	
Matcht met hypothetische aanpak van de alternatieven	

18 Mogelijk is er wel een rol voor ammoniak als bunkerbrandstof voor schepen in het Amsterdamse havengebied.

B.1.2 Veronderstelde eigenschappen representatieve tracés

Om de alternatieven goed met elkaar te kunnen vergelijken, proberen we de tracés in de alternatieven zo veel mogelijk gelijk te houden. We gaan er daarom van uit dat elk tracé een totale lengte van 200 kilometer heeft. We maken wel onderscheid tussen de tracés waar modaliteiten doorheen gaan. We nemen aan dat:

- het spoor voor 20% door stedelijk gebied en voor 80% door landelijk gebied gaat
- de binnenvaart voor 5% door stedelijk gebied en voor 95% door landelijk gebied gaat
- de buisleiding voor 0% door stedelijk gebied en voor 100% door landelijk gebied gaat.

In de alternatieven worden verschillende modaliteiten gebruikt om de waterstofdrager te transporteren. We zetten ze op een rijtje:

- In het referentiealternatief worden het spoor en de binnenvaart gebruikt.
- In alternatief 2 wordt ammoniak via een (ammoniak) buisleiding naar de eindgebruiker getransporteerd.
- In alternatief 3 en 5 wordt gasvormige waterstof via (waterstof)buisleidingen naar de eindgebruiker getransporteerd.
- In alternatief 4 wordt LOHC via het spoor en de binnenvaart naar de eindgebruiker getransporteerd.

Naar de meeste modaliteiten is al veel onderzoek gedaan en zijn veel kengetallen beschikbaar. Op het moment van schrijven van dit rapport bestaat in Nederland slechts één initiatief waar het transport van ammoniak door buisleidingen overwogen wordt, namelijk de Delta Rijn Corridor. Vanwege de hoge investeringskosten is het van belang dat er voldoende volume getransporteerd wordt door een buisleiding. Ook is de doorlooptijd voor de ontwikkeling van een dergelijke pijpleiding dusdanig lang dat niet te verwachten is dat voor de periode van 2030-2035 nog een buisleiding voor ammoniak ontwikkeld gaat worden. Daarom is in deze analyse uitgegaan van één nieuw aan te leggen buisleidingtracé vanuit één haven naar één afnemer over een afstand van 200 km. Aan het begin van

het traject is een drukstation nodig om ammoniak op druk te brengen. Vervolgens is na elke 80 km nog een drukstation nodig om het gas opnieuw op druk te brengen. Over een tracé van 200 km zijn er dus drie drukstations nodig. Bij waterstofleidingen gaan we ervan uit dat voor 160 km gebruikgemaakt kan worden van het landelijke waterstofnetwerk en dat 40 km nieuwe buisleiding aangelegd moet worden.

Voor het simuleren van calamiteiten is om praktische redenen gebruikgemaakt van een combinatie van werkelijke tracés. De uitgangspunten daarvoor staan beschreven in bijlage B.2.5.

Bijlage 2. Kengetallen en onderliggende berekeningen

In deze bijlage beschrijven we de aannames en berekeningen die gedaan zijn in dit onderzoek. Veel aannames en uitgangspunten komen uit het rapport 'Assessment of hydrogen delivery options' (2022) van het Joint Research Center (JRC)[19] van de Europese Commissie. Gedurende het onderzoek is er ook contact geweest met de auteurs om aannames te valideren en waar mogelijk aan te scherpen. Door veel kengetallen uit dezelfde bron te gebruiken, zijn de alternatieven goed te vergelijken. Sommige aannames zijn naderhand bijgesteld op basis van de klankbordgroep of gesprekken met andere stakeholders.

Per stap in de keten (opslag, conversie, transport en eindgebruik) zetten we alle aannames en berekeningen van de economische kosten op een rij. Vervolgens beschrijven we hoe de calamiteiten inhoudelijk zijn doorgerekend. De monetarisatie van de inhoudelijke doorrekening wordt in bijlage 3 beschreven.

B.2.1 Economische kosten – opslag

Voor opslag in de keten worden enkel de effecten van importterminals doorgerekend. De importterminals zijn vele malen groter dan alle andere opslagen in de keten en daarom bepalend voor alle effecten. Voor de opslagcapaciteit in deze terminals wordt een capaciteit van 14 dagen aangehouden. Er wordt aangenomen dat de grote stromen naar het buitenland direct vanaf de zeehavens zonder overslag op de route naar het buitenland plaatsvinden. Eventuele overslaghubs worden alleen voor de kleine stromen voorzien. Deze capaciteit is dusdanig klein dat dit marginaal is ten opzichte van de opslagterminals. Ook opslag bij eindgebruikers is dusdanig klein en met het abstractieniveau van de studie moeilijk te bepalen. Om opslag bij de eindgebruikers te bepalen moet onder andere vastgesteld worden hoeveel gebruikers er zijn, waar de drager voor gebruikt wordt, hoeveel dagen opslag gewenst is, hoe de drager aangeleverd wordt, etc. Als voor alle eindgebruikers ongeveer 3 dagen opslag wordt aangehouden, is dit ongeveer 1% van de opslagcapaciteit van de importterminals. We nemen aan dat eindgebruikers zich bevinden op industriële locaties en dus dezelfde omgevingscondities hebben als de importterminals.

Voor een ammoniakterminal zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

Tabel 4 **Uitgangspunten ammoniakterminal.**

Ammoniakterminal		Eenheid
Aantal tanks per terminal	8	
Maximale capaciteit tank	15	kt
Maximale capaciteit terminal	120	kt
Oppervlakte	267	m^2/kt
CAPEX	0,65	mln€/kt NH_3
OPEX (van CAPEX)	13,7%	/jaar

Het benodigde oppervlak is een schatting gebaseerd op de bestaande terminal van OCI (via luchtfoto's).

Voor een LOHC-terminal zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

Tabel 5 **Uitgangspunten LOHC-terminal.**

LOHC-terminal		Eenheid
Aantal tanks per terminal	5	
Maximale capaciteit tank	50	kt
Maximale capaciteit terminal	250	kt
Oppervlakte	292	m^2/kt
CAPEX	0,264	mln.€/kt LOHC
OPEX (van CAPEX)	1%	/jaar

Het oppervlak is een schatting gebaseerd op de bestaande terminal van EVOS-Oost in Amsterdam voor olieproducten (via luchtfoto's, vergelijkbaar met LOHC).

Daarnaast is voor de LOHC-alternatieven altijd het dubbele aantal terminals benodigd omdat er een geladen en een ongeladen stroom is. Aangenomen wordt dat er geen lekkages plaatsvinden tijdens de opslag en dat de kosten van het energieverbruik van de terminals verwaarloosbaar zijn en onderdeel van de OPEX. CAPEX en OPEX voor beide typen terminals zijn overgenomen uit het JRC-rapport.[18]

19 JRC, Assessment of hydrogen delivery options.

B.2.2 Economische kosten – conversie

Ammoniakkraker

Betrouwbare informatie over de kosten, het energieverbruik, landverbruik en de emissies is nog niet in grote hoeveelheid beschikbaar. De gehanteerde kengetallen zijn gebaseerd op aannames uit het JRC-rapport18, de haalbaarheidsstudie voor het havenbedrijf van Rotterdam[20], gesprekken met betrokken partijen en Duiker, gespecialiseerd in de engineering van ammoniak(conversie)installaties.

We gaan ervan uit dat een kraakinstallatie ongeveer 100 kt waterstof per jaar kan produceren. Een dergelijke capaciteit komt overeen met wat één '(productie)trein' van Duiker op jaarbasis zou kunnen produceren. Omdat voor een kraakinstallatie meerdere 'treinen' parallel opgesteld kunnen worden, kunnen daadwerkelijke installaties groter zijn als er beleid is om de krakers te clusteren. Omdat er met meerdere 'treinen' gewerkt wordt, is er geen significant verschil in kosten of benodigd landoppervlak per geproduceerde eenheid waterstof.

Op basis van de verschillende bronnen is een conversie van 85% aangenomen. Het verlies van 15%, een mix van ammoniak en waterstof, wordt gebruikt als warmtebron voor het proces. Daarnaast wordt aangenomen dat 1,5 GWh/kt H_2 aan elektriciteit nodig is. Omdat een mix van ammoniak en waterstof verbrand wordt, komt er ook NO_x vrij. Deze emissies zijn sterk afhankelijk van de procescondities en hoeveel behandeling van de uitlaatgassen plaatsvindt. Zonder behandeling wordt een range aangegeven van 1,6-2,7 g NO_x/ kg H_2. Met behandeling kan dit gereduceerd worden tot 0,14g NO_x/kg H_2. Behandeling zal gezien de huidige problemen met stikstofoxides altijd nodig zijn en daarom wordt 0,14g NO_x/kg H_2 gehanteerd.

Tabel 6 **Uitgangspunten ammoniakkraker.**

Ammoniakkraker		Eenheid
Capaciteit kraker	~1000	kt H_2/jaar
Conversie	85%	
Elektriciteitsverbruik	1,5	GWh/kt H_2
Oppervlakte	79	m^2/kt H_2
NO_x-emissie	0,14	t/kt H_2
CAPEX	3,3	mln.€ /(kt H_2/jaar)
OPEX (van CAPEX)	3%	/jaar

LOHC-dehydrogenatie

Zowel voor het binden als ontbinden van LOHC zijn installaties slechts op zeer kleine schaal gebouwd. Daardoor zijn betrouwbare kengetallen voor deze installaties op grote schaal beperkt beschikbaar.

Bij het hydrogeneren van LOHC komt energie vrij, bij het dehydrogeneren moet energie aan het proces toegevoegd worden. Het proces van dehydrogeneren is geschikt om gebruik te maken van restwarmte (150-400°C). Omdat er op industriële locaties over het algemeen veel restwarmte beschikbaar is, wordt aangenomen dat de warmtevraag in het proces 100% wordt ingevuld met restwarmte (11,4 GWh/ kt H_2). De prijs van restwarmte is overgenomen van het PBL en wordt in bijlage 3 toegelicht Omdat er restwarmte wordt gebruikt, zijn er geen emissies van stikstofoxides.

Daarnaast is nog 1 GWh/ kt H_2 elektriciteit nodig voor dit proces. De CAPEX en OPEX van de installatie is gebaseerd op het JRC-rapport.

Tabel 7 **Uitgangspunten LOHC-dehydrogenatie-installatie.**

Dehydrogenatie-installatie		Eenheid
Capaciteit installatie	~1000	kt H_2/jaar
Conversie	100%	
Elektriciteitsverbruik	1	GWh/kt H_2
Oppervlakte	79	m^2/kt H_2
Restwarmtebehoefte	11,4	GWh/kt H_2
NO_x-emissie	0	t/kt H_2
CAPEX	0,67	mln.€ /(kt H_2/jaar)
OPEX (van CAPEX)	3%	/jaar

Omdat er geen betrouwbare informatie gevonden is over het benodigde landoppervlak, is eenzelfde voetafdruk per geproduceerde eenheid waterstof aangenomen als bij een ammoniakkraker. Ook de maximale capaciteit per installatie is hetzelfde aangenomen als bij een ammoniakkraker. Het langzaam degraderen van de drager waardoor deze op den duur vervangen moet worden, is buiten beschouwing gelaten.

20 Port of Rotterdam, Large-Scale Industrial Ammonia Cracking Plant (2023).

B.2.3 Economische kosten – transport

Spoor

Voor transporten over het spoor is aangenomen dat er alleen 'dedicated' treinen rijden voor het vervoer van ammoniak of LOHC. In de praktijk kan het voorkomen dat er treinen rijden die naast andere goederen ook een aantal wagons met LOHC of ammoniak transporteren. Voor het transport van ammoniak wordt uitgegaan van vloeibare opslag onder druk.

Kengetallen voor kosten en het energieverbruik van treinen zijn overgenomen uit het JRC-rapport. Verondersteld is dat een trein maximaal 750 meter lang is. Dat betekent dat er 43 wagons per trein meegenomen kunnen worden. Een ammoniakwagon kan 55 ton transporteren en een LOHC-wagon 23,6 ton. Een ammoniaktrein kan daarmee in totaal 2.365 kt vervoeren en een LOHC-trein 1.015 kt. Een trein verbruikt 0,19 MJ/tkm (~0,005L/tkm) als deze op diesel rijdt en 0,07 MJ/tkm (~0,02kWh/tkm) wanneer de trein onder bovenleiding rijdt.

Aangenomen wordt dat een trein alleen de eerste en de laatste 10 km (op industriële locaties) op diesel rijdt en de rest van het tracé onder bovenleiding rijdt. Voor een retourtocht is aangenomen dat drie dagen nodig zijn. Dit is een geschat gemiddelde van ritten vanaf de havens naar afnemers in Nederland (200 km) en transporten ver Duitsland in.

De totale CAPEX voor een ammoniaktrein komt uit op € 9,6 miljoen en een LOHC-trein op € 8,2 miljoen. De OPEX is 2,4% van de CAPEX per jaar, exclusief brandstofkosten.

In bijlage 3 beschrijven we hoe de transportkosten worden gemonetariseerd.

Binnenvaart

Voor de duur van een retourtocht wordt vier dagen aangehouden. Dit is een geschat gemiddelde van een retourtocht vanaf de zeehavens naar Chemelot en naar het Ruhrgebied.

Voor een ammoniakschip wordt uitgegaan van een groot Rijnschip, klasse Va, 135m, met een opslagcapaciteit van 2.460 ton. (een derde meer dan een schip van 110m. met 1.850 ton). Dit betreft vloeibare opslag onder druk.

Voor een LOHC-schip wordt uitgegaan van een standaard tankschip voor het transport van olieproducten. Deze schepen zijn geschikt (of eenvoudig geschikt te maken) voor het vervoeren van LOHC. Uitgangspunt is een groot Rijnschip, klasse Va, 135m met een opslagcapaciteit van 3.750 ton.

Voor het brandstofverbruik zijn we uitgegaan van ervaringsgetallen van ongeveer 120-200 L/uur afhankelijk van stroming en lading. Daaruit een gemiddelde gehanteerd van 160 L/uur. Met een gemiddelde snelheid van 10 km/uur resulteert dit in 7,5 L/km.

De CAPEX van een ammoniakschip bedraag € 15 miljoen en een LOHC-schip € 12 miljoen. Er wordt voor beide schepen een OPEX gerekend van 10% van de CAPEX exclusief brandstofkosten. De OPEX van een ammoniakschip is daarom hoger dan die van een LOHC-schip. Dit komt onder andere door de specialistischer apparatuur en scholing van het opvarend personeel.

In bijlage 3 beschrijven we hoe de transportkosten worden gemonetariseerd.

Zeeschepen

Onderstaande uitgangspunten zijn enkel gebruikt om een inschatting te maken van het aantal schepen dat jaarlijks over de Westerschelde vaart en de uitstoot die daarmee gepaard gaat. Kosten voor deze schepen worden niet berekend, omdat de kosten van deze schepen niet in Nederland vallen. Voor deze schepen is uitgegaan van een afgelegde afstand van 65 km vanaf het moment dat ze Nederlandse wateren naderen tot de grensovergang richting Antwerpen.

De uitgangspunten voor deze schepen zijn overgenomen uit het JRC-rapport. Een ammoniakschip heeft een capaciteit van 50 kt. Deze aanname ligt in lijn met de vorige studie. Het brandstofverbruik is 0,3 MJ/tNH_3/km. Dit komt overeen met 8,1L/kt NH_3/km diesel. Het verbruik wordt enkel berekend om de uitstoot van het schip te bepalen wanneer het over de Westerschelde vaart.

Een LOHC-schip heeft een capaciteit van 140 kt. Uitgangspunt is dezelfde energiebehoefte als een ammoniakschip en die wordt enkel berekend om de uitstoot van het schip te bepalen wanneer het over de Westerschelde vaart.

In bijlage 3 beschrijven we hoe de transportkosten worden gemonetariseerd.

Ammoniakpijpleiding

De kosten voor de pijpleiding in €/km zijn overgenomen uit de MKBA van de Delta Rijn Corridor. In deze MKBV houden we alleen rekening met dat deel van de pijpleiding dat zich in Nederland bevindt. Voor de ammoniakpijpleiding wordt aangenomen dat transport onder druk plaatsvindt en dat er onder normale omstandigheden geen lekkages zijn.

De kostenkengetallen voor de drukstations en het energiegebruik daarvan zijn gebaseerd op het JRC-rapport en contact met de auteurs. Om de 80 km is een drukstation nodig om de pijpleiding op druk te houden. Met een tracé van 200 km betekent dit dat er een drukstation aan het begin van de buisleiding is en bij 80 km en 160 km nog een drukstation. We veronderstellen dat de CAPEX van drukstations is opgenomen in de geraamde investeringskosten van de Delta Rijn Corridor. Het eerste drukstation heeft meer energie nodig om ammoniak op druk te brengen en gebruikt ongeveer 3,4 MWh/kt NH_3. De andere drukstations verbruiken 2,1 MWh/kt NH_3.

Het gebruik van ammoniakbuisleidingen is een relatief nieuw concept. In de Verenigde Staten, Canada en Rusland zijn wel ammoniakbuisleidingen, maar deze bevinden zich niet in dichtbevolkt gebied zoals in Nederland. Ook verschillen die buisleidingen in diameter, waardoor mogelijke gevolgen bij incidenten niet vergelijkbaar zijn. Doordat Nederland dicht bevolkt is, zijn de gevolgen bij een incident aanzienlijk. Grootschalige impact op flora en fauna, mogelijke besmetting van drinkwaterbronnen, en grote gebieden waar men zich niet doorheen kan bewegen, gelden als mogelijke gevolgen van een incident bij een ammoniakbuisleiding wanneer grote volumes vrijkomen. Enkele maatregelen kunnen theoretisch de gevolgen bij een incident voorkomen (zoals een extra omhulsel om de buis heen). De kosten voor deze maatregelen zijn echter lastig in te schatten, omdat er nog geen praktijkvoorbeelden met vergelijkbare externe factoren voorhanden zijn. Om deze reden hebben we een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij we de kosten voor ammoniakbuisleidingen aanzienlijk laten toenemen.

Waterstofbuisleiding

Voor het waterstofleidingnetwerk wordt aangenomen dat zo veel mogelijk gebruikgemaakt kan worden van het landelijk waterstofnetwerk dat ontwikkeld is door Hynetwork Services. Alleen de aantakkingen vanaf de installaties en terminals aan het begin van het tracé (20 km totaal) en de aftakkingen aan het einde van het tracé (20 km) dienen nieuw aangelegd te worden.

Voor de totale tracélengte wordt er met 200 km gerekend, waarvan 160 km via het landelijk waterstofnetwerk en 40 km via nieuw aangelegde leidingen. Voor de CAPEX sluiten we aan bij het JRC-rapport en gaan we uit van 1 M€/km.

Per intakpunt is een compressor nodig om waterstof op druk te brengen. Voor een compressorstation tot 100kt H_2 per jaar is de CAPEX € 15 miljoen en de OPEX € 0,2 miljoen per jaar. Het energieverbruik bedraag 0,28 MWh/kt/km. Voor de kosten van de nieuw aan te leggen leidingen wordt € 1 miljoen/km gerekend met een OPEX van € 0,003 miljoen/km/jaar.

Bij transport van waterstof via buisleidingen wordt een lekkage van 0,01% gehanteerd.[21]

Bij de kosten voor het gebruik (OPEX) van het landelijk waterstofnetwerk is uitgegaan van de 2024 Entry- en Exittarieven per kWh van Gasunie voor het huidige aardgasnetwerk. Op basis van de jaarrekening van Gasunietransportservices is bepaald welk aandeel hiervoor voor OPEX-componenten is (44%). Alleen dit OPEX-deel van de Entry- en Exittarieven is meegenomen in alternatief 3 en 5, waarbij waterstof via een buisleiding wordt getransporteerd. Het CAPEX-deel nemen we bewust niet mee, omdat we ervan uitgaan dat in alle alternatieven het landelijk waterstofnetwerk wordt gerealiseerd.

Weg

In de hoofdresultaten nemen we geen wegvervoer van LOHC mee. Het wegvervoer van ammoniak is in het geheel niet meegenomen in deze studie. In de praktijk zien we weinig tot geen voorbeelden van ammoniakvervoer over de weg. De onderstaande kengetallen en berekeningen voor het wegvervoer van LOHC zijn gedaan voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse, zie paragraaf 5.4.

Transport over de weg is enkel aan de orde in alternatief 4: LOHC's vervoeren naar eindgebruikers via binnenvaart en spoor. Voor een retourrit over de weg is een duur van 1,5 dag aangenomen. Dit is een schatting van de duur van transporten vanaf de havens naar afnemers in Nederland (200 km) en transporten naar Duitsland tot het Ruhrgebied.

Voor een LOHC-truck wordt uitgegaan van een standaard tankwagen. Deze trucks zijn (nagenoeg) geschikt voor het vervoeren van LOHC. De kostenkengetallen en de

21 Op basis van raadpleging experts bij Gasunie.

truckcapaciteit zijn overgenomen uit het JRC-rapport. Eén LOHC-truck kan 22,8 t LOHC vervoeren. De CAPEX van een truck is € 0,195 miljoen. De OPEX exclusief brandstof is € 0,62/km (€ 0,03/tkm). Een verbruik van 30 L/100 km wordt verondersteld (0,013L/tkm).

In bijlage 3 beschrijven we hoe de transportkosten worden gemonetariseerd.

B.2.4 Eindgebruik in Nederland

Voor het eindgebruik in Nederland waar waterstof als eindproduct of grondstof gebruikt wordt, is er geen verschil tussen de alternatieven. Het enige verschil is de mogelijke stap ervoor waar waterstof wordt onttrokken aan LOHC of ammoniak. Deze wordt in de conversiestap beschreven.

Het enige verschil in eindgebruik in de alternatieven is de inzet van waterstof of ammoniak voor warmte. De verschillen zitten in het type installatie, de bijkomende kosten voor deze installatie, de veiligheidsvoorschriften en de emissies. Het detailniveau van dit onderzoek is niet hoog genoeg om deze verschillen te kwantificeren, omdat deze verschillen sterk afhankelijk zijn van het specifieke proces bij de eindgebruiker.

De totale stroom ammoniak in het eindgebruik voor hogetemperatuurproceswarmte is slechts 4% van het totale binnenlandse en buitenlandse eindverbruik. Onze inschatting is dan ook dat het buiten beschouwing laten van dit aspect geen invloed heeft op de uitkomsten van de vergelijking.

De verschillen tussen de brandstoffen beschrijven we wel kwalitatief:

Type installatie

Het type installatie is sterk afhankelijk van de toepassing. Daarom is het bij dit abstractieniveau niet mogelijk de wijzigingen aan installaties en de kosten hiervan te bepalen. Wanneer industriële partijen overstappen van de verbranding van aardgas naar waterstof of ammoniak, betekent dit altijd dat er wijzigingen gedaan moeten worden aan de installatie. Zo wordt de vlamdetectie anders en zijn de emissies anders. Omschakeling is alleen mogelijk voor processen waar geen koolstof nodig is voor de vorming van het product.

Veiligheid

De verschillende stoffen hebben onderling duidelijk verschillende gevaaraspecten.

Waterstof is een reukloos niet-toxisch gas, met een zeer lage ontstekingsenergie en is over een groot gehalte-percentage (concentratiegebied) explosief (namelijk van 5 tot 70%; LEL respectievelijk UEL). Het stijgt zeer snel op. Als waterstof brandt, is de vlamkleur onzichtbaar, heeft deze relatief weinig stralingswarmte en een snelle verbranding. Daarom moeten andere detectiemiddelen worden ingezet.

Ammoniak is een sterk ruikend toxisch gas, met een hoge ontstekingsenergie en is in weinig situaties explosief. Het stijgt langzaam op. Als ammoniak brandt, heeft het een zichtbare vlam, een gemiddelde stralingswarmte en een gelijkmatige verbranding. Daarnaast is ammoniak corrosief.

Aardgas is een niet-toxisch gas, met een lage ontstekingsenergie en is over een groot gebied (kleiner dan waterstof) explosief. Het stijgt langzaam op. Als aardgas brandt, heeft het een zichtbare vlam, een gemiddelde stralingswarmte en een gelijkmatige verbranding.

LOHC is een verzamelnaam voor stoffen die waterstof chemisch kunnen binden en later weer kunnen vrijgeven. Vaak zijn dit stoffen waarin één of meer benzeenringen aanwezig zijn die de bewuste binding en ontbinding kunnen realiseren. Ze kunnen toxisch zijn. Zo was de stof benzyltolueen tot voor kort aangemerkt als een p-ZZS (een potentieel zeer zorgwekkende stof, zie het ZZS-register bij het RIVM), al is die toewijzing geschrapt. Dat betekent niet dat de stof nu als weinig zorgelijk kan worden beschouwd; het betreft een methodische wijziging.

Emissies

Bij de verbranding van ammoniak en waterstof komt geen CO_2 vrij. Er zijn enkel NO_x-emissies. De hoeveelheid hiervan is sterk afhankelijk van het proces. De vorming van NO_x kan twee oorzaken hebben:

- NO_x-vorming als product van de brandstof: wanneer brandstoffen (zoals ammoniak NH_3) die stikstofatomen bevatten verbrand worden, reageren deze atomen met zuurstofatomen wat zorgt voor de vorming van NO_x. Deze emissies zullen eigenlijk altijd optreden en zijn inherent aan het verbrandingsproces. Bij de verbranding van waterstof zijn deze emissies er niet omdat waterstof (H_2) geen stikstofatomen bevat.

- NO_x-vorming door de procescondities: ongeveer 78% van de atmosfeer bevat stikstof. Als de temperatuur in een verbrandingsproces hoog genoeg is, kan de aanwezige stikstof (N2) in de aangevoerde lucht reageren met zuurstof en NO_x opleveren. Over het algemeen geldt dat hoe hoger de procestemperatuur is hoe meer NO_x er gevormd wordt. De NO_x-vorming is te sturen door de temperatuur te reguleren, pure zuurstof aan te voeren in plaats van lucht (oxyfuel-verbranding) of andere maatregelen zoals het toepassen van katalysatoren, in of na het proces. Veel van deze toepassingen worden ook gebruikt in dieselmotoren om NO_x-vorming te verminderen.

In de literatuur is er veel minder onderzoek gedaan naar NO_x-emissies bij de verbranding van ammoniak dan bij de verbranding van waterstof. Het is daarom nog te vroeg om conclusies te trekken over mogelijke reductiemogelijkheden of emissieniveaus bij de verbranding van ammoniak. Uit de literatuur blijkt wel aan dat de verbranding van ammoniak problematischer is dan die van waterstof, omdat ammoniak van zichzelf al veel stikstof bevat.[22]

B.2.5 Inhoudelijke doorrekening calamiteiten

Om de effecten van incidenten te bepalen, worden de kansen en effecten van een calamiteit met één eenheid bepaald. Vervolgens wordt de kans geschaald met een schaalfactor afhankelijk van de volumes in het alternatief.

Zo wordt bijvoorbeeld de kans op het falen van één tank in een ammoniakopslagterminal berekend en wat de impact van een dergelijk incident is. De kans dat dit optreedt, wordt geschaald met het aantal tanks dat benodigd is in de alternatieven.

De aannames, zoals de kans op een incident, uitstroomsnelheden, lethale zones en LBW-waardes, zijn afgeleid uit het Scenarioboek Externe Veiligheid[23] tenzij anders vermeld.

Voor veiligheid is in de analyse een opdeling gemaakt voor installaties en transport. Voor de installaties in de keten (opslag, compressie, verlading kraken, dehydrogeneren) is de impact op de omgeving bepaald op basis van verschillende faalscenario's. Hierbij zijn omwille van de gedetailleerdheid van de studie enkele maatgevende scenario's in de beoordeling meegenomen. Ter verduidelijking: bij ammoniak zal naast een toxisch effect ook een brandeffect kunnen optreden. De omvang van de impact op de omgeving (gewonden en doden) van het brandscenario bij ammoniak is ordegrootte een factor 20 kleiner dan het toxische effect, dus om die reden achterwege gelaten. Voor de scenario's met eventueel materiële schade is dit juist andersom (primair voor de LOHC's). Daar is het effect van brand aanzienlijk groter dan dat van toxische restproducten, waarmee de materiële schade van het brandscenario maatgevend is. De doden en gewonden ten gevolge van brand zijn hierbij wel meegerekend.

Voor LOHC is in de installatiegerelateerde scenario's de koppeling gemaakt met benzine als brandbare stof. Hier zijn de effecten van de verschillende faalscenario's voornamelijk gericht op brand. Dat er bij verschillende LOHC's mogelijk ook toxische effecten zullen optreden, is ondergeschikt geacht en daarom buiten de studie gelaten. Eventuele materiële schade is op de brandscenario's betrokken.

Opslag en verwerking in het havengebied

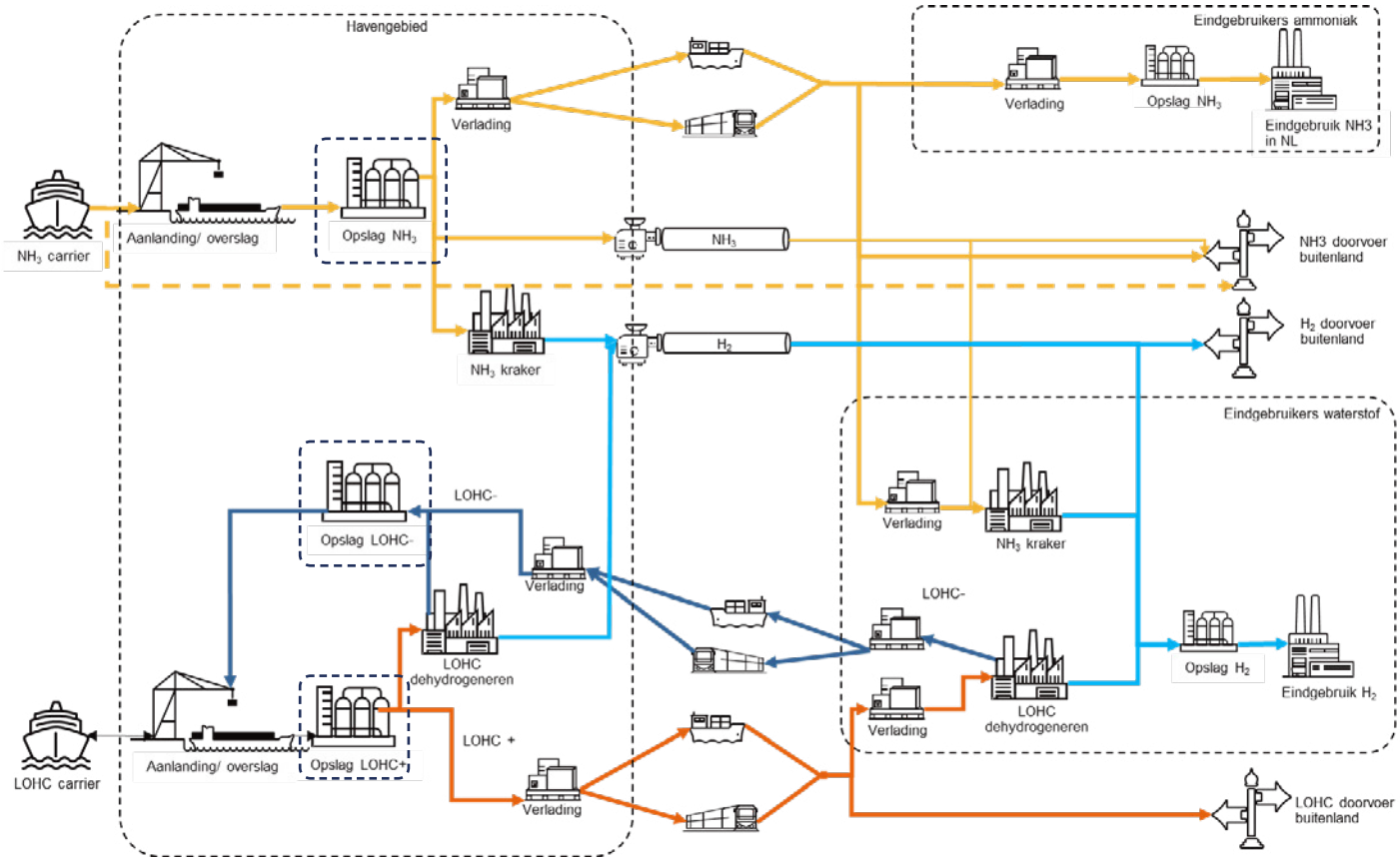
Hieronder staan de mogelijke incidenten bij de opslag en verwerking in het havengebied beschreven. Al deze incidenten vinden plaats op industrieterrein 1 met een populatiedichtheid van vijf personen per hectare.

Calamiteit 1 – Het falen van een opslagtank

Deze calamiteit betreft het falen van een opslagtank voor ammoniak of LOHC. Bij het falen gaat de volledige opslagtank verloren en ontsnapt de opgeslagen stof naar de omgeving. De totale effecten moeten geschaald worden met het totaal aantal opslagtanks per alternatief. De kansen op een calamiteit zijn overgenomen uit de Handleiding Risicoberekeningen Bevi van het RIVM[24].

In bijlage B.2.1 is aangenomen dat een ammoniakterminal acht opslagtanks bevat met elk een maximale opslagcapaciteit van 15.000 ton. In bijlage B.2.1 is eveneens aangenomen dat een LOHC-terminal vijf opslagtanks bevat met elk een maximale opslagcapaciteit van 50.000 ton.

22 TNO. Waterstofverbranding en stikstofemissies (2023).
23 Nederlands Instituut Publieke Veiligheid, Scenarioboek Externe Veiligheid.
24 RIVM. Handleiding Risicoberekeningen Bevi.



Figuur 25 **Plaats van opslagterminals in de keten.**

Ammoniak

Bij een calamiteit zal er een uitstroom zijn van ammoniak met een ordegrootte van 200 kg/sec. Dit geeft een plas die vervolgens een toxische wolk, in de vorm van een pluim, oplevert. Binnen deze pluim van 975 m vanaf de bron zal volgens het Scenarioboek Externe Veiligheid 5-95% van de populatie overlijden. Als gemiddelde is hiervoor aangehouden dat 50% van de aanwezigen overlijdt. Dit betekent dat bij het falen van een ammoniakopslag 186 personen overlijden.

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de levensbedreigende waarde (LBW) van 780 mg/m^3 op een afstand van nagenoeg 2 km. Dit resulteert in 780 gewonden.

De materiële schade in de omgeving van een toxische wolk is € 0 maar de opslag moet wel vervangen worden. Bij het falen van de opslag is er een emissie van 15.000 ton ammoniak.

Tabel 8 **Effecten bij het falen van een ammoniakopslagtank (15 kt).**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	1,25x10^{-8}
Verwacht aantal doden	186
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	780
Materiële schade	€ 0 door gifwolk. Vervanging tank
Emissies	15 kt naar de lucht (volledige inhoud tank)

LOHC

Bij een calamiteit zal er een uitstroom zijn van LOHC die de tankput zal vullen. Hierbij kan een brand ontstaan. Binnen een afstand van 20 m van de rand van de plasbrand zal 100% van de populatie overlijden. In een tweede schil tot 100 m van de rand van de plasbrand zal afhankelijk van de gedragen kleding 5- 32% van de aanwezigen overlijden. Als input voor de berekening is uitgegaan van 15% omdat de kleding op het industrieterrein vaak al meer gedegen is dan gewone kleding. Dit betekent dat bij het falen van een LOHC-opslagtank 42 personen overlijden.

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de warmtestraling van 35 tot 4 kW/m² tot een afstand van 200 m van de rand van de tankputbrand. Het aantal gewonden varieert in die gebieden van 1 tot 86%. Aangehouden in de MKBV is een waarde van 50%.

De materiële schade in de omgeving van een hittestraling is binnen de 35kW-contour 100% van de objecten (een gebied met een straal van 150 m rond het centrum van de tankput). Gelet op de ligging in industrieel gebied is hier een waarde van € 1 miljoen aangehouden plus het verlies van de opslagtank. Onder de 10kW hittestraling is er slechts beperkte schade en daarom niet meegenomen.

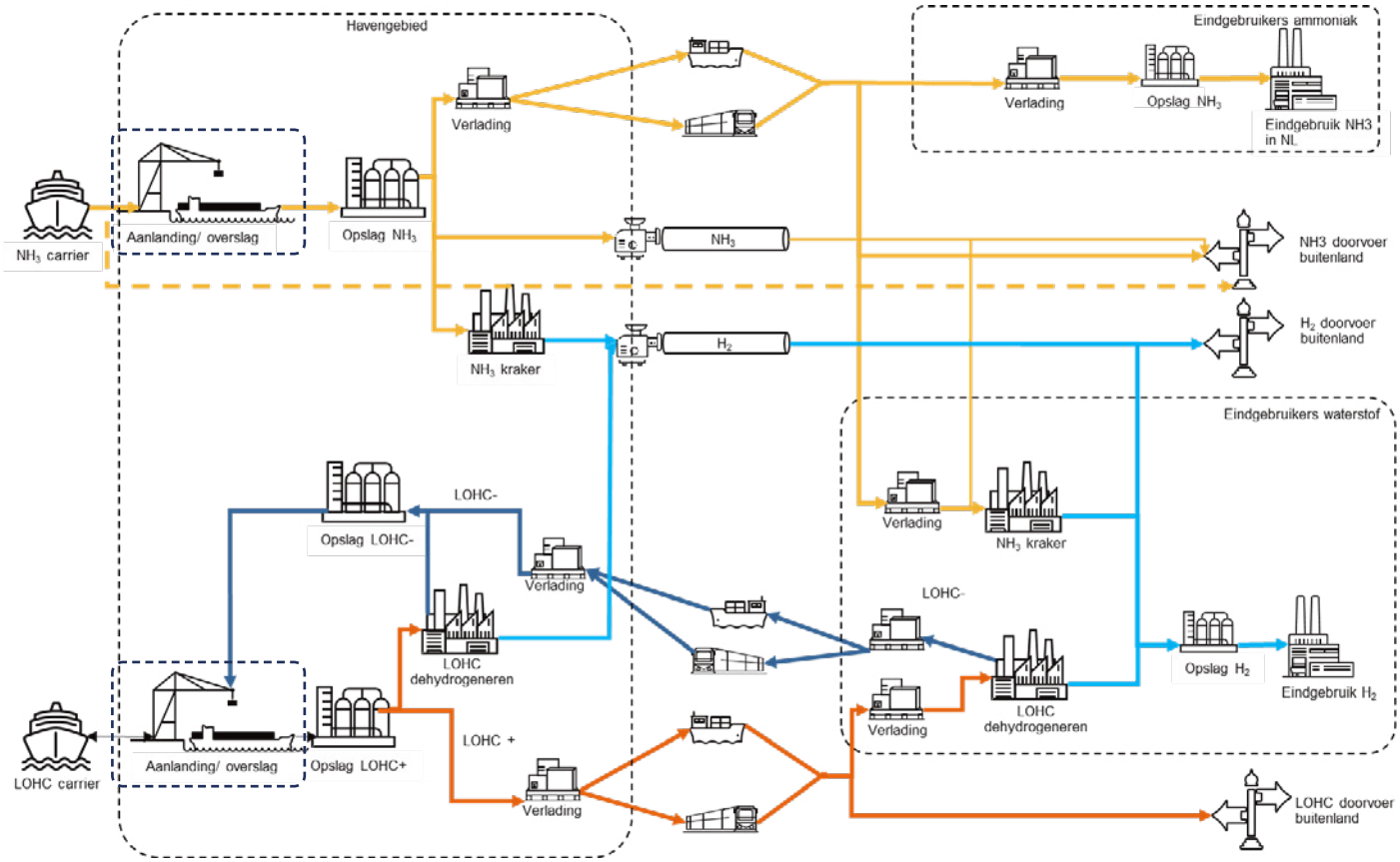
Bij het falen van een opslag is er een emissie van 50 kton LOHC naar de bodem. Dat is een ongewenste gebeurtenis, maar te herstellen door het afgraven van de verontreinigde grond en het terugstorten van schone grond. Vervuiling door dergelijke stoffen, denk aan diesel, is in Nederland niet uitzonderlijk.

Tabel 9 **Effecten bij het falen van een LOHC-opslagtank (50 kt).**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$5x10^{-7}$
Verwacht aantal doden	42
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	85
Materiële schade	Vervanging tank + € 1.000.000,-
Emissies	50 kt naar de bodem (volledige inhoud tank)

Calamiteit 2 – Fout bij het lossen van een zeeschip

Calamiteit 2 betreft een incident met een zeeschip dat komt lossen. Bij deze calamiteit wordt uitgegaan van een incident tijdens het lossen van een zeeschip in een Nederlandse haven bij een opslagterminal, waarbij de losverbinding wordt onderbroken en de betreffende stof uitstroomt over de kade. De effecten van dit incident worden geschaald met het totaal aantal leveringen per zeeschip per jaar in een alternatief.



Figuur 26 **Plaats van aanlanding/overslag in de ketens.**

Ammoniak

Er zal een uitstroom zijn van ammoniak met een ordegrootte van 200 kg/sec. Dit geeft een plas die vervolgens een toxische wolk, in de vorm van een pluim, oplevert. Binnen deze pluim van 975 m vanaf de bron zal 5-95% van de populatie overlijden. Als gemiddelde is hiervoor aangehouden dat 50% van de aanwezigen overlijdt. Dit betekent dat bij het falen van een ammoniakopslag 186 personen overlijden.

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de LBW van 780 mg/m^3 op een afstand van nagenoeg 2 km. Dit resulteert in 780 gewonden.

De materiële schade in de omgeving van een toxische wolk is € 0, de kosten van het vervangen van de losslang zijn verwaarloosbaar.

Aangenomen wordt dat de stroom 2 minuten aanhoudt voordat deze gestopt wordt. Dit betekent dat er een emissie naar de lucht is van 0,024 kt ammoniak bij een incident.

Tabel 10 **Effecten bij een incident tijdens het lossen van een ammoniakschip.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	1,8x10^{-8}
Verwacht aantal doden	186
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	780
Materiële schade	€ 0
Emissies	0,024 kt naar de lucht

LOHC

Bij deze calamiteit wordt de losverbinding afgebroken waardoor er LOHC uitstroomt over de kade. Vanwege de uitstroom van LOHC zal een plasbrand ontstaan. Binnen een afstand van 20 m van de rand van de plasbrand zal 100% van de populatie overlijden. In een tweede schil tot 100 m van de rand van de plasbrand zal afhankelijk van de gedragen kleding 5-32% van de aanwezigen overlijden. Als input voor de berekening van de effecten is uitgegaan van 15% omdat de kleding op het industrieterrein vaak al meer gedegen is dan zomerkleding.

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de warmtestraling van 35 tot 4 kW/m^2 tot een afstand van 200 m van de rand van de tankputbrand. Het aantal gewonden varieert in die gebieden van 1 tot 86%. Aangehouden in de berekening is een waarde van 50%.

De materiële schade in de omgeving van een hittestraling is binnen de 35kW-contour 100% van de objecten (een gebied met een straal van 150 m rond het lospunt). Gelet op de ligging in industrieel gebied en nabij het zeeschip is hier een waarde van € 5.000.000,- aangehouden. Onder de 10kW is er slechts beperkte schade.

Hier is een uitstroom verondersteld van 200 kg/s toevoegen en een tijdsduur van 5 minuten.

Tabel 11 **Effecten bij een incident tijdens het lossen van een LOHC-schip.**

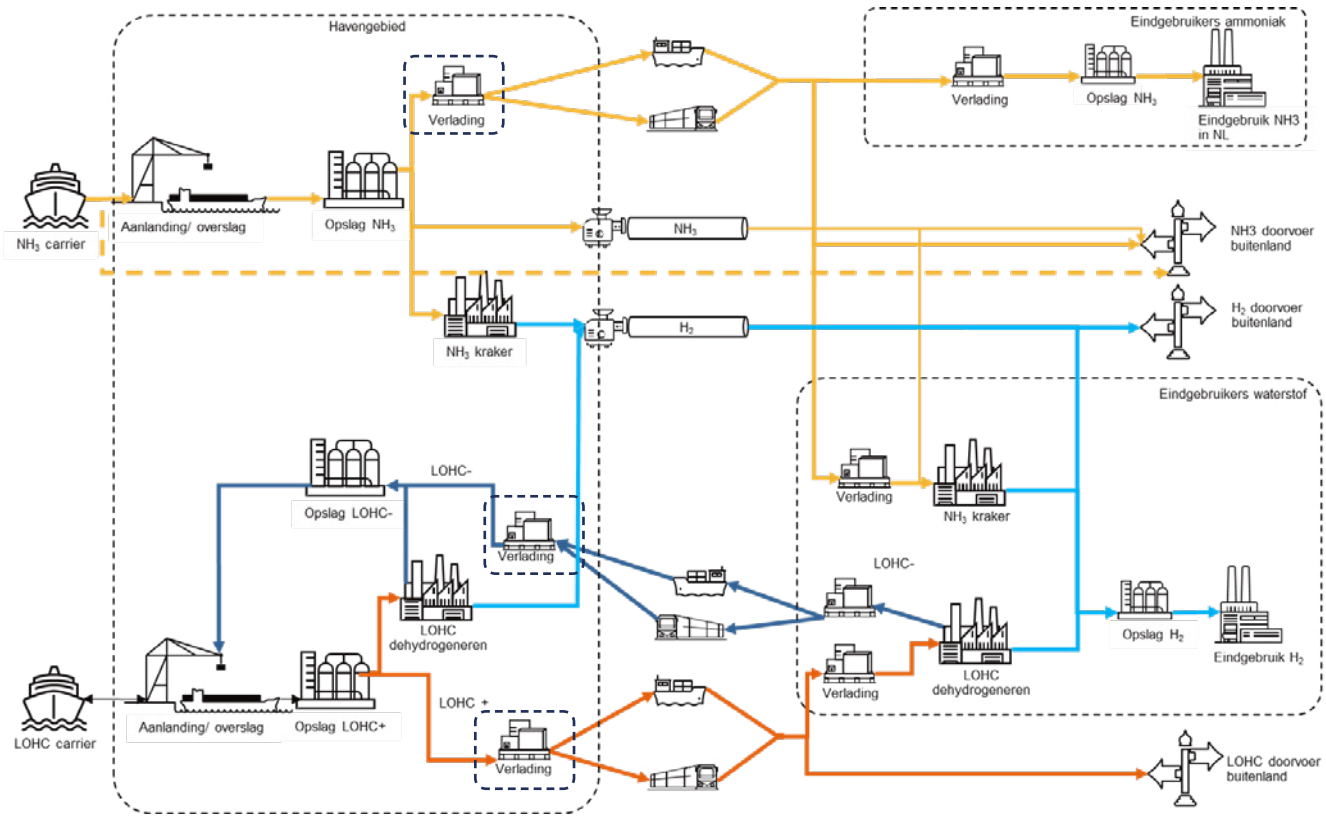
Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	1,8x10^{-8}
Verwacht aantal doden	42
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	85
Materiële schade	€ 5.000.000,-
Emissies	0

Calamiteit 3 – Fout bij het verladen naar binnenvaart en spoor

Deze calamiteit betreft een fout bij het verladen van de terminal naar het transport via het spoor en de binnenvaart. Hierbij wordt de losverbinding afgebroken waardoor de stof uitstroomt over de terminal. Deze calamiteit komt dus alleen voor in het referentiealternatief en in alternatief 4. De schaalfactor van dit incident wordt gedefinieerd door het totaal aantal verladingen naar de binnenvaart en naar het spoor vanaf de haven, en het aantal ladingen dat wordt ontvangen bij eindgebruikers in Nederland. Voor de LOHC geldt dit zowel voor de geladen als de ongeladen stroom. De effecten zijn van eenzelfde orde van grootte voor het spoor en de binnenvaart. De emissies bij een eventuele calamiteit is een gewogen gemiddelde van de capaciteit van de modaliteiten en het aantal tochten per modaliteit.

Ammoniak

Binnen de kaders van het onderzoek is de omvang per modaliteit ordegrootte gelijk, 2,46 kt voor de binnenvaart versus 2,37 kt voor het spoor. In de praktijk zal een mix van modaliteiten en volumes optreden. Aangehouden zijn de gegevens voor de ketelwagon. Hierbij wordt de losverbinding afgebroken waardoor er ammoniak uitstroomt over de terminal. Er zal dan een uitstroom zijn van ammoniak met een ordegrootte van 68 kg/sec. Dit geeft een plas die vervolgens een toxische wolk, in de vorm van een pluim, oplevert. Binnen deze pluim van 520 m vanaf de bron zal 5-95% van de populatie



Figuur 27 **Plaatsen van verlading in de ketens.**

overlijden. Als gemiddelde is hiervoor aangehouden dat 50% van de aanwezigen overlijdt. Dit betekent dat bij dit scenario 53 personen overlijden.

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de LBW van 780 mg/m³ op een afstand van nagenoeg 1.500 m. Dit resulteert in 565 gewonden.

De materiële schade in de omgeving van een toxische wolk is € 0.

De emissie is het verlies van een compartiment van het schip. Uitgegaan wordt van acht tanks/compartimenten per schip. Voor het spoor wordt uitgegaan van de emissies van één wagon.

Tabel 12 **Effecten bij het verladen van ammoniak naar binnenvaart of spoor.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$5x10^{-7}$
Verwacht aantal doden	53
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	565
Materiële schade	€ 0
Emissies	2,41 kt ammoniak

LOHC

Effectief vinden er eenzelfde ordegrootte bewegingen plaats: 2.100 schepen en 1.650 trein. De omvang per modaliteit is ordegrootte gelijk: 1,85 kton versus 2,37 kton. Waarmee beide calamiteitenscenario's onderling verglijkbaar zijn. Aangehouden zijn de gegevens voor de ketelwagon. Binnen een afstand van 5-10 m van de rand van de plasbrand zal 100% van de populatie overlijden. In een tweede schil tot 25 m van de rand van de plasbrand zal afhankelijk van de gedragen kleding 5-32% van de aanwezigen overlijden. Als input voor de MKBV is uitgegaan van 15% omdat de kleding op het industrieterrein vaak al meer gedegen is dan zomerkleding.

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de warmtestraling van 35 tot lager dan 4 kW/m² tot een afstand van 45 m van de rand van de tankputbrand. Het aantal gewonden varieert in die gebieden van 1 tot 86%. Aangehouden in de MKBV is een waarde van 50%.

De materiële schade in de omgeving van een hittestraling is binnen de 35kW-contour 100% van de objecten (een gebied met een straal van 30 m rond het lospunt). Gelet op de ligging in industrieel gebied is hier een waarde van € 500.000,- aangehouden. Onder de 10kW is er slechts beperkte schade.

Tabel 13 **Effecten bij het verladen van LOHC naar binnenvaart of spoor.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$5x10^{-7}$
Verwacht aantal doden	1
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	3
Materiële schade	€ 500.000,-
Emissies	0 (door verbranding)

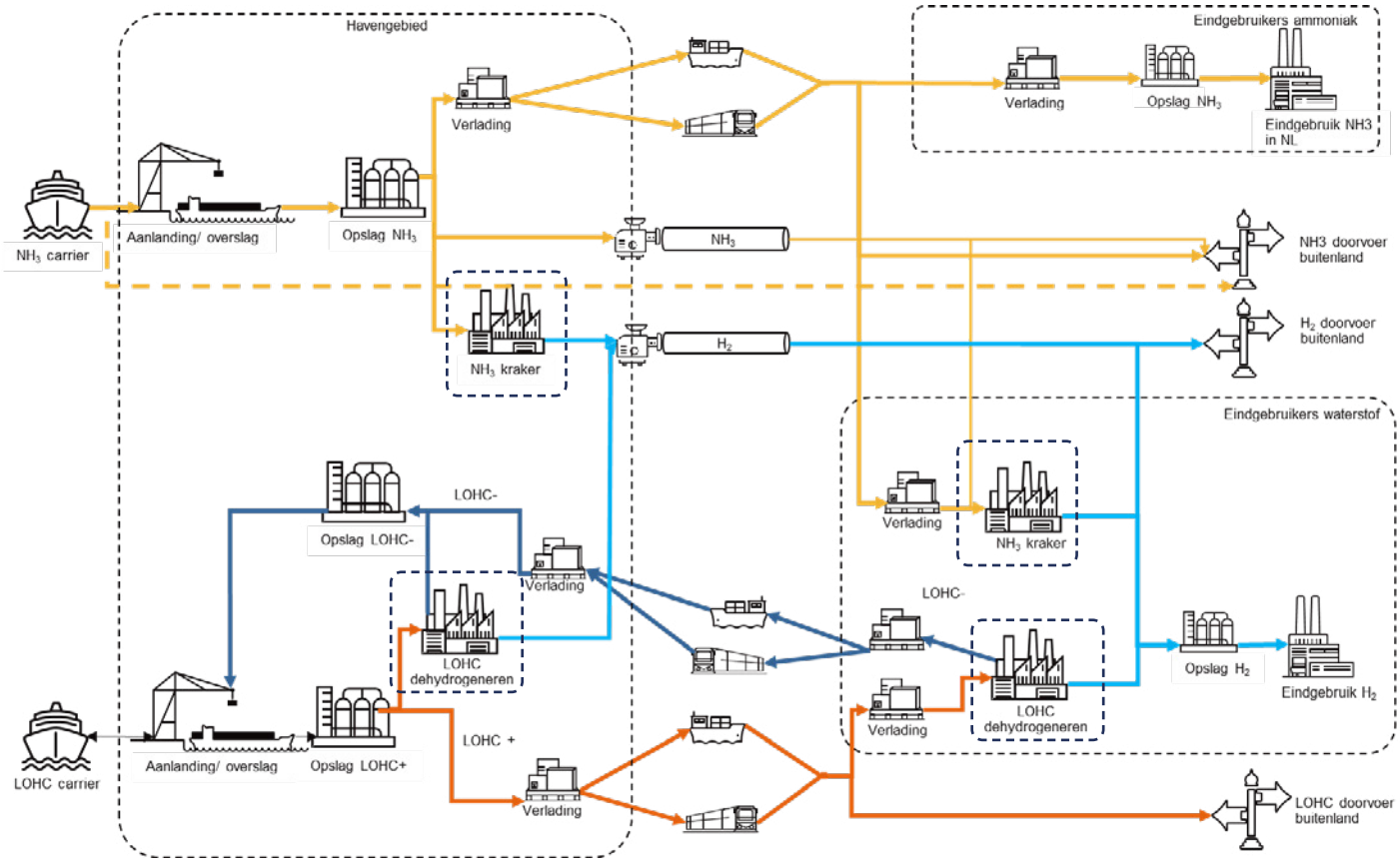
Het verladen van LOHC naar trucks is ook een onderdeel van deze keten. De kans op falen van een geïsoleerde opstelplaats met aanrijdbeveiliging is 3x10-9. Dit is meer dan een factor 100 kleiner dan bij de andere modaliteiten en is derhalve buiten de beoordeling gelaten.

Conversie van de drager naar waterstof

De conversie van waterstof kan op twee plaatsen plaatsvinden. Op industrieterrein 1 waar conversie plaatsvindt vanuit de opslagterminal voordat het vervoerd wordt. Of op industrieterrein 2 bij de eindgebruiker. Voor beide terreinen gelden dezelfde condities zoals een populatiedichtheid van vijf personen per hectare.

Calamiteit 1 – Incident in conversie-installatie

Deze calamiteit gaat uit van een incident in de conversie-installatie. Hierbij treedt een externe brand op. De schaalfactor is het aantal conversie-installaties.



Figuur 28 **Plaatsen van conversie in de ketens.**

Ammoniak

Dit incident leidt tot een externe brand met een beperkte impact op de omgeving. De kans op emissies naar de omgeving is afgaand op de studie van Fluor voor de Rotterdamse haven[25] beperkt, net als de impact van een eventuele brand. De impact hiervan is lokaal en zal naar verwachting niet buiten de inrichting komen, maar wel binnen de inrichting aanzienlijke materiële schade veroorzaken. Voor de materiële schade is het verlies van de kraker aangehouden. Wellicht blijft een deel intact maar repareren van een zwaar beschadigde installatie is mogelijk duurder dan nieuwbouw en er is een verlies door niet-beschikbaarheid.

Tabel 14 **Effecten bij een calamiteit in de kraakinstallatie.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$5x10^{-7}$
Verwacht aantal doden	1
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	5
Materiële schade	Vervangingskosten kraakinstallatie
Emissies	0 (door verbranding)

LOHC

Een incident in de dehydrogeneerinstallatie leidt tot een externe brand met een beperkte impact op de omgeving. De impact hiervan is lokaal en zal naar verwachting niet buiten de inrichting komen, maar wel binnen de inrichting aanzienlijke materiële schade veroorzaken. Aangenomen wordt dat de hele installatie verloren gaat. Wellicht blijft een deel intact maar repareren van een zwaar beschadigde installatie is mogelijk duurder dan nieuwbouw en er is een verlies door niet-beschikbaarheid.

Tabel 15 **Effecten bij een calamiteit in de dehydrogeneerinstallatie.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$5x10^{-6}$
Verwacht aantal doden	1
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	3
Materiële schade	Vervanging installatie
Emissies	0 (door verbranding)

25 Port of Rotterdam, Lage-scale Industruial Ammonia Cracking Plant (2023).

Calamiteit 2 – Falen van aansluitleiding naar conversie-installatie

Deze calamiteit bevat het falen van een aansluitleiding naar de conversie-installatie. Dit kan zowel in de haven zijn als bij de eindgebruiker en is onafhankelijk van de modaliteit. De schaalfactor is het aantal conversie-installaties. Afhankelijk van het beveiligingssysteem met afsluiters zal de lekkage van de stof voortduren. De aangehouden release time is 120 seconden.

Ammoniak

Aangenomen is een lek van 30 kg/s. Het falen van de leiding geeft een plas die vervolgens een toxische wolk, in de vorm van een pluim, oplevert. Binnen deze pluim, met een afstand van 300 m van de bron zal 5-95% van de populatie overlijden. Als gemiddelde is hiervoor aangehouden dat 50% van de aanwezigen overlijdt. Dit betekent dat bij dit scenario 18 personen overlijden.

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de LBW van 780 mg/m^3 op een afstand van circa 1.000 m. Dit resulteert in 235 gewonden.

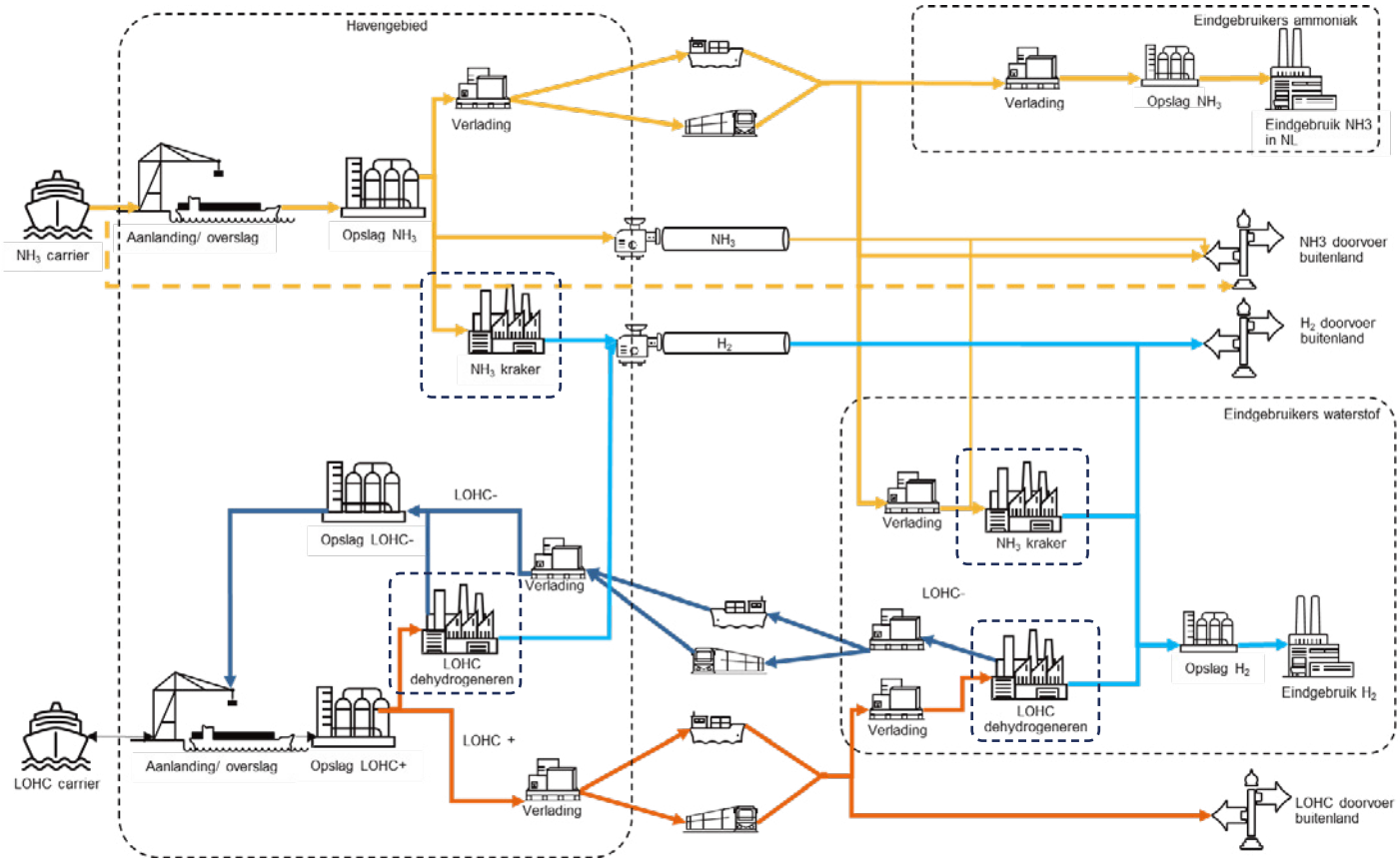
De materiële schade in de omgeving van een toxische wolk is € 0, de kosten van het vervangen van de aansluitleiding zijn verwaarloosbaar.

Tabel 16 **Effecten bij falen aansluitleiding naar de ammoniakkraker.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$5x10^{-7}$
Verwacht aantal doden	18
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	235
Materiële schade	€ 0
Emissies	0,036 kt ammoniak naar de lucht

LOHC

Bij deze calamiteit is voor de vergelijking in de MKBV een capaciteit aangehouden van 200 kg/s. Het falen van de leiding geeft een plas die vervolgens een plasbrand oplevert. De plas heeft daarmee een omvang van 24.000 kg. Ordegrootte omvang van 1.200m2. Qua omvang te vergelijken met het faalscenario voor een tankwagen benzine (uit het Scenarioboek Externe Veiligheid). Binnen een afstand van 5-10 m van de rand van de plasbrand zal 100% van de populatie overlijden. In een tweede schil tot 20 m van de rand van de plasbrand zal afhankelijk van de gedragen kleding 5- 32% van de aanwezigen overlijden. Als input voor de MKBV is uitgegaan van 15% omdat de kleding op het industrieterrein vaak al meer gedegen is dan zomerkleding.



Figuur 29 **Plaatsen van conversie in de ketens.**

Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de warmtestraling van 35 tot lager dan 4 kW/m² tot een afstand van 45 m van de rand van de tankputbrand. Het aantal gewonden varieert in die gebieden van 1 tot 86%. Aangehouden in de MKBV is een waarde van 50%.

De materiële schade in de omgeving van een hittestraling is binnen de 35kW-contour 100% van de objecten. Gelet op de ligging in industrieel gebied is hier een waarde van € 500.000,- aangehouden. Onder de 10kW is er slechts beperkte schade.

Tabel 17 **Effecten bij falen aansluitleiding naar de dehydrogeneerinstallatie.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$5x10^{-7}$
Verwacht aantal doden	1
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	3
Materiële schade	€ 500.000,-
Emissies	0 (door verbranding)

Transport door buisleidingen

Calamiteit 1 – Falen van een compressor of pomp in drukstation

Deze calamiteit betreft het falen van een compressor in een compressorstation of een pomp in een drukstation met een uitstroom van de stof als gevolg.

Waterstof

De compressorstations in deze analyse bevinden zich altijd op industrieterrein 1. De installaties van het landelijk waterstofnetwerk van Hynetwork Services worden niet beschouwd in deze analyse, omdat in alle alternatieven sprake is van een landelijk waterstofnetwerk. Deze calamiteit kan alleen voorkomen in alternatief 3 of 5. De schaalfactor is het aantal conversie-installaties die aan het waterstofnetwerk voeden.

Bij het falen van een compressor stroomt er waterstof uit met een capaciteit van 12,5 kg/s. Dit geeft een jet fire met een vlamlengte van circa 40 m. Binnen deze afstand is de overlijdenskans 98%. Daarnaast geeft dit scenario een afstand van 65 m tot de 4kW-, 55 m tot de 12,5 kW- en 45 m tot de 37 kW-contour.

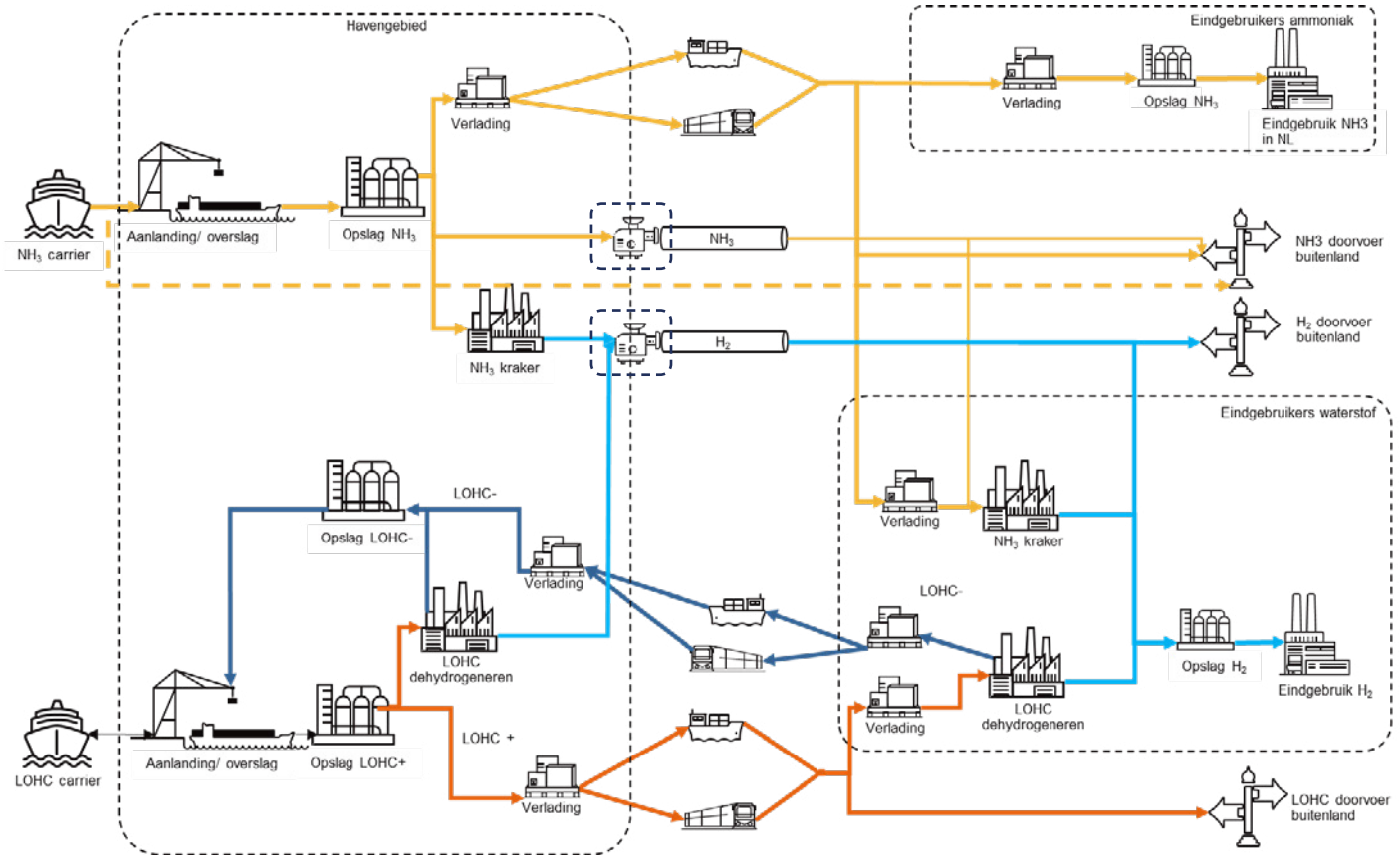
Afhankelijk van het beveiligingssysteem met afsluiters zal dit scenario voortduren. Voor de MKBV is een release time van 120 seconden aangehouden. De impact hiervan is lokaal en zal naar verwachting niet buiten de inrichting komen, maar wel binnen de inrichting aanzienlijke materiële schade veroorzaken. Uitgangspunt is volledige vervanging van een compressorstation.

Tabel 18 **Effecten bij falen van een compressor in het waterstofcompressiestation.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$4{,}4 \times 10^{-3}$
Verwacht aantal doden	1
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	3
Materiële schade	Vervangingskosten compressorstation
Emissies	0 (volledige ontbranding van de waterstof)

Ammoniak

Aangenomen is een lek van 30 kg/s. Het falen van een pomp in het drukstation geeft een plas die vervolgens een toxische wolk, in de vorm van een pluim, oplevert. Binnen deze pluim, met



Figuur 30 **Plaatsen van compressorstations of drukstations in de ketens.**

een afstand van 300 m van de bron, zal 5-95% van de populatie overlijden. Als gemiddelde is hiervoor aangehouden dat 50% van de aanwezigen overlijdt. Dit betekent dat bij dit scenario 18 personen overlijden.

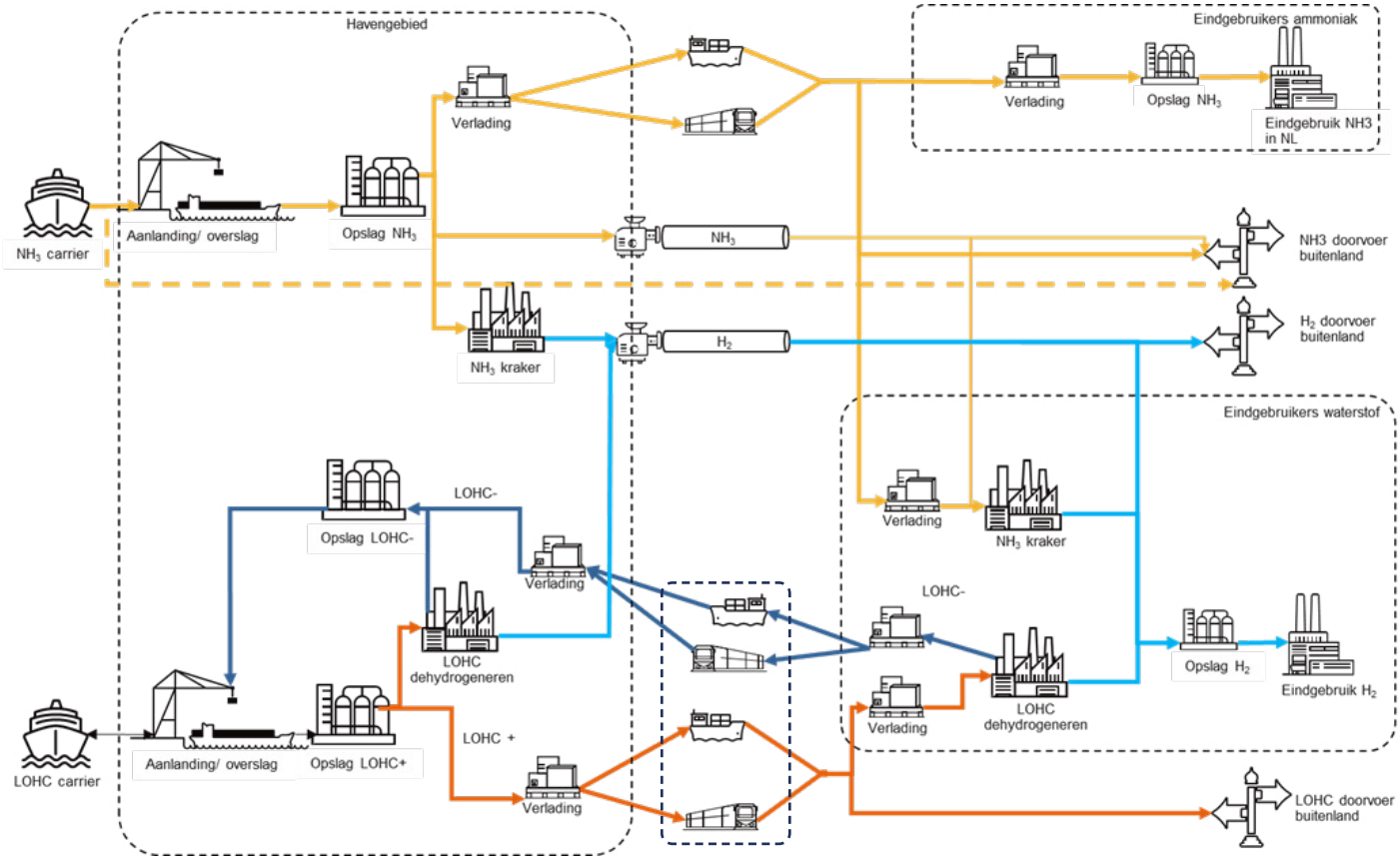
Het aantal gewonden is op een vergelijkbare wijze bepaald op basis van de LBW van 780 mg/m^3 op een afstand van circa 1.000 m. Dit resulteert in 235 gewonden.

Deze calamiteit kan alleen optreden in alternatief 2 waar alle geïmporteerde ammoniak door een buisleiding getransporteerd wordt.

De materiële schade in de omgeving van een toxische wolk is € 0. Voor de MKBV is een release time van 120 seconden aangehouden.

Tabel 19 **Effecten bij falen van een pomp in het ammoniakdrukstation**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	4,4x10^{-3}
Verwacht aantal doden	18
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	235
Materiële schade	€ 0
Emissies	0,036 kt ammoniak naar de lucht



Figuur 31 **Plaatsen van transport in de ketens.**

B.2.6 Calamiteiten bij transport

Hieronder presenteren we eerst de resultaten van de veiligheidsberekeningen wat betreft het transport van ammoniak en LOHC via het spoor en de binnenvaart. We laten ook de resultaten zien van de veiligheidsberekening van het wegvervoer van LOHC. Deze resultaten gebruiken we in de gevoeligheidsanalyse waar we het wegvervoer van LOHC meenemen.

Nadat we de resultaten in tabelvorm hebben gepresenteerd, lichten we de resultaten uitgebreid toe.

Resultaten

In bovenstaande figuur is de plaats in de ketens aangegeven waar het transport van ammoniak en LOHC via het spoor en de binnenvaart plaatsvindt.

Ammoniakvervoer via de binnenvaart

Tabel 20 **Effecten bij grote lekkage in de binnenvaart bij het transport van ammoniak.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$2{,}5x10^{-11}$
Verwacht aantal doden	150
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	600
Materiële schade	€ 5.000.000,-
Emissies	0,186 kt ammoniak naar de lucht

Ammoniakvervoer via het spoor

Tabel 21 **Effecten bij grote lekkage in een ketelwagon bij het transport van ammoniak**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$6{,}8x10^{-11}$
Verwacht aantal doden	150
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	600
Materiële schade	€ 5.000.000,-
Emissies	0,055 kt ammoniak naar de lucht

LOHC vervoer via de binnenvaart

Tabel 22 **De effecten van een grote breuk in een tank bij een binnenvaartschip bij het vervoer van LOHC.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$9{,}1x10^{-10}$
Verwacht aantal doden	180
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	720
Materiële schade	€ 2.000.000,-
Emissies	0,23 kt LOHC naar water

LOHC vervoer via het spoor

Tabel 23 **De effecten van een grote breuk in een tank bij het vervoer van LOHC over het spoor.**

Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$8{,}5x10^{-9}$
Verwacht aantal doden	177
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	708
Materiële schade	€ 25.000.000,-
Emissies	0,036 kt LOHC naar de lucht

LOHC-vervoer via de weg

Tabel 24 **De effecten van een grote breuk in een tank bij het vervoer van LOHC over de weg. We gebruiken deze resultaten bij de gevoeligheidsanalyse waar we wegvervoer van LOHC meenemen.**

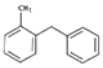
Effect	Waarde
Kans op calamiteit per jaar	$6{,}3x10^{-11}$
Verwacht aantal doden	177
Verwacht aantal ziekenhuis gewonden	708
Materiële schade	€ 15.000.000,-
Emissies	0,023 kt ammoniak naar de lucht

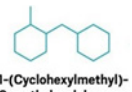
Toelichting bij de resultaten

Inleiding

Eén van de elementen die voor het onderzoek *MKBV Waterstofdragers* in de vergelijking wordt meegenomen, is de omgevingsveiligheid bij transport. In deze paragraaf presenteren wij de uitgangspunten voor de berekeningen van het vervoer van ammoniak en van de geselecteerde LOHC (benzyltolueen[26] Benzyltolueen is niet de enige stof die men tot de LOHC's rekent, maar op dit moment wel de meest kansrijke in Nederland voor commercialisering op (grote) schaal. In Amsterdam hebben Evos, Hydrogenious en Port of Amsterdam samen een initiatief lopen voor benzyltolueen; in Rotterdam is vooral de combinatie MCH-tolueen aan de orde. Er waren en zijn nog enkele andere stoffen regelmatig in beeld, met name dibenzyltolueen en N-ethylcarbazol. Zie ook de berichtgeving over de plannen in de havens.[27]

Transport van ammoniak en LOHC

Ammoniak: NH_3
LOHC: benzyltolueen  $C_{14}H_{14}$, we korten af tot BT. De waterstofrijke evenknie van BT is de volledig gehydrogeneerde verbinding



1-cyclohexylmethyl)-2-methylcyclohexaan , we korten af tot **H_{12}-BT**. Hier is in beide gevallen de 'ortho'-variant gepresenteerd.

De risicoberekeningen zijn niet fictief, maar ook niet voor 100% reëel en compleet. Voorwaarde vooraf is de hoge onderlinge vergelijkbaarheid van de transportketens, door een objectieve benadering.

We lopen de volgende aspecten langs:

- De risicolocaties.
- De infrastructuur.
- De vervoersgegevens per modaliteit.

Uitgangspunten

Algemene uitgangspunten

Voor dit project hebben we voor wat betreft de aantallen van transporten over de weg, per spoor en over het water, aansluiting gezocht bij de algehele vergelijking in dit project, en de hoeveelheden die daar zijn uitgewerkt (zie algemene Excel-sheet met tabbladen).

Resultaten

Referentiealternatief: vervoer van NH_3 per spoor en via binnenvaart

Spoor

In de bestandsnamen van de rekenmodellen staat RA voor referentiealternatief. Zie voor de resultaten de bijbehorende rapporten die met RBM II zijn gemaakt. De berekende gemiddelde afstand tot de plaatsgebonden risico (PR) 10^{-6} per jaar contour is **0 meter**. Het berekende hoogste groepsrisico (GR) per kilometer ligt **tussen 0,006 x de oriëntatiewaarde (OW) en 2,603 x de OW**.

Wij merken hierbij op dat het berekenen van groepsrisico's onder de Omgevingswet minder verplichtend is geworden. De hier aangegeven berekeningen werden vóór de inwerkingtreding van de Omgevingswet uitgevoerd.

Binnenvaart

Zie voor de resultaten de bijbehorende rapporten die met RBM II zijn gemaakt. De berekende, gemiddelde afstand tot de PR 10^{-6} per jaar contour is **0 meter**. Het berekende hoogste GR per kilometer ligt **tussen 0,000 x de OW en 0,013 x de OW**.

26 LOHC punctueel beschouwd; in feite is benzyltolueen juist niet een LOHC (= liquid organic hydrogen carrier), maar de waterstofarme component (de LOC). H12-BT is de eigenlijke LOHC.
27 https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/vopak-richt-zich-samen-met-duits-bedrijf-op-waterstofimport-in-rotterdam
https://www.maakindustrie.nl/nieuws/energie/waterstofactiviteiten-amsterdamse-haven-nemen-toe/

Gevoeligheidsanalyse alternatief 4: vervoer van LOHC per spoor, water en weg

Spoor

In de bestandsnamen van de rekenmodellen staat A4 voor alternatief 4. Zie voor de resultaten de bijbehorende rapporten die met RBM II zijn gemaakt. De berekende **gemiddelde afstand tot de PR 10^{-6} per jaar contour ligt tussen 16 meter en 32 meter**. Het berekende hoogste GR per kilometer is **0,000 x de OW**.

Binnenvaart

In de bestandsnamen van de rekenmodellen staat A4 voor alternatief 4. Zie voor de resultaten de bijbehorende rapporten die met RBM II zijn gemaakt. De berekende **gemiddelde afstand tot de PR 10^{-6} per jaar contour is 0 meter**.
Het berekende hoogste GR per kilometer is **0,000 x de OW**.

Weg

In de bestandsnamen van de rekenmodellen staat A4 voor alternatief 4. Zie voor de resultaten de bijbehorende rapporten die met RBM II zijn gemaakt. De berekende **gemiddelde afstand tot de PR 10^{-6} per jaar contour ligt tussen 19 meter en 20 meter.** Het berekende hoogste GR per kilometer ligt **tussen 0,000 x de OW en 0,015 x de OW**.



Analyse en discussie

Ammoniak, NH_3 (referentiealternatief)

Voor de berekeningen met ammoniak per spoor en via de binnenvaart zijn grote aantallen transporten in de berekening verdisconteerd, en daar blijken geen hoge risicoscores uit voort te komen. Samengevat zijn de volgende resultaten verkregen:

Tabel 28 **Resultaten GR-waarden.**

	Transporten per jaar	Transporten gemidd. per dag	Grootste PR-10^{-6}-contouren	Hoogste GR-waarden
Spoor	56.209 ketelwagens	154 ketelwagens	0 meter	Totaalbereik 0,006 t/m 2,603 x OW. Amsterdam: 0,1 x OW Utrecht: 2,603 x OW
Binnenvaart	1.666 tankschepen	5 tankschepen	0 meter	Totaalbereik 0,000 t/m 0,013 x OW

Bij het zien van deze waarden kan de conclusie zijn dat (ondanks de grote hoeveelheden transporten) de omgevingsveiligheid door ammoniaktransporten niet opvallend wordt bedreigd.

We willen dit graag verklaren, omdat het een opmerkelijk resultaat is en de indruk wekt dat ammoniak niet zo gevaarlijk is. Onze veronderstelling is dat het rekenprogramma RBM II voor ammoniak (veel) te mild rekent en een onderschatting geeft van het risico. Oftewel dat de toxiciteit (en de brandbaarheid) van ammoniak niet tot zijn recht komt in de modellering binnen dit rekenprogramma, aangevuld met de kennis dat de sterkte-eigenschappen van gasketelwagens in het verleden zijn overgewaardeerd.

Een ketelwagen van 55 ton ammoniak zou een aanzienlijke risicoscore moeten vertegenwoordigen, hetgeen wel bij het rekenprogramma Gexcon-Effects is te zien.[28]



Figuur 32 **Visualisatie effecten ammoniak.**

28 https://scenarioboeken.nipv.nl/ketelwagen-ammoniak-giftige-wolk/

De Scenariokaart van het NIPV voor ammoniak per spoor voorspelt doden en gewonden als volgt:

Home Externe Veiligheid Energietransitie Industriële Veiligh

D5	Stedelijk gebied	Verstedelijkt gebied	Landelijk gebied	Slachtoffers buiten (%)			
	Lengte (meter)	Lengte (meter)	Lengte (meter)	†	T1	T2	T3
1e ring	0 - 60	0 - 115	0 - 180	95 - 100	0 - 5	0 - 5	0 - 5
Grens 1e ring: 95% letaal	60	115	180	95	0 - 5	0 - 5	0 - 5
2e ring	60 - 110	115 - 200	180 - 310	50 - 95	0 - 50	0 - 50	0 - 50
Grens 2e ring: 50% letaal	110	200	310	50	0 - 50	0 - 50	0 - 50
3e ring	105 - 195	200 - 335	310 - 520	5 - 50	niet bepaald		
Grens 3e ring:	195	335	520	5			

Figuur 33 **Scenariokaart NIPV voor ammoniak per spoor.**

Deze rekenresultaten met Gexcon-Effects laten zien dat (bij het falen van één ketelwagen) in steden tot een afstand van in ieder geval 110 meter veel slachtoffers kunnen vallen, en dat aantal is nog wat groter wanneer tot 195 meter wordt beschouwd. We zien dit ernstige risico in het geheel niet terug in onze RBM II-berekeningen. Voor nadere toelichting: zie ook bij de gevoeligheidsanalyse hieronder.

LOHC (gevoeligheidsanalyse alternatief 4)

Voor deze benzineachtige stoffen (BT en H12-BT), in te delen als brandbare vloeistoffen (C3 bij spoor; LF2 bij weg en water), geldt dat ze voornamelijk aan het PR bijdragen, dus niet aan het GR.

Tabel 29 **Resultaten PR- & GR-waarden.**

	Transporten per jaar	Transporten gemidd. per dag	Grootste PR-10^{-6}-contouren	Hoogste GR-waarden
Spoor	234.514 ketelwagens	643 ketelwagens	32 meter	Niet (nl. alles 0,0 x OW)
Weg	242.743 tankauto's	665 tankauto's	19-20 meter	Bereik 0,0 t/m 0,015 x OW
Binnenvaart	1.476 tankers	4 tankers	0 meter	Niet (nl. alles 0,0 x OW)

Bij spoor en weg is de PR-contour aanzienlijk, hetgeen verwacht kan worden bij zeer grote hoeveelheden brandbare vloeistoffen.

Dat het groepsrisico niet of nauwelijks aanwezig is, is opnieuw te verklaren met de achterliggende modellering: de C3-transporten tellen niet mee in de berekening van het groepsrisico (behalve als er ook A of B2/B3 aanwezig is in dezelfde trein). Ook deze resultaten leiden tot een vertekend beeld, alsof het aantal transporten er in het geheel niet toe doet voor het groepsrisico. Daarom is tevens gebruikgemaakt van het Scenarioboek Externe Veiligheid en is de LOHC als een benzine-gelijkende stof uitgewerkt.

Tussentijdse conclusie

De intentie om het formele, verplichte rekenprogramma RBM II te gebruiken in de MKBV, leidt tot vraagtekens bij de correctheid en validatie van de rekenresultaten. De huidige resultaten suggereren dat het vervoer van ammoniak, zelfs op grote schaal en dwars door grote steden, niet voor grote risicoknelpunten zorgt.

Dit kan het beeld oproepen dat het gevaar van de stof eigenlijk wel meevalt. Zo'n standpunt kan een argument worden in toekomstige discussies en beslissingen. Het onjuist inschatten van de eigenschappen van dit toxische gas is echter niet verantwoord. Tijdens kerst 2022 is ammoniak vrijgekomen bij een spoorongeval in Oost-Servië[29] en daar (in een heuvellandschap met nauwelijks woningen en gebouwen) is geconstateerd dat een persoon in het open veld is omgekomen (het slachtoffer is in de omgeving aangetroffen). Voor een *buisleiding* met ammoniak (zie verderop in deze bijlage) is de thematiek vanuit een andere invalshoek bekeken. Daarom is de onderlinge vergelijking van de transportmodaliteiten niet geheel gelijkwaardig.

Ons onderzoeksteam heeft dit voorgelegd aan de opdrachtgever en aan het RIVM vanwege de inhoudelijke expertise en de formele positie bij het beleid voor omgevingsveiligheid. Onze inzichten zijn in dit overlegproces niet tegengesproken. De RBM II-berekeningen voor ammoniak (in ieder geval voor spoor) zijn niet overeenkomstig de actuele stand der techniek en kennis.

Om te bevestigen dat alleen bij nóg onrealistischer aantallen een PR-10-6 contour kan worden berekend, is een extreme gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Voor het vervoer van ammoniak over het spoor en via de binnenvaart zijn daartoe ook de hoeveelheden met onderstaande drie factoren vermenigvuldigd:

Tabel 30 **Factoren gebruikt voor vervoer ammoniak over het spoor en via binnenvaart.**

T.o.v. huidige aantallen
x 0,5
x 2
x 10

29 Zie incidentrapport op https://www.era.europa.eu/era-folder/2022-16 [Pirot Derailment].

Voor het vervoer van ammoniak over het spoor:

Tabel 31 **Resultaten vervoer ammoniak over het spoor.**

	Ketelwagen-equivalenten per jaar (stofcategorie B2)	Gemiddelde afstand tot PR 10^{-6} per jaar contour	Gemiddelde afstand tot PR 10^{-7} per jaar contour	Gemiddelde afstand tot PR 10^{-8} per jaar contour	Hoogste GR per km
RA	56.029	-	138 m	545 m	2,603 x OW
RA x 0.5	28.015	-	19 m	443 m	1,301 x OW
RA x 2.0	112.058	-	280 m	631 m	5,206 x OW
RA x 10.0	560.290	138 m	545 m	786 m	26,026 x OW

Voor het vervoer van ammoniak via de binnenvaart (over het Amsterdam-Rijnkanaal) door Utrecht:

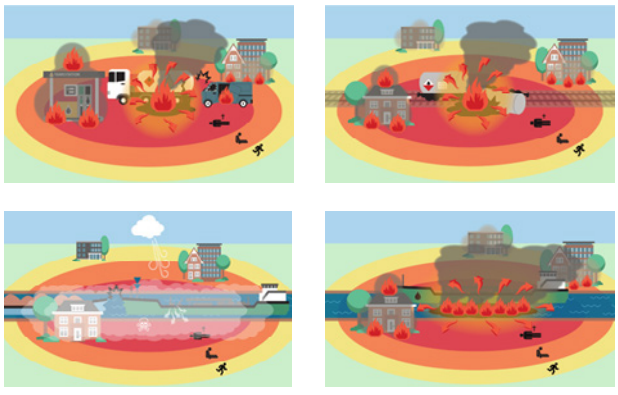
Tabel 32 **Resultaten vervoer ammoniak via de binnenvaart.**

	Binnenvaart-schepen per jaar (stofcategorie GT3)	Gemiddelde afstand tot PR 10^{-6} per jaar contour	Gemiddelde afstand tot PR 10^{-7} per jaar contour	Gemiddelde afstand tot PR 10^{-8} per jaar contour	Hoogste GR per km
RA	1.666	-	-	327 m	0,005 x OW
RA x 0.5	833	-	-	266 m	0,002 x OW
RA x 2.0	3.332	-	117 m	376 m	0,010 x OW
RA x 10.0	16.660	-	327 m	476 m	0,050 x OW

We zullen deze resultaten niet uitgebreid duiden. Het is buiten elke realiteit om 5 miljoen ketelwagens per jaar als prognose toe te passen, evenals ruim 16.000 binnenvaartschepen.

Al met al kunnen deze rekenexercities gebruikt worden in die zin dat bekend is hoe bij stedelijke omgevingen zich de risico's verhouden.

Voor de (veiligheids)resultaten in de MKBV is geen gebruikgemaakt van de RBM II-berekeningen, maar van de EV-scenariokaarten (Scenariokaarten Externe Veiligheid - Scenarioboeken (nipv.nl)).



Figuur 33 **Vier scenario's uit het Scenarioboek, v.l.n.r.: tankauto benzine, ketelwagen benzine, tankschip ammoniak, tankschip benzine. Benzine is geselecteerd als representatief voor LOHC.**

Wat de scenariokaarten vooral ook benadrukken, is dat er zowel doden als gewonden mogelijk zijn bij dergelijke ongevallen. Dat betekent veel voor de voorbereiding en voor de repressie.

Maatregelen

De MKBV is niet primair gericht op de (preventieve en curatieve) maatregelen die bij de vijf alternatieven horen. Toch is een uitzondering gemaakt voor ammoniak, omdat bij de verwachte zeer grote import- en transportstromen een noodzakelijke voorbereiding op een calamiteit verstandig wordt geacht. Daarom is in de vergelijking aandacht besteed aan opleiding en de aanschaf van middelen (gaspakken), en ook aan maatregelen ten behoeve van burgers. Met verwijzing naar de Omgevingswet en naar de specifieke bepalingen rond de voorschriftengebieden voor gifwolken, attenderen we tevens op artikel 4.124, lid 4 van het Besluit bouwwerken leefomgeving: ... *"Een mechanisch ventilatiesysteem heeft een voorziening waarmee het systeem handmatig kan worden uitgeschakeld bij een externe calamiteit die kan leiden tot een voor de gezondheid nadelige kwaliteit van de binnenlucht".*

Buisleidingen

Ammoniak

Ammoniaktransport per buisleiding

Voor een gefundeerde beoordeling van ammoniaktransport per buisleiding ontbreekt op dit moment de mogelijkheid om dit via een formele QRA uit te voeren. Daarom voeren we voor dit element in de MKBV een kwalitatieve beschouwing uit, op basis van actuele inzichten.

Formele rekenmethodiek niet toepasbaar

Voor risicoanalisten die een gevalideerde, officiële en waarheidsgetrouwe QRA zouden willen opstellen voor ammoniak door een toekomstige buisleiding in (of beter: onder) de openbare ruimte, zijn er te weinig aangrijpingspunten. Dat hangt samen met de volgende onzekerheden, tekortkomingen en aandachtspunten:

- Aggregatietoestand (druk en temperatuur) ammoniak.
- Buisdiameter en buismateriaal.
- Uitstroomhoeveelheden (inblok) en -snelheden (gatgrootte).
- Alleen toxisch of ook brandbaarheid?
- Rol van pompen en andere technische onderdelen; stations.
- Het traject: Delta Rijn Corridor[30] e.a.

Hieronder geven we in het kort aan waarom we niet zonder meer de rekenmethodiek kunnen toepassen.

Aggregatietoestand ammoniak

Ammoniak is gasvormig bij 1 atmosfeer en kamertemperatuur. Voor het transporteren van de stof in een buisleiding bestaan verscheidene opties. Het is gangbaar om *vloeibare* ammoniak te transporteren. Dat kan onder verhoogde druk of dankzij koeling. Beide mogelijkheden komen in de praktijk voor, en ook tussenvormen (koeling niet tot aan kookpunt (-33°C), maar iets hoger). Voor een QRA is het nodig om een duidelijk idee te hebben van de aggregatietoestand en de heersende druk.

Buisdiameter en buismateriaal

De buisdiameter bepaalt mede de hoeveelheid die bij een lekkage kan vrijkomen, en kan ook betekenis hebben voor de sterkte en bestendigheid tegen diverse soorten impact. Onder bedrijfsomstandigheden biedt een grotere buis daarnaast in beginsel een hogere capaciteit (doorzet). In de bestaande praktijk van zeer lange ammoniakleidingen in het buitenland[31], namelijk in de VS en in Rusland/Oekraïne, zijn diameters gekozen van 20 à 25 cm., respectievelijk 35 cm. Wat Nederland voor ogen heeft voor de Delta Rijn Corridor qua buisdiameter, is niet bekend. In vergelijking met aardgasleidingen kan worden verwacht dat voor ammoniak minder grote (minder brede) buizen worden ontworpen en geproduceerd. In een recent rapport van Antea[32] is uitgegaan van een reeks van mogelijke diameters van 3 tot 16 inch (7,5 tot 41 cm) binnen Nederland, en tot 24 inch (61 cm) in internationale netwerken.

De buisdiameter, temperatuur en druk zijn in hun gezamenlijke combinatie dus sterk bepalend voor de maximale capaciteit [doorzet per jaar of per dag] die door een buisleiding kan worden getransporteerd. Wanneer op de lange termijn zeer grote hoeveelheden door één en dezelfde buis moeten worden vervoerd, zal die grens in zicht komen. De ontwerpparameters kan men daarom het best al toetsen aan de prognoses voor een bepaald jaar in de toekomst.

Over het materiaal van een buisleiding voor ammoniak is nog weinig definitiefs te concluderen. In ieder geval zijn er twee cruciale eisen: de eigen sterkte van de buis (onder bedrijfsomstandigheden en bij afwijkingen daarvan, denk onder andere aan de binnentemperatuur) en de langdurige chemisch-fysische bestendigheid tegen ammoniak. Ammoniak is een reactieve, corrosieve stof en kan bepaalde metaalsoorten aantasten. Niet alleen bijvoorbeeld koper en aluminium, maar ook vele staalsoorten; bij aanwezigheid van verontreinigingen als water of zuurstof kan dit nog sneller gebeuren. Dus het materiaal moet zeer bestendig zijn óf een interne coating of liner moet de hoogste mate van resistentie bewerkstelligen.

Uitstroomhoeveelheden en -snelheden

Afhankelijk van de onderlinge afstand van afsluiters op de leiding en de reactietijd om ze bij alarmomstandigheden af te sluiten (het zogeheten inblokken), kan de uitstroomhoeveelheid bij een lekkage gekwantificeerd worden. De ordegrootte van de inblokdata en bijkomende gegevens ontbreken; dit zal pas in de toekomst een inputgegeven worden. Op voorhand staat vast dat dit een cruciaal veiligheidsvraagstuk gaat betreffen.

Een bijkomend onderwerp is het gedrag van ammoniak na uitstroming. Dat hangt onder meer af van de aggregatietoestand, de druk, de temperatuur van de ammoniak,

30 In het verleden werd de naamgeving Delta Corridor gebruikt.

31 De VS en Rusland/Oekraïne kennen ammoniakpijpleidingen van ruim 5.000 respectievelijk 2.400 km lengte.

32 *Transport van waterstofdragers door buisleidingen en bijbehorende risico's.* Antea (2023).

het weer en het moment van lekken (bij een open situatie (graven, onderhoud en dergelijke) of abrupt onder de grond.

Alleen toxisch of ook brandbaarheid?

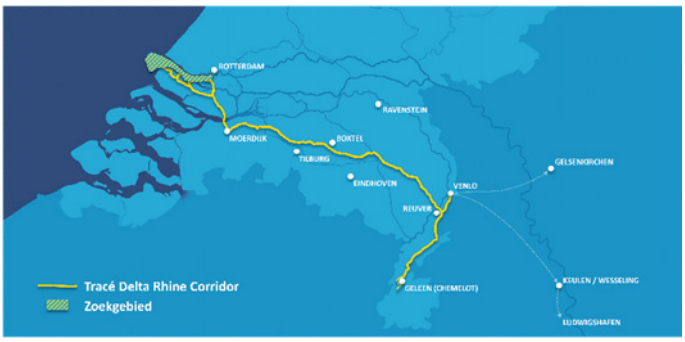
Het toxisch effect domineert bij ammoniak meestal het brand (en explosie-)effect. In het externe veiligheidsbeleid is het gebruikelijk om alleen naar de toxische effecten te kijken. Dit is in zekere zin een onderschatting van het totale risicopatroon. Wij pleiten hier niet voor het verdisconteren van de brandbaarheid, maar wijzen op die mogelijkheid.

Rol van pompen en andere technische onderdelen

Een buisleidingsysteem voor het transport van gevaarlijke stoffen bestaat niet alleen uit de rechte, doorlopende buisinfrastructuur, maar ook uit intermediaire stations voor diverse doeleinden zoals het in werking hebben van pompen, en bij ammoniak eventueel ook koelsystemen. Dat zijn tegelijkertijd plaatsen waar het systeem juist kan falen en waar mogelijk ammoniak ontsnapt. Voor een volledige QRA dient er inzage te zijn in deze systemen en hun risico's. Het risico dat ammoniak door zijn redelijk agressieve eigenschappen bijvoorbeeld ongeschikte (rubberen) afdichtingen aantast, is dan een bijkomend maar belangrijk faalscenario.

Het traject – De Delta Rijn Corridor

Vooralsnog is in Nederland geen concreet besluit genomen over de aanleg en exploitatie van een ammoniakleiding binnen de Delta Rijn Corridor, al wordt die optie momenteel serieus beoogd. Het hangt onder meer af van de vraag of een geschikte partij dit op zich wil nemen. In ieder geval wordt daarvoor door de overheid de gelegenheid geboden, getuige diverse Kamerbrieven en ook de website van de DRC gaat hiervan uit.



Figuur 34 **Visualisatie Nederlands deel Delta Rijn Corridor.**

Op dit moment zijn nog geen andere trajecten binnen Nederland in ogenschouw genomen. Wij gaan er in deze MKBV dan ook van uit dat er vooralsnog alleen voor een buisleiding tussen het Havengebied van Rotterdam en Chemelot, respectievelijk Venlo-grens sprake is van een toekomstige NH_3-leiding.

Inzichten met betrekking tot de risico's van een toekomstige ammoniakleiding

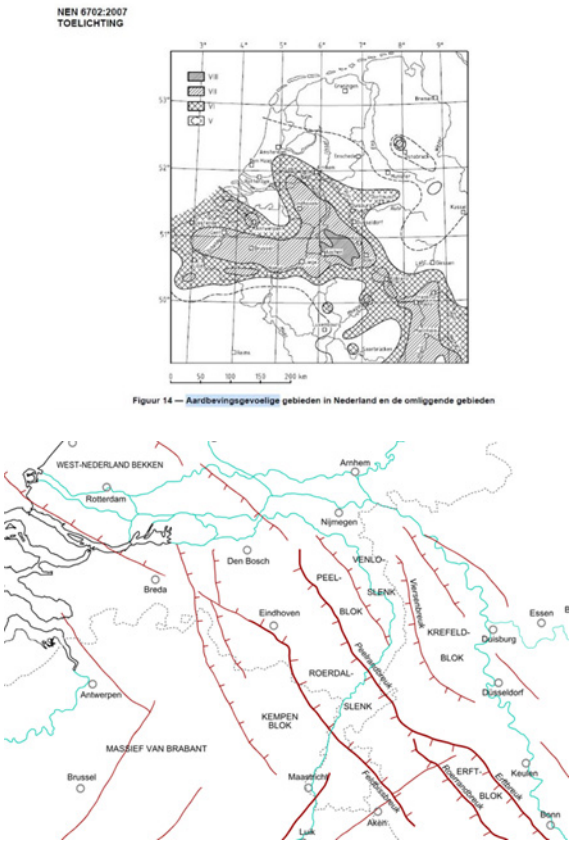
Gegeven de mogelijkheid en intentie om een lange ammoniakleiding aan te leggen in de Delta Rijn Corridor – die grotendeels in het open landschap zal worden aangelegd, dus buiten bijna alle bebouwde kommen om – kan een kwalitatieve schatting worden gemaakt van de kans op een ongeval en de effecten daarvan.

Kans op een incident met een ammoniakleiding

Deze kans hangt af van vele factoren, die onderling sterk variëren. We sommen een reeks mogelijke oorzaken op, met daarbij de kanttekening dat een deel wellicht ten onrechte genoemd wordt en andere niet zijn vermeld en daarmee onderschat.

- Intrinsiek falen (bijvoorbeeld vanwege corrosie, veelvuldige drukvariaties of productiefout).
- Intern falen (grote afwijkingen van de normale bedrijfsvoering (druk, temperatuur, of samenstelling gevaarlijke stof)).
- Graafschade en dergelijk (bijvoorbeeld door een dragline of graafmachine, of door een boorproces).
- Aardbeving of extreme trilling(en).
- Incident in een nevenbuisleiding.
- Tijdens onderhoud.
- Opzettelijke (terroristische) beschadiging.

Tegen de meeste van deze mogelijke oorzaken kan iets worden ondernomen, al zal een aardbeving niet snel af te weren zijn.



Figuur 35 **Aardbevingsgevoelige gebieden.**

In de bovenstaande figuur is te zien dat de DRC door aardbevingsgevoelige gebieden loopt (toenemende grijstint heeft hogere kans), zoals de kruising met de Peelrandbreuk.

De aanleg van een ammoniakbuisleiding vergt, gezien de kans op een lekkage, een weloverwogen ontwerpproces. Daarnaast is het noodzakelijk om het hele traject op adequate wijze te bewaken/beschermen en te inspecteren.

Effect van een incident met een ammoniakleiding

Bij dit aspect gaat het ten eerste om de hoeveelheden en de verspreiding van de vrijgekomen stof (vloeistof/gas) en ten tweede om de blootstelling van (een groep) mensen aan een bepaalde concentratie van de giftige stof.

De hoeveelheden die bij een bepaald incident kunnen vrijkomen, hangen af van de dimensies van een lek (gatgrootte), de uitstroomsnelheid (lees: druk) en met name de hoeveelheid ammoniak die in een bepaald blok aanwezig is en de reactietijd voor het dichtzetten van het blok (= x meter lengte van de buisleiding en y centimeter diameter ervan). De diepteligging en de omstandigheden boven de buis (dichte grond of een open gegraven plek) bepalen de primaire stroom; het kan gaan om een fontein of meer een plasvormende uitstroming. De daaropvolgende verspreiding is afhankelijk van de buitentemperatuur en vooral ook van de wind- en weersituatie. Zo kan ammoniakdamp door sterke regen deels naar de grond terug worden gevoerd, het zogeheten uitregenen. Dit heeft grote implicaties voor het milieu.

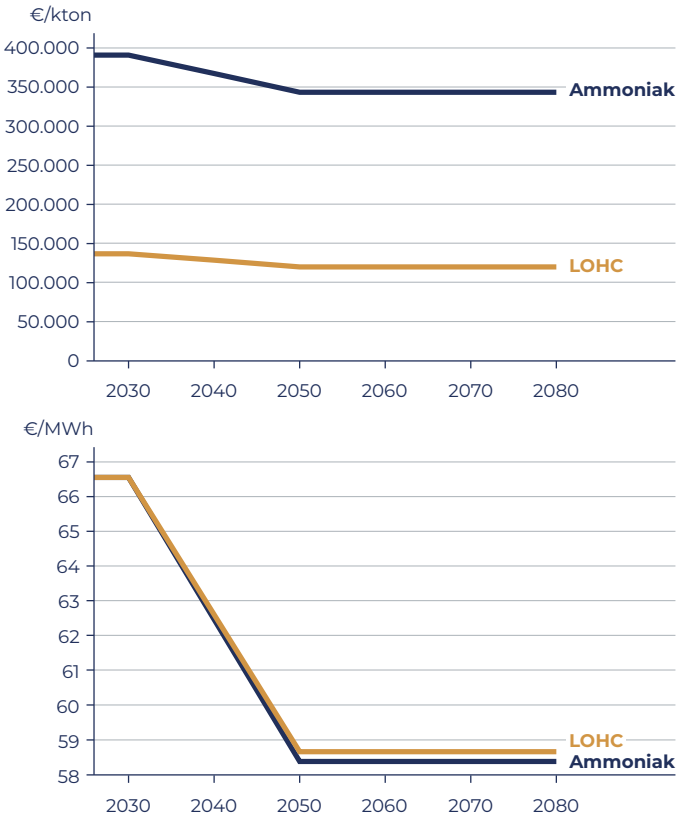
Het verspreidingsgebied van een ammoniakwolk kan onder ongunstige omstandigheden tot (veel) meer dan 1 km reiken.

Ten slotte is het effect op mensen in de omgeving een cruciale factor. Zijn er weinig of veel mensen? Zijn zij zich bewust van het incident? Kunnen ze zich nog beschermen? Is de concentratie (te) hoog of niet? In ieder geval is vluchten naar een binnen gelegen plek (huis of ander gebouw/schuilplaats) beter dan buiten blijven, voor zover dat kan en lukt.

Bijlage 3. Monetarisatie

B.3.1 Economische kosten (algemeen)

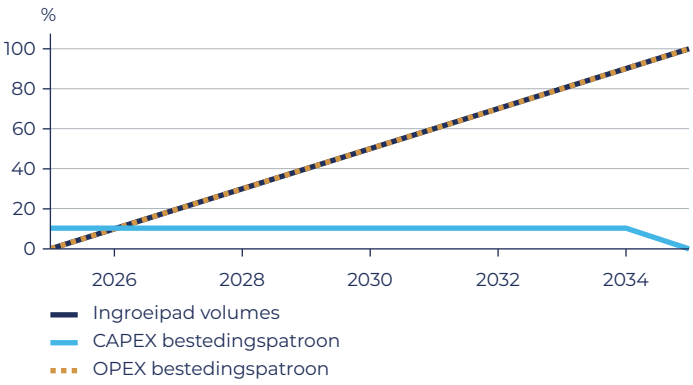
Voor de **importprijzen** van zowel ammoniak als LOHC is dezelfde bron gebruikt.[33] In deze bron worden de importprijzen van verschillende waterstofdragers uit verschillende landen naar België met elkaar vergeleken voor de jaren 2030 en 2050. Wij hebben voor beide waterstofdragers een gemiddelde genomen uit vijf verschillende landen (Australië, Chili, Oman, Marokko en Spanje) voor het jaar 2030 en 2050. Deze prijzen liggen dicht bij elkaar. Vervolgens is er voor de periode van 2030 tot en met 2050 (de tijdspanne van ons onderzoek) gebruikgemaakt van interpolatie om de importprijs per jaar voor ammoniak en LOHC te berekenen. Voor de periode vóór 2030 is de prijs van 2030 aangehouden. Voor de periode vanaf 2050 tot en met 2080 hebben wij de prijs uit 2050 aangehouden. De prijscurve (€/kton en €/MWh) voor ammoniak en LOHC in de tijd is in de onderstaande figuur te zien.



Figuur 36 **Importprijs ammoniak en LOHC.**

Het importvolume is in principe elk jaar hetzelfde, namelijk 1.578 kton H_2-equivalent. In de eerste paar jaren maken wij echter gebruik van een **ingroeipad**. Dit betekent dat in het eerste jaar (2025) 0% van het totale volume (1.578 kton H_2-equivalent) wordt geïmporteerd. Elk jaar stijgt dit percentage met 10% (in 2026 10%, in 2027 20% en in 2028 30%) tot er in 2035 100% van het totale volume wordt geïmporteerd.

In dit onderzoek hanteren we ook **een CAPEX- en een OPEX-bestedingspatroon**. Het **CAPEX-bestedingspatroon** is gekoppeld aan het ingroeipad van de volumes. Dat wil zeggen dat in het jaar voordat de eerste volumes Nederland binnenkomen de CAPEX-betalingen (bijvoorbeeld voor opslagterminals, krakers, dehydrogenatie-installaties en buisleidingen) al gedaan worden. We hanteren een termijn van tien jaar waarin elk jaar 10% van de totale investering betaald wordt. Het **OPEX-bestedingspatroon** volgt een gelijke trend met het ingroeipad van volumes. Dit wil zeggen dat als in 2027 20% van het totale volume wordt geïmporteerd, er ook 20% van de totale OPEX kosten wordt betaald. Wanneer 100% van het totale volume wordt geïmporteerd, wordt er ook 100% van de totale OPEX-kosten betaald, etc. Het volume-ingroeipad, het CAPEX- en OPEX-bestedingspatroon worden in de onderstaande figuur geïllustreerd.



Figuur 37 **Ingroeipad volumes, CAPEX- en OPEX-bestedingspatroon.**

De investeringen (CAPEX) die aan het begin (2025 tot circa 2035) worden gedaan, zijn voor opslagterminals, krakers, dehydrogenatie-installaties, buisleidingen, compressors/ pompstations, treinen, de binnenvaart en wegvervoer. Het materieel waarin geïnvesteerd wordt, heeft een bepaalde

33 *Shipping sun and wind to Belgium is key in climate neutral economy.* Hydrogen Import Coalition (2020).

levensduur. Dit betekent dat er gedurende de tijdspanne van de MKBV (2025 t/m 2080) **geherinvesteerd** moet worden. Voor bovenstaande investeringen hanteren we de volgende levensduur:

- Opslagterminals: 25 jaar.
- Buisleidingen: 60 jaar (geen herinvestering nodig).
- Kraakinstallaties: 30 jaar.
- Dehydrogenatie-installaties: 20 jaar.
- Compressors en pompen: 20 jaar.
- Trein: 20 jaar.
- Wegvervoer: 8 jaar.
- Binnenvaart: 20 jaar.

Voor het transport van waterstofdragers via verschillende modaliteiten houden we er rekening mee dat sommige modaliteiten niet altijd beschikbaar zijn. Door de beperkte **beschikbaarheid van modaliteiten** (% van 365 dagen) hebben vervoerders van waterstofdragers extra kosten. We nemen aan dat de kosten als gevolg van het niet beschikbaar zijn van een modaliteit gelijk zijn aan de prijs van de volumes waterstofdragers die niet geleverd kunnen worden.[34] We vermenigvuldigen dat bedrag met het percentage tijd dat de modaliteit niet beschikbaar is. Van dit percentage trekken we altijd 1% af, om te corrigeren voor de opslag bij de eindgebruiker. We gaan er dus van uit dat de eindgebruiker opslagmogelijkheden heeft om 3,65 dagen (1% van een jaar) in bedrijf te blijven zonder nieuwe toevoer van een waterstofdrager. De formule om de kosten voor onbeschikbaarheid van een modaliteit te berekenen, luidt dan: *((99% - x% beschikbaarheid) * ingroeipad volume (%) * volume (kton/jaar) * prijs (€/kton)*. We hanteren de volgende beschikbaarheid van modaliteiten:

- Beschikbaarheid spoor: 98,50%.[35]
- Beschikbaarheid weg: 98,60%.33
- Beschikbaarheid binnenvaart: 98,00% (eigen aanname).
- Beschikbaarheid buisleiding: 99,99%.[36]

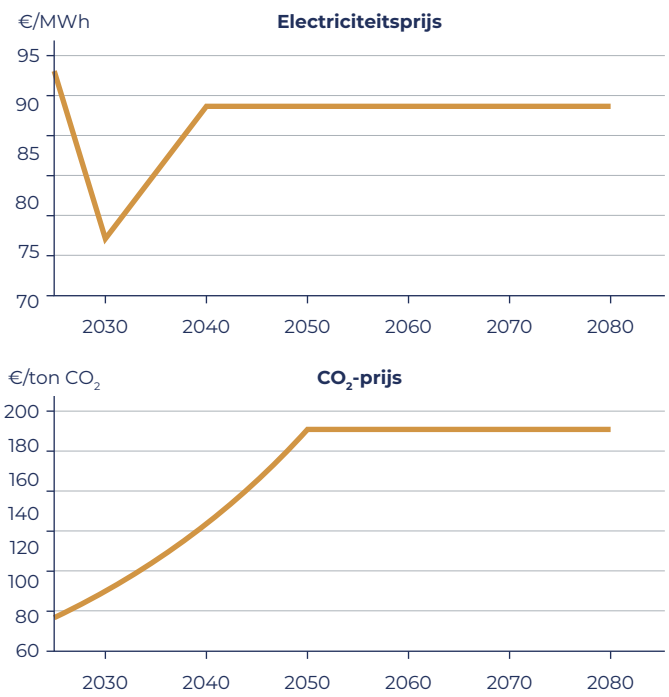
In dit onderzoek rekenen we met verschillende **grondstof- & energieprijzen**:

- Elektriciteit: voor de prijs van elektriciteit maken we gebruik van de groothandelprijzen uit de KEV 2022.[37] Daarbij tellen we de energiebelasting op. De gehanteerde elektriciteitsprijs is weergegeven in figuur 38.

- CO_2-prijs: voor de CO_2 rekenen we een prijs van 65 €/ton (€2021). We indexeren de prijs tot en met 2050 met 3,5%/jaar. Voor de jaren 2050 tot en met 2080 houden we het prijsniveau van 2050 aan.

- Diesel: voor diesel rekenen we over de jaren een constante prijs van € 1,60 per liter.[38]

Restwarmte: voor restwarmte rekenen we over de jaren een constante prijs van € 0,0188 per kWh.[39]



Figuur 38 **Elektriciteitsprijs en CO_2-prijs gebruikt in het onderzoek.**

Bij het gebruik van buisleidingen nemen we aan dat een gedeelte van de getransporteerde waterstof weglekt uit de buisleiding. Dit getal is gelijk aan 0,01% per jaar van het getransporteerde volume.[40] De maatschappelijke kosten van deze **waterstoflekkage** berekenen we door het weggelekte volume te vermenigvuldigen met het Global Warming

34 Enerzijds is de economische schade in sommige gevallen mogelijk groter door volledig stilvallende productieketens, maar anderzijds worden mogelijk ook mitigerende maatregelen genomen zoals het tijdelijk overstappen op alternatieve grond- of brandstoffen of het produceren van andere producten.
35 Staat van de Infra. Rijkswaterstaat (2021).
36 Quick scan buisleidingen energietransitie en ondergrond (BEO): een verzameling van inzichten in ontwikkelingen rond buisleidingen, energietransitie en ondergrond en de handelingsperspectieven voor RWS (2019).
37 PBL. Klimaat- en energieverkenning 2022.
38 CBS. Dieselprijs.
39 PBL (2021). Conceptadvies SDE++ 2022 benutting restwarmte uit industrie.
40 Op basis van overleg met expert Gasunie.

Potential (GWP; 16 kg CO_2-eq per 1 kg waterstof). Vervolgens vermenigvuldigen we de kilo's CO_2 met de milieuprijzen voor CO_2.

B.3.2 Monitorings- en veiligheidskosten

De kosten voor **hulpdiensten bij ammoniaktransport** hebben een groot aandeel in de totale monitorings- en veiligheidskosten. Voor een incident met ammoniak zijn naast de primaire taken meerdere aanvullende rollen binnen de hulpdiensten nodig om veilig te kunnen handelen en gelijk het incident te bestrijden. Denk aan de gaspakkendrager en de verkenner bij de brandweer. De impact van een calamiteit met ammoniak is naar verwachting tien tot twintig keer groter dan van een calamiteit met LOHC's. Gegeven de verwachte omvang van mogelijke incidenten met ammoniak, achten wij het realistisch de capaciteit van een veiligheidsregio uit te breiden met circa 10 fte (1% van de totale omvang), voor die veiligheidsregio's waar met extra grote volumes ammoniak wordt gewerkt. Het gaat hierbij dus niet noodzakelijkerwijs enkel om uitbreiding van het brandweerkorps; uitbreiding kan ook binnen de zorgkolom noodzakelijk zijn. De uitbreiding van de capaciteit gaat ook gepaard met uitbreiding van materiaal (zoals gaspakken), materieel, trainingen en huisvesting. Zodoende rekenen we in onze analyse met een stijging van 1% op de uitgaven van de brandweer (voor alle 25 veiligheidsregio's bij elkaar € 1,1 miljard in prijspeil 2015[41]). Bij ammoniakvervoer via spoor, binnenvaart of buisleidingen gaan we ervan uit dat deze uitbreiding voor de helft van de Nederlandse veiligheidsregio's noodzakelijk is. Bij ammoniak kraken in de haven geldt dit voor een kwart (25%) van de helft (50%) van de Nederlandse veiligheidsregio's (12,5% van de Nederlandse veiligheidsregio's), omdat in dat geval ammoniak zich alleen in de betreffende havens bevindt (en gekraakt als waterstof door de rest van het land gaat).

Op basis van consultatie van veiligheidsexperts hebben wij aangenomen dat 10 fte extra nodig zijn om het transport van ammoniak te **monitoren**. Door het aantal fte te vermenigvuldigen met een salaris (€ 100.000,- per jaar) berekenen we de monitoringskosten. Onder monitoren verstaan we bijvoorbeeld het in de gaten houden van sensoren en andere meetinstrumenten die de veiligheid van de infrastructuren borgen.

In dit onderzoek begroten wij extra VIC-inspanningen vanwege de toename van het transport van ammoniak, dat wil zeggen dat er toegesneden kennisopbouw gaat plaatsvinden om personen die zijn blootgesteld aan ammoniak (in diverse gradaties van lichamelijke aantasting) zo goed mogelijk te kunnen behandelen. Voor de kosten (per jaar) rekenen wij met de jaarbegroting van een referentiecentrum.[42] Dit bedraagt circa € 3 miljoen per jaar.

B.3.3 Ruimtelijke impact

Bij de berekening van de ruimtelijke impact maken wij gebruik van een representatief tracé van 200 kilometer. De waterstofdragers worden in de haven opgeslagen en, in sommige alternatieven, geconverteerd naar gasvormige waterstof. Vervolgens wordt de waterstofdrager via verschillende modaliteiten getransporteerd naar de eindgebruiker. De modaliteiten spoor, weg en binnenvaart maken gebruik van bestaande infrastructuren. Wij nemen daarom aan dat er voor het transport van waterstofdragers via deze modaliteit geen grond *bewerkt* of *aangeschaft* moet worden. Voor de opslag en conversie van de waterstofdragers in de haven nemen wij aan dat er industriële grond *aangeschaft* moet worden. Voor de aanleg van buisleidingen nemen wij aan dat er landbouwgrond *bewerkt* moet worden. Hieronder zetten we de kosten die gemaakt worden op een rij.

Voor de **industriële grond die aangeschaft moet worden** berekenen we de kosten door het aantal benodigde m^2 te vermenigvuldigen met de grondprijs en met de bijkomende kosten voor het verwerven van de grond.

Voor de grondprijs van industriegrond rekenen wij met € 142,06 per m^2.[43]

De bijkomende kosten voor het verwerven van de grond bestaan uit:[44]

- onderzoekskosten (€ 2,14 per m^2)
- bouw- en woonrijp maken (€ 60,05 per m^2)
- Plan- en proceskosten (€21,59 per m^2)
- Overige kosten (€6,78 per m^2)

Voor de **landbouwgrond die bewerkt moet worden** berekenen we de kosten door het benodigde aantal m^2 te

41 Uitgaven gemeenten brandweer gedaald. CBS.

42 Antigifcentrum (België). Wikipedia.
43 Grondprijzen en grensregio's. CPB (2015).
44 Financiering van gebiedsontwikkeling: Een empirische analyse van grondexploitaties. PBL (2011).

vermenigvuldigen met de kosten van de afsluitvergoeding zakelijk recht[45] en de gewassentarieven[46]. De afsluitvergoeding zakelijk recht is een bedrag dat Gasunie gebruikt om particuliere grondeigenaren te vergoeden wanneer er werkzaamheden aan aardgasleidingen plaatsvinden op de grond van particuliere eigenaren. Het gewassentarief dat wij hanteren is ook afkomstig van Gasunie. Dit tarief gebruikt Gasunie om particuliere grondeigenaren te vergoeden omdat gewassen niet geteeld kunnen worden tijdens de werkzaamheden.

- **De afsluitvergoeding zakelijk recht** bestaat uit drie componenten:
  - De afsluitvergoeding zelf (€ 3,86 per m^2).
  - Meewerkvergoeding werkstrook bij aanleg (€ 1,54 per m^2).
  - Meewerkvergoeding werkstrook bij beheer (€ 0,77 per m^2).

- **De vergoeding voor de gewassen** bestaat uit twee componenten:
  - Voorschot vergoeding gewassen (€ 0,07 per m^2).
  - (Gemiddelde) vergoeding gewassen (€ 0,44 per m^2). Er staan verschillende gewassen op de lijst van Gasunie. Wij hebben een gemiddelde genomen van de vergoedingen van deze gewassen.

Tot slot rekenen we ook een beschermingsmaatregel voor huizen langs het spoor toe aan ruimtelijke impact. De maatregel **'het afschakelbaar maken van de ventilatie'** bij nieuwbouwwoningen langs het spoor, de binnenvaart en nabij buisleidingen moet ervoor zorgen dat bij een giftige ammoniakwolk de veiligheid van de bewoners wordt vergroot. Naar verwachting worden binnenkort de nieuwe gifwolkaandachtsgebieden vastgesteld op 300 meter bij vervoer via spoor, weg en binnenvaart en op 1,5 km bij vaste inrichtingen, zoals buisleidingen, zoals aangegeven in de Kamerbrief I E NW/BSK-2023/165333 van 17 juli 2023.

Voor de kosten van deze maatregel rekenen wij een bedrag van € 5.000,-. Voor bepalen van het aantal nieuwbouwwoningen bepalen wij eerst het aantal woningen langs de tracés door te kijken naar de adressendichtheid langs de verschillende transportroutes. We nemen aan dat:

- het spoor voor 20% door stedelijk gebied en voor 80% door landelijk gebied gaat
- de binnenvaart voor 5% door stedelijk gebied en voor 95% door landelijk gebied gaat
- de buisleiding voor 0% door stedelijk gebied en voor 100% door landelijk gebied gaat.[47]

Voor stedelijk gebied rekenen we met een adressendichtheid van 2.365 woningen per vierkante kilometer. Dit getal is berekend door een gemiddelde te nemen van de adressendichtheid van de steden Dordrecht, Breda, Tilburg, Eindhoven en Venlo.[48] Voor het landelijk gebied rekenen we met een adressendichtheid van 250 woningen per vierkante kilometer. Dit getal is overgenomen van het CBS.46

De huidige regelgeving[49] geeft aan dat woningen die al rechtmatig aanwezig zijn langs tracés niet verplicht zijn om beschermende maatregelen te nemen. Daarom nemen wij aan dat alleen bij nieuwbouwwoningen deze maatregel wordt gerealiseerd. Om het aantal nieuwbouwwoningen te berekenen, vermenigvuldigen we het aantal woningen langs de tracés (uitgerekend zoals hierboven beschreven) met het landelijke nieuwbouwpercentage. Dit percentage is berekend door het aantal gerealiseerde nieuwbouwwoningen in 2023[50] (73.000) te delen door het aantal woningen in Nederland (eind 2022; 8.045.580 woningen).[51] Dit percentage bedraagt 0,91%.

B.3.4 Calamiteiten

Voor het berekenen van het maatschappelijk effect van calamiteiten maken we gebruik van de scenario's uit het Scenarioboek Externe Veiligheid gebaseerd op berekeningen met Gexcon Effects 12.1.0. Voor de opslag, conversie en het transport van de waterstofdragers worden verschillende incidenten doorgerekend. Deze calamiteiten worden hieronder vermeld. Ter illustratie wordt voor de opslag van ammoniak het incident doorgerekend waar een opslagterminal faalt. Er wordt een (initiële) kans geschat dat een opslagterminal faalt. Hierna wordt er een geschaalde kans bepaald door gebruik te maken van een schaalfactor. Deze schaalfactor is afhankelijk van, in dit voorbeeld, het aantal benodigde opslagterminals voor de geïmporteerde volumes. Het resultaat van de berekening bestaat uit een aantal componenten: de schade voor een dodelijk slachtoffer, de schade voor een gewonde, de verwachte materiële schade, de kosten vanwege het vrijkomen van emissies bij een

45 Tarievenlijst. Gasunie (2023).
46 Gewassentarieven. Gasunie (2023).
47 Onze aanname is 0%. De onderzoekers zijn zich bewust dat een tracé mogelijk door stedelijk gebied gaat.
48 Stedelijkheid. CBS (2022).
49 Besluit kwaliteit leefomgeving. Overheid.nl
50 Vooruitzicht woningbouw. ING.
51 Voorraad woningen en niet-woningen. CBS.

calamiteit en ververkeersongevallen. Hieronder beschrijven we per component hoe de kosten worden berekend.

De **schade voor een dodelijk slachtoffer** berekenen we door de geschaalde kans van een calamiteit te vermenigvuldigen met het verwachte aantal doden van de calamiteit en de immateriële schade van een dodelijk slachtoffer (€ 9,7 miljoen per dodelijk slachtoffer (€2023)).[52] Daarnaast rekenen we de materiële schade van een dodelijk slachtoffer mee, te weten: medische kosten, netto productieverlies, afhandelingskosten en materiële kosten. Hiervoor maken we gebruik van de kengetallen die voor verkeersongevallen worden gebruikt.[53]

De **schade voor een gewonde** berekenen we door de geschaalde kans van een calamiteit te vermenigvuldigen met het verwachte aantal gewonden van de calamiteit en met de immateriële schade van een gewonde (€ 131.000 per gewonde (€2023)).[2]6 Daarnaast rekenen we de materiële schade van een gewonde mee, te weten: medische kosten, netto productieverlies, afhandelingskosten en materiële kosten. Hiervoor maken we gebruik van de kengetallen die voor verkeersongevallen worden gebruikt.[54]

De **verwachte materiële schade** berekenen we door de geschaalde kans van een calamiteit te vermenigvuldigen met de verwachte materiële schade van de calamiteit.

De **kosten vanwege vrijgekomen emissies** berekenen we door de geschaalde kans van een calamiteit te vermenigvuldigen met het aantal kg/ton van de vrijgekomen stof (ammoniak, LOHC of gasvormige waterstof) en de milieuprijs van de vrijgekomen stof. We maken hier onderscheid in of de stof vrijkomt naar de lucht, naar de bodem of naar het water. Daarbij hanteren we de volgende milieuprijzen:

- Ammoniak: € 56,78 per kg.[55]
- Waterstof: we vermenigvuldigen de vrijgekomen massa waterstof met het Global Warming Potential (GWP; 16 kg CO_2-eq per 1 kg waterstof). Vervolgens vermenigvuldigen we de kilo's CO_2 met de milieuprijs van CO_2.
- LOHC: bij LOHC gebruiken we de milieuprijzentool van CE Delft waar we de eigenschappen van de stof 1,2-Dimethylcyclohexane gebruiken voor de milieuprijs van LOHC.[5]5 Dit is een andere LOHC omdat geen milieuprijzen van (D)BT bekend zijn. De prijzen zijn geïndexeerd naar het prijsniveau van 2023.
  We maken onderscheid in vrijgekomen stof naar:
  — de bodem: € 0,0003870 per kg (€2023)
  — de lucht: € 0,0000176 per kg (€2023)
  — het water: € 0,1589269 per kg (€2023).

Als laatste scharen we ook **verkeersongevallen** onder het aspect calamiteiten. Deze variabele berekenen we de door het aantal tonkilometer dat via de weg, spoor (elektrisch/diesel) of de binnenvaart vervoerd wordt, te vermenigvuldigen met de kengetallen (specifiek voor verkeersongevallen) van het KiM.[56]

B.3.5 Emissies

In dit onderzoek berekenen we ook de emissies die vrijkomen bij de opslag, conversie en het transport van de waterstofdragers. We maken onderscheid tussen verschillende typen emissies. Ten eerste berekenen we de stikstofuitstoot die plaatsvindt bij de conversie van ammoniak naar gasvormige waterstof. Daarnaast kijken we naar de broeikasgasemissies en de luchtvervuiling als gevolg van het transport van de waterstofdragers. Hieronder beschrijven we per variabele hoe de kosten worden berekend.

De uitstoot van **stikstof (NO_x)** tijdens de conversie van ammoniak naar gasvormige waterstof is berekend door Arcadis. De uitstoot per jaar (in kton) wordt vermenigvuldigd met de milieuprijs van stikstof. Voor de maatschappelijke kosten van deze lekkages maken we gebruik van de kengetallen uit het handboek Milieuprijzen 2023 (CE Delft).[57] In dit handboek worden drie milieuprijzen gegeven voor stikstof:

- Onder: € 18,30 per kg (€2021).
- Centraal: € 29,90 per kg (€2021).
- Boven: € 44,10 per kg (€2021).

Wij maken gebruik van de centrale prijs. Deze prijs wordt nog geïndexeerd naar het 2023-prijsniveau.

De **broeikasgasemissies** als gevolg van het transport van de waterstofdragers worden berekend door het aantal tonkilometer dat via het spoor (elektrisch/diesel) of de binnenvaart vervoerd wordt, te vermenigvuldigen met de kengetallen (specifiek voor

52 Bockarjova, Rietveld & Verhoef. Composite Valuation of Immaterial Damage in Flooding: Value of Statistical Life, Value of Statistical Evacuation and Value of Statistical Injury (2012).
53 CE Delft, De prijs van een reis. Editie 2022.
54 CE Delft, De prijs van een reis. Editie 2022.
55 CE Delft, Handboek Milieuprijzen (2023).
56 Kennisbasis Goederenvervoer. KiM (2023).
57 CE Delft, Handboek Milieuprijzen (2023).

broeikasgasemissies) van het KiM.[58] We indexeren de prijs tot en met 2050 met 3,5%/jaar. Voor de jaren 2050 tot en met 2080 houden we het prijsniveau van 2050 aan.

Tabel 33 **Beprijzing broeikasgasemissies in eurocent per tonkilometer (constante prijzen 2018). De waardes voor wegvervoer worden gebruikt in de gevoeligheidsanalyse waar we het wegvervoer van LOHC meenemen.**

Vervoerwijze	Onder	Centraal	Boven
Weg	0,173	0,69	1,139
Spoor elektrisch	0,029	0,036	0,048
Spoor diesel	0,026	0,105	0,173
Binnenvaart	0,063	0,25	0,413

De **luchtvervuiling** als gevolg van het transport van de waterstofdragers wordt op gelijke wijze berekend als de broeikasgasemissies. Het aantal tonkilometer dat via het spoor (elektrisch/diesel) of de binnenvaart vervoerd wordt, wordt vermenigvuldigd met de kengetallen (specifiek voor luchtvervuiling) van het KiM.54

Tabel 34 **Beprijzing luchtvervuiling in eurocent per tonkilometer (constante prijzen 2018). De waardes voor wegvervoer worden gebruikt in de gevoeligheidsanalyse waar we het wegvervoer van LOHC meenemen.**

Vervoerwijze	Onder	Centraal	Boven
Weg	0,779	1,100	1,701
Spoor elektrisch	0,012	0,017	0,026
Spoor diesel	0,722	1,020	1,577
Binnenvaart	0,991	1,400	2,165

We rekenen ook de **well-to-tank** emissies uit. Dit zijn de emissies als gevolg van de productie van de brandstoffen die het spoor en de binnenvaart gebruiken. We berekenen deze emissies door het aantal tonkilometer dat via het spoor (elektrisch/diesel) of de binnenvaart vervoerd wordt, te vermenigvuldigen met de kengetallen (specifiek voor luchtvervuiling) van het KiM.29 We indexeren de prijs tot en met 2050 met 3,5 %/jaar. Voor de jaren 2050 tot en met 2080 houden we het prijsniveau van 2050 aan.

Tabel 35 **Beprijzing emissies well-to-tank in eurocent per tonkilometer (constante prijzen 2018). De waardes voor wegvervoer worden gebruikt in de gevoeligheidsanalyse waar we het wegvervoer van LOHC meenemen.**

Vervoerwijze	Onder	Centraal	Boven
Weg	0,226	0,570	1,116
Spoor elektrisch	0,022	0,093	0,175
Spoor diesel	0,029	0,079	0,158
Binnenvaart	0,071	0,19	0,368

B.3.6 Overige transporteffecten

In de MKBV-analyse hebben we ook nog overige transporteffecten onderzocht: geluid, congestie en de kosten voor de overheid vanwege onderhoud aan infrastructuur (infrakosten overheid). Hieronder beschrijven we hoe we deze effecten hebben meegenomen.

Geluid is zeer situatieafhankelijk. Extra geluid als gevolg van een ammoniakkraker kan lastig worden vergeleken met het geluid van bijvoorbeeld extra goederentreinen. Wel kan worden gesteld dat geluid voornamelijk het gevolg zal zijn van transport (over weg, water of spoor) en niet met betrekking tot aanlanding, eindgebruik, conversie en opslag, omdat dit over het algemeen plaatsvindt op afgelegen industriële terreinen zoals havens. Zodoende concentreren we ons in de analyse op geluid in het kader van transport. Hiervoor zijn kengetallen bekend. We berekenen het geluidseffect op basis van het aantal tonkilometer. In Kennisbasis Goederenvervoer (KiM, 2023)29 staan de effecten in prijzen weergegeven. In dit onderzoek hanteren we de centrale prijzen.

Tabel 36 **Geluidseffect in eurocent per tonkilometer (constante prijzen 2018). De waardes voor wegvervoer worden gebruikt in de gevoeligheidsanalyse waar we het wegvervoer van LOHC meenemen.**

Vervoerwijze	Onder	Centraal	Boven
Weg	0,049	0,06	0,073
Spoor elektrisch	0,029	0,036	0,048
Spoor diesel	0,029	0,036	0,073
Binnenvaart	0	0	0

Congestie berekenen we op een gelijke wijze als het effect 'geluid'. Als basis wordt het aantal tonkilometer gebruikt. Dit vermenigvuldigen we met de prijzen van het KiM29. In de tabel is te zien dat het effect 'congestie' alleen optreedt bij het

58 Kennisbasis Goederenvervoer. KiM (2023).

transport van waterstofdragers via de weg. In dit onderzoek hanteren we de centrale prijzen.

Tabel 37 **Effect van congestie in eurocent per tonkilometer (constante prijzen 2018). De waardes voor wegvervoer worden gebruikt in de gevoeligheidsanalyse waar we het wegvervoer van LOHC meenemen.**

Vervoerwijze	Onder	Centraal	Boven
Weg	0,473	0,52	0,591
Spoor elektrisch	0	0	0
Spoor diesel	0	0	0
Binnenvaart	0	0	0

De kosten voor de infrastructuur die de overheid moet betalen noemen we **infrakosten overheid.** Als basis wordt het aantal tonkilometer gebruikt. Dit vermenigvuldigen we met de prijzen van het KiM29. In dit onderzoek hanteren we de centrale prijzen.

Tabel 38 **Kosten voor de overheid aan onderhoud infrastructuur in eurocent per tonkilometer (constante prijzen 2018). De waardes voor het wegvervoer worden gebruikt in de gevoeligheidsanalyse waar we het wegvervoer van LOHC meenemen.**

Vervoerwijze	Onder	Centraal	Boven
Weg	0,474	0,572	0,671
Spoor elektrisch	0,031	0,036	0,037
Spoor diesel	0,014	0,017	0,018
Binnenvaart	0,062	0,073	0,078

B.3.7 Internationale concurrentiepositie

Alle aannames die worden gedaan ten behoeve van de internationale concurrentiepositie, staan vermeld in paragraaf 5.2.8.

Bijlage 4. RBM II

B.4.1 Actuele tekst op de formele website over RBM II[59]

Met RBM II kunnen de risico's van vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg, het spoor en het water worden berekend. RBM II is vanuit de Regeling basisnet het voorgeschreven rekenpakket waarmee kan worden berekend of er sprake is van een overschrijding of dreigende overschrijding van een risicoplafond.

Met de inwerkingtreding van de Omgevingswet is het voor gemeenten niet meer verplicht om te rekenen aan ruimtelijke plannen langs het basisnet. Meer informatie hierover is te vinden op de website van het Informatiepunt Leefomgeving (externe link). Een gemeente kan wel FN-curve voor het groepsrisico berekenen om inzicht te krijgen in het groepsrisico, om afwegingen te maken of keuzes te onderbouwen.

Voor het uitvoeren van een risicoberekening in RBM II hoeft de gebruiker een relatief beperkte, gestandaardiseerde set van gegevens in het programma in te voeren. Het resultaat van een berekening bestaat uit de plaatsgebonden risicocontouren en de FN-curve voor het groepsrisico. De huidige versie van het RBM II-rekenpakket is versie 2.3.0 build 535 met parameterbestand 1.3.

De huidige versie van RBM II en de bijbehorende Handleiding risicoanalyse transport zijn verouderd. Ze zijn niet gebaseerd op meer recente inzichten voor het bepalen van de risico's van vervoer van gevaarlijke stoffen. De actuele methodiek is beschreven in Module III van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. Om dit rekenvoorschrift toe te kunnen passen wordt per 1 januari 2025 Safeti-NL beschikbaar gesteld.

B.4.2 RBM II aanvragen

RBM (RisicoBerekeningsMethodiek) II is gratis beschikbaar en aan te vragen via het aanvraagformulier (externe link). Gebruikersinformatie is te vinden in de Handleiding RBM II en Achtergronddocument RBM II versie 2.0.

59 https://www.rivm.nl/omgevingsveiligheid/rekeninstrumenten/rekenpakketten

Bijlage 5. Conversietabel

Tabel 39 **Conversietabel.**

Hoeveelheid	Eenheid	Hoeveelheid		Eenheid
1	kt (kiloton)	=	1.000.000	kg
1	TWh	=	3,6	PJ
1	MWh	=	3,6	GJ
5,63	kt NH_3	bevat	1	kt H_2 (zuiver)
6,63	kt NH_3	levert na omzetting	1	kt H_2 (met verliezen 15%)
16,12	kt LOHC ((D)BT)	bevat	1	kt H_2
18.519	m3 LOHC ((D)BT)	bevat	1	kt H_2
1	GW elektrolyse	levert	74	kt H_2/jaar
1	kt H_2	=	0,12	PJ
1	kt H_2	=	0,033	TWh
1	kt NH_3	=	0,0186	PJ
1	kt NH_3	=	0,0213	PJ H_2 (zuiver)
1	kt NH_3	levert na omzetting	0,0181	PJ H_2 (met 15% verlies)
1	kt H_2	vervangt ongeveer	3.000.000	m3 aardgas
1	kg H_2	=	11,126	Nm3 H_2
1	kg H_2	productie heeft	57,8	kWh elektriciteit nodig
1	ketelwagen	heeft capaciteit voor	55	ton ammoniak
1	binnenvaarttanker	heeft capaciteit voor	2460	ton ammoniak
1	binnenvaarttanker	heeft capaciteit voor	3750	ton LOHC
1	zeeschip	heeft capaciteit voor	50	kt ammoniak
1	zeeschip	heeft capaciteit voor	140	kt LOHC
1	kt NH_3	=	0,18579	TWh
1	kt LOHC	=	0,53196	TWh

Berenschot



ARCADIS

Arcadis Nederland B.V

Piet Mondriaanlaan 26
3812 GV Amersfoort
Postbus 220 3800 AE Amersfoort
088 426 12 61
www.arcadis.com

Berenschot Groep B.V.

Van Deventerlaan 31-51, 3528 AG Utrecht
Postbus 8039, 3503 RA Utrecht
030 2 916 916
www.berenschot.nl