RAPPORT

Systeembeschrijving waterstofketens

Ontwikkelingen in beeld
voor NOVEX-traject Havengebied Rotterdam

Klant:	Havenbedrijf Rotterdam
Referentie:	BK2158I&BRP001F01
Status:	Definitief/01
fDatum:	7 februari 2025

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX Amersfoort
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

Telefoon: +31 88 348 20 00
Fax: +31 33 463 36 52
Email: info@rhdhv.com
Website: royalhaskoningdhv.com

Titel document: Systeembeschrijving waterstofketens

Ondertitel: Systeembeschrijving waterstofketens
Referentie: BK2158I&BRP001F01
Status: 01/Definitief
Datum: 7 februari 2025
Projectnaam: NOVEX Systeembeschrijving
Projectnummer: BK2158
Auteur(s): [Author]

Opgesteld door: Royal HaskoningDHV

Gecontroleerd door:

Datum: 4 februari 2025

Goedgekeurd door:

Datum: 7 februari 2025

Classificatie
Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Inhoud

Samenvatting **0**

1 Inleiding **2**
1.1 NOVEX-traject Havengebied Rotterdam 2
1.2 Doel 2
1.3 Scope en aanpak 2
1.4 Leeswijzer 3

2 Rol van waterstof(dragers) in de energietransitie **4**
2.1 Waterstof in de context van klimaatbeleid 4
2.2 Waterstof en import 5
2.3 Kabinetsvisie waterstofdragers 7

3 Waterstofdragers **9**
3.1 Gasvormige waterstof (GH2) 10
3.2 Vloeibare waterstof (LH2) 12
3.3 Ammoniak (NH3, koud/warm) 13
3.4 Methanol (MeOH) 16
3.5 Vloeibare organische koolwaterstoffen (LOHC's) 18
3.6 Overige dragers 19
3.7 Samenvattend overzicht 20

4 Ontwikkeling waterstofketens in Rotterdam **23**
4.1 Scenario 1a Groene industriehaven 24
4.2 Scenario 1b Duurzame hubfunctie 29
4.3 Scenario 2 Circulaire maakhaven 33
4.4 Scenario 3 Haven in de metropool 37
4.5 Scenario 4 Wake-Up Call 41
4.6 Bandbreedtes en verdeling binnen havengebied 45

5 Implicaties voor transport **47**
5.1 Gasvormige waterstof 47
5.2 Vloeibare waterstof 48
5.3 Ammoniak 48
5.4 Methanol 49
5.5 LOHC's 50
5.6 Brandbreedtes en transportbewegingen 51

6 Bedrijven 54
6.1 Ammoniakkraker 54
6.2 Elektrolyser 60
6.3 Vloeibare waterstofterminal 65
6.4 Ammoniakterminal (overslag en opslag) 70
6.6 LOHC-terminal (inclusief conversie) 75
6.7 Methanolterminal 81

7 Conclusies 86

Bijlagen

A1 Scenario bandbreedtes 2030, 2040, 2050

Royal HaskoningDHV

Samenvatting

Het kabinet heeft zestien NOVEX-gebieden benoemd waar de nationale opgaven in het fysieke domein zich dusdanig opstapelen dat een gebiedsgerichte aanpak nodig is. Het Rotterdamse Havengebied is één van deze NOVEX-gebieden. In dat kader is een systeembeschrijving opgesteld over de ontwikkeling van waterstofketens, van productie tot eindgebruik, voor verschillende dragers. In dit rapport is deze systeembeschrijving gepresenteerd.

Rol van waterstof in energietransitie:
Om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen en de opwarming van de aarde tegen te gaan, moet de economie overschakelen naar schone energie. Waterstof is hierin een cruciale energiedrager en de import van waterstofdragers wordt essentieel. Hoe de waterstofketen zich precies gaat ontwikkelen, en welke rol voor de verschillende waterstofdragers is weggelegd, is nog niet uitgekristalliseerd. Een belangrijke stap in het rijksbeleid om de ontwikkelingen mee richting te geven, is de kabinetsvisie op waterstofdragers die recent ontwikkeld is.

Beschrijving van waterstofdragers:
Import van waterstof zal waarschijnlijk gebeuren met waterstofdragers, met een hogere dichtheid die het geschikt maakt voor transport. We vergelijken in dit rapport het standaard gasvormige waterstof (GH2) met de meest veelbelovende dragers: vloeibare waterstof (LH2), ammoniak (NH3), methanol (MeOH) en vloeibare organische koolwaterstoffen (LOHC's). Voor elk van deze stoffen zijn de belangrijkste eigenschappen en processen uiteengezet, zowel energetisch als op het vlak van milieu en veiligheid, en voor productie, transport, opslag, conversie naar gasvormige waterstof, en eindgebruik.

- Groene waterstof komt op steeds grotere schaal beschikbaar. Gasvormige waterstof kan goed per buis worden getransporteerd, maar is voor intercontinentaal transport economisch ongunstig.
- Vloeibare waterstof heeft een hogere dichtheid, de koeling (-253 °C) is een technische en economische opgave, maar hierop staan ontwikkelingen niet stil. Op de lange termijn kan dit een gunstige optie zijn als waterstofdrager in intercontinentaal transport.
- Ammoniak is vloeibaar bij koeling of onder druk. Infrastructuur van de bestaande ammoniakketen is ook voor groene ammoniak bruikbaar, wat ammoniak maakt tot vooraanstaande waterstofdrager op korte termijn. Het kraken terug naar waterstof is nog in ontwikkeling. Ook is ammoniak een giftige stof, waardoor opslag en transport aandacht behoeven, met name door bewoonde gebieden.
- Methanol is vloeibaar en is een bekende stof met bestaande infrastructuur en toepassingen. Groene methanol kan worden geproduceerd uit biomassa of op basis van waterstof, door deze te koppelen aan CO_2 afgevangen bij industrie (CCU) of uit de lucht (DAC). Deze productieroute is nog in ontwikkeling. Op korte termijn zal methanol achterblijven bij ammoniak als waterstofdrager,. op langere termijn kan de rol van methanol groeien.
- LOHC's zijn vloeibaar. Aan de productiezijde wordt waterstof gekoppeld aan de drager, aan de andere zijde wordt de waterstof daaruit weer vrijgemaakt, waarna de drager retour gaat voor hergebruik. LOHC's zijn nieuw, transport en opslag zijn relatief overzichtelijk, maar productie en conversie zijn nog in ontwikkeling. Als de ontwikkeling doorgezet kan worden, dan kunnen LOHC's (of een van de LOHC's) op termijn een grotere rol innemen als waterstofdrager.

Ontwikkelingen waterstofketens in Rotterdam:
Vervolgens geven wij een kwantitatieve invulling van de ontwikkeling van de waterstofketens in het havengebied Rotterdam voor de jaren 2030, 2040 en 2050. Deze volumes zijn gebaseerd op toekomstscenario's van het Havenbedrijf Rotterdam, en geprojecteerd op de ontwikkelperspectieven uit NOVEX. De scenario's zijn geen voorspellingen maar schetsen uiteenlopende mogelijke ontwikkelingen.

- Groene industriehaven: grote economische activiteit, productie en aanvoer van waterstof(dragers) groeien naar 20,1 megaton waterstofequivalenten in 2050, veel gebruik in havengebied, doorvoer grotendeels als gasvormige waterstof via buisleidingen
- Duurzame hubfunctie: grote economische activiteit, vergelijkbare productie en aanvoer als Groene industriehaven, maar grote doorvoer van methanol en ammoniak
- Circulaire maakhaven: gemiddelde economische activiteit, productie en aanvoer van waterstof(dragers) groeien naar 9,8 megaton in 2050, doorvoer naar het achterland 6,7 megaton (grotendeels gasvormige waterstof en deels methanol).
- Haven in de metropool: gemiddelde economische activiteit, nadruk op regionale samenwerking, productie en aanvoer van waterstof(dragers) groeien naar 8,3 megaton in 2050, doorvoer naar het achterland 4,8 megaton (geheel als gasvormige waterstof)
- Schone haven in de delta: relatief lage economische activiteit, productie en aanvoer van waterstof(dragers) groeien naar 5,6 megaton in 2050, doorvoer naar het achterland 3,7 megaton (geheel gasvormige waterstof).

Implicaties voor transport:
We bouwen voort op de volumes uit de scenario's en splitsen deze uit naar transportmodaliteit: buis, spoor, weg of binnenvaart. De belangrijkste principes zijn als volgt:

- Voor gasvormig waterstof zal het transport naar het achterland vrijwel volledig via buisleidingen verlopen. Spoor en weg zullen beperkte volumes verwerken, voornamelijk voor moeilijk bereikbare locaties. Transport via binnenvaart is momenteel niet toegestaan.
- Voor vloeibaar waterstof is er geen significant doorvoervolume naar het achterland voorzien. Transport over spoor en weg blijft beperkt, en binnenvaarttankers zijn niet toegestaan.
- De meeste doorvoer van ammoniak naar het achterland zal via binnenvaart en buisleidingen plaatsvinden. Binnenvaart zal voorlopig een groter aandeel hebben vanwege het ontbreken van ammoniakleidingen. Transport over spoor en weg blijft beperkt.
- De doorvoer van methanol naar het achterland zal vooral via binnenvaart plaatsvinden, met een klein aandeel via het spoor. Buisleidingen zijn niet voorzien vanwege te kleine prognoses en transport over weg blijft beperkt.
- Voor LOHC's is er geen significant doorvoervolume naar het achterland voorzien. LOHC zal grotendeels in de haven worden verwerkt of via zeevaart geëxporteerd. Transport via buisleiding, binnenvaart, spoor en weg blijft beperkt.

Potentiële bedrijvigheid binnen het Haven Industrieel Complex (HIC):
Wij beschrijven we (fictieve) bedrijven met betrekking tot de activiteiten binnen de geschetste waterstofketen. De omschrijvingen zijn getoetst bij zowel actieve bedrijven in deze sector als bij de Dienst Centraal Milieubeheer Rijnmond.

De omschreven bedrijven zijn: een ammoniakkraker, elektrolyser, vloeibare waterstofterminal, ammoniakterminal (overslag en opslag), LOHC-terminal (inclusief conversie) en methanolterminal. Door de bandbreedtes van de waterstofketen te vergelijken met de voorgestelde bedrijven, bieden we inzicht in de benodigde bedrijvigheid binnen het HIC.

1 Inleiding

1.1 NOVEX-traject Havengebied Rotterdam

Het kabinet heeft zestien NOVEX-gebieden benoemd waar de nationale opgaven in het fysieke domein zich dusdanig opstapelen dat een gebiedsgerichte aanpak nodig is. Het Rotterdamse Havengebied is één van deze NOVEX-gebieden. Rijk en regio hebben in dit kader samengewerkt aan een ontwikkelrichting voor 2030 en 2050 voor het Rotterdamse Havengebied. Dit perspectief geeft richting aan strategische ruimtelijke besluiten en uitvoeringsafspraken van de betrokken partijen.

De opgave is om de transitie naar een duurzaam en toekomstbestendig Haven en Industrieel Complex (HIC) te realiseren in goede balans met de omgeving. Het is daarbij belangrijk dat de Rotterdamse haven internationaal concurrerend blijft, de werkgelegenheid in stand blijft, en in deze omgeving ook de opgaven voor woningbouw, bereikbaarheid en kwaliteit van de leefomgeving te realiseren. Dit vraagt allemaal om fysieke ruimte en milieuruimte.

Met de NOVEX-partners is afgesproken om een systeembeschrijving te maken over de ontwikkeling van waterstofketens, van productie tot eindgebruik, voor verschillende dragers. De systeembeschrijving moet inzicht geven waar, wanneer, welke ontwikkelingen worden verwacht. Dit rapport geeft invulling aan deze systeembeschrijving. Binnen het NOVEX-traject voor het Rotterdamse Havengebied wordt breed onderzoek gedaan, waar deze systeembeschrijving onderdeel van is.

1.2 Doel

Het doel is het eenduidig in beeld brengen van de ontwikkelingen van waterstof- en waterstofdragers in het HIC en het transport richting achterland, voor de zichtjaren 2030, 2040 en 2050. De systeembeschrijving is mede input voor de Milieuverkenning die ook in het kader van NOVEX plaatsvindt.

De systeembeschrijving behelst:
- Een kwalitatieve beschrijving van de verschillende waterstofdragers en waterstofketens;
- Een kwantitatieve uiteenzetting van de verwachte ontwikkelingen van waterstofketens in Rotterdam en de implicaties voor transport richting het achterland;
- Een beschrijving van bedrijven voor productie, op- en overslag en conversie van waterstof(dragers) in het HIC.

1.3 Scope en aanpak

In deze studie zijn de volgende energiedragers beschouwd:
- Gasvormige waterstof;
- Vloeibare waterstof;
- Ammoniak;
- Methanol;
- Vloeibare, organische koolwaterstoffen (LOHC’s).

Onder de waterstofketen wordt het geheel van de volgende schakels verstaan:
- Productie;
- Transport (aanvoer en afvoer, over zee en over land);
- Opslag;
- Conversie naar waterstof;
- Eindgebruik.

In hoofdstuk 3 worden de verschillende stoffen beschreven en wordt ingegaan op de verschillende schakels in de waardeketen.

De kwalitatieve beschrijving is uitgevoerd op basis van bureaustudie. Waar mogelijk is dit onderbouwd en verdiept met kwantitatieve gegevens. De kwantitatieve uiteenzetting is uitgevoerd op basis van scenario's van Havenbedrijf Rotterdam, waarbij ook rekening is gehouden met de ontwikkelperspectieven van NOVEX en is vergeleken met relevante studies. De voorbeeldbedrijven zijn opgesteld op basis van bureaustudie, aangevuld met checks door zowel bedrijven die daadwerkelijk actief zijn in deze sector, als de Dienst Centraal Milieubeheer Rijnmond

Ook heeft afstemming plaatsgevonden met vergelijkbare onderzoeken voor NOVEX-trajecten rondom de clusters Noordzeekanaalgebied en Zeeland. De afstemming was met respectievelijk Port of Amsterdam en North Sea Port. De verwachte omvang van activiteiten met waterstof(dragers) in Rotterdam is groter dan in het Noordzeekanaalgebied en Zeeland.
Kortom, in beide NOVEX-trajecten wordt de ruimtelijke inpasbaarheid van verschillende activiteiten met waterstofdragers uitgewerkt, vergelijkbaar met het NOVEX-traject voor het Rotterdamse Havengebied.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt kwalitatief besproken hoe vanuit de klimaatopgave en energietransitie een nieuwe rol voor waterstof en waterstofdragers ontstaat. Ook de recent ontwikkelde kabinetsvisie wordt hier beknopt weergegeven.

In hoofdstuk 3 geven we voor waterstof en een reeks waterstofdragers een kwalitatief overzicht van de eigenschappen van de stof zelf en van de stappen in de keten in relatie tot deze stof: productie, transport, opslag, conversie en eindgebruik.

In hoofdstuk 4 wordt een kwantitatieve voortuitblik gegeven op de waterstofstromen die in het HIC kunnen gaan plaatsvinden. Dit is uitgesplitst naar drager en, voor elke drager, naar de schakels van de keten. De basis wordt gevormd door bestaande scenario's van Havenbedrijf Rotterdam, die zijn geprojecteerd op de ontwikkelperspectieven van NOVEX. In hoofdstuk 5 zijn de implicaties voor transport naar het achterland uitgewerkt.

In hoofdstuk 6 is een verdieping gegeven van het type bedrijven uit de waterstofketen die in Rotterdam gevestigd kunnen worden, zoals elektrolysers, ammoniakkrakers en methanolterminals. Dit geeft een concrete invulling aan de bedrijvigheid die kan gaan ontstaan, en deze informatie is van belang voor de Milieuverkenning binnen het NOVEX-traject van Havengebied Rotterdam.

In hoofdstuk 7 wordt een concluderend beeld gegeven van de omvang en het type bedrijvigheid, door de kwantitatieve scenario's uit hoofdstuk 4 te combineren met de voorbeeldbedrijven uit hoofdstuk 6.

2 Rol van waterstof(dragers) in de energietransitie

In dit hoofdstuk beschrijven we de rol van waterstofdragers in de energietransitie. Dit doen we aan de hand van de internationale en nationale context. Vervolgens het belang van waterstof in het energiesysteem, de ontwikkeling van de waterstofeconomie en de rol daarin voor verschillende waterstofdragers. En tot slot de visie van het rijk op waterstofdragers.

2.1 Waterstof in de context van klimaatbeleid

2.1.1 Internationale context

Om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen en de opwarming van de aarde te verminderen, moet de economie de transitie maken naar schone energie. In 2015 sloten 195 landen het Akkoord van Parijs, waarin het doel is afgesproken om de opwarming van de aarde binnen 2 graden Celsius te houden en te streven naar maximaal 1,5 graad opwarming.

In 2019 is de Europese Green Deal gepresenteerd door de Europese Commissie: een groeistrategie die de EU moet omvormen naar een economie die competitief is, met in 2050 netto nul broeikasgasemissies, waarin economische groei is ontkoppeld van grondstofgebruik en waarbij geen personen of regio's worden ontzien. Als uitvloeisel is in 2020 de Europese waterstofstrategie uitgewerkt. Waterstof zal volgens de Europese Commissie een sleutelrol spelen bij het koolstofvrij maken van sectoren waar andere alternatieven onhaalbaar of duurder kunnen zijn en ook bij het ondersteunen van de elektriciteitssector door langdurige en grootschalige opslag te bieden.

Het Fit for 55-pakket werd gepresenteerd door de Europese Commissie in 2021. Dit pakket bevat een reeks voorstellen om de EU-wetgeving te actualiseren en het beleid aan te passen aan de klimaatdoelen, met als doel de netto-uitstoot van broeikasgassen tegen 2030 met ten minste 55% te verminderen ten opzichte van 1990.

Europese wetgeving bevordert, direct of indirect, de inzet van hernieuwbare waterstof. Relevant zijn onder meer de Richtlijn Hernieuwbare Energie (RED), de regulering van het emissiehandelssyteem (ETS), van maritieme brandstoffen (FuelEU Maritime) en luchtvaartbrandstoffen (ReFuel EU Aviation). De RED is bedoeld om het gebruik van hernieuwbare energie binnen de EU te bevorderen en de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen. De herziening uit 2023 (RED III) bevat nieuwe doelstellingen voor het gebruik van hernieuwbare waterstof en andere hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong (*Renewable Fuels of Non-Biological Origin*, RFNBO's) in de industrie en transportsector. Voor de industrie is die doelstelling dat tegen 2030 42% van de waterstof die in de industrie wordt gebruikt, afkomstig moet zijn van RFNBO's. Daarnaast moet tegen 2030 ten minste 5,5% van de energie die in de transportsector wordt gebruikt, afkomstig zijn van het gecombineerde aandeel van tenminste 1% RFNBO's en geavanceerde biobrandstoffen[1].

2.1.2 Nationale context

In 2019 werd in Nederland het Klimaatakkoord gesloten waarin de overheid en betrokken sectoren de ambities concretiseren om de broeikasgasemissies te reduceren en toe te werken naar een klimaatneutrale maatschappij. In 2023 is in het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) de ontwikkelrichting voor het toekomstige energiesysteem aangegeven. Over waterstof wordt opgemerkt: 'Waterstof vervult in 2050 een systeemrol voor het energiesysteem en wordt daarnaast vooral ingezet in de industrie en voor (internationale) mobiliteit.'[2]

[1] *Afnameverplichting groene waterstof, CE Delft, 2023*
[2] *https://open.overheid.nl/documenten/2f5cbb52-0631-4aad-b3dd-5088fab859c5/file, p.50*

In 2022 ging het Nationale Waterstof Programma (NWP) van start. Dit programma is een initiatief van de Nederlandse overheid dat voortkomt uit het Klimaatakkoord. Het doel van het NWP is om de bijdrage van waterstof aan de energietransitie te onderzoeken en te stimuleren. De Routekaart Waterstof is een belangrijk onderdeel van het NWP en beschrijft hoe Nederland zijn waterstofambities en klimaatdoelen wil bereiken. Deze routekaart stelt doelen voor hernieuwbare waterstof in 2030 en beschrijft de acties die nodig zijn om deze doelen te behalen. De routekaart hanteert een holistische benadering, waarbij aanbod, transport, distributie, opslag, toepassing en randvoorwaarden met elkaar worden verbonden.

2.2 Waterstof en import

2.2.1 Waterstof is de cruciale energiedrager in klimaatneutrale economie

Vanwege klimaatbeleid is er dus grote aandacht voor waterstof. Waterstof is op zichzelf niet nieuw en wordt nu voornamelijk geproduceerd uit aardgas (dit wordt grijze waterstof genoemd) en toegepast in bijvoorbeeld raffinage, plastics en kunstmest. Aangevuld met koolstofafvang en -opslag (*carbon capture and storage*, afgekort tot CCS) kan de broeikasuitstoot bij productie worden geminimaliseerd (blauwe waterstof). Blauwe waterstof wordt ook low-carbon waterstof genoemd, dat voldoet aan de eisen vanuit de RED II. Hier valt bijvoorbeeld ook waterstof uit nucleaire energie onder. Waterstof kan met minimale uitstoot van broeikasgassen geproduceerd worden uit hernieuwbare elektriciteit, afkomstig van bijvoorbeeld zon- en windenergie, door middel van elektrolyse (groene waterstof).

Waterstof zal, zoals gesteld in het NPE, met name dienen:

- Als grondstof in de industrie (raffinage, chemie, staal);
- Als grondstof voor hernieuwbare brandstoffen (zwaar wegtransport, scheepvaart, luchtvaart);
- Als brandstof voor hoge-temperatuurwarmte in de industrie (chemie, bouwkeramiek);
- Voor balancering van hernieuwbare elektriciteit, met elektrolysers die meebewegen met het fluctuerende aanbod vanuit zon en wind, en waterstofcentrales voor flexibele tegenbeweging (op basis van verbranding in gasturbines of van brandstofcellen);
- Voor energieopslag, ten behoeve van balancering van het energiesysteem en als strategische voorraad.

2.2.2 Import van waterstofdragers wordt essentieel voor klimaatneutrale energievoorziening

Om aan de toekomstige energievraag te voldoen, zal Nederland – en groter bezien: Europa – energie moeten gaan importeren. Momenteel wordt een groot deel van de energie al geïmporteerd, voornamelijk in de vorm van fossiele energie zoals olie en gas. De uitdaging voor de energietransitie is bij deze import over te schakelen naar klimaatneutrale energiedragers. Elektriciteit is niet geschikt om wereldwijd te transporteren; moleculen zijn beter geschikt. Maar er zijn grote verschillen tussen moleculen. Beter geschikt dan waterstof zijn waterstofdragers. Waterstof kan in deze dragers worden opgeslagen enr ook weer uit worden herwonnen. Waar waterstof een ijl gas is, zijn deze dragers vloeibaar en de hogere volumedichtheid maakt ze geschikt voor intercontinentaal transport.

De waterstofdragers zijn daarmee essentieel voor een internationale waterstofmarkt. Zo kan waterstof geproduceerd worden waar de condities voor zon en wind het gunstigst zijn, bijvoorbeeld in Australië, Oman, Namibië of Chili. De energie kan in de vorm van een waterstofdrager beschikbaar worden gemaakt voor transport naar locaties voor waterstofgebruik. De verwachting is dat ook in Rotterdam import van waterstofdragers zal plaatsvinden.

2.2.3 Ontwikkeling van de waterstofeconomie in het HIC en het achterland

Havens spelen een cruciale rol in de import, productie, op- en overslag, doorvoer en het gebruik van waterstofdragers. Dat begint bij de aanvoer en overslag. Vervolgens zijn er activiteiten in het havenindustriële cluster zoals opslag en bunkering, de conversie (ofwel het kraken van waterstofdragers terug naar waterstof) en de toepassingen bij eindgebruikers gevestigd in het gebied. En tot slot is er de doorvoer naar het achterland dat plaatsvindt via verschillende modaliteiten zoals buisleidingen, spoor, kustvaart, binnenvaart en wegtransport.

Groene waterstof kan in Nederland geproduceerd worden uit stroom van met name windparken op zee. In het Nationaal Plan Energiesysteem is aangegeven dat 'ten minste een strategisch deel van de benodigde waterstof in Nederland geproduceerd' moet worden. In het Klimaatakkoord is een doelstelling geformuleerd van 3 à 4 GW elektrolysecapaciteit in 2030. Eind 2022 heeft het kabinet dit doel aangescherpt, het nieuwe streefdoel is 8 GW elektrolysecapaciteit in 2032.[3]

Gasunie-dochter HyNetwork Services (HNS) heeft de taak gekregen om het nationale transportnet voor waterstofgas te ontwikkelen en te beheren. Deze *backbone* krijgt regionale vertakkingen in de industrieclusters, zal ook aansluiten op grootschalige opslag in Zuidwending, en op het Europese net via verbindingen naar onder meer Duitsland en België. Daarbij wordt de Delta Rhine Corridor (DRC) ontwikkeld: een tracé met buisleidingen dat Rotterdam-Rijnmond direct verbindt met Chemelot en het Ruhrgebied. In juni 2024 heeft minister Jetten de Tweede Kamer geïnformeerd dat de waterstof- en CO_2-verbindingen van de DRC niet eerder dan 2032 gereed zullen zijn.[4] In december 2024 heeft minister Hermans een update gestuurd, waarin wordt aangegeven dat een ammoniakbuis en gelijkstroomkabels in de eerste fase niet inde plannen voor de DRC zijn inbegrepen, om de waterstof- en CO_2-buizen niet te vertragen. De ammoniakbuis en gelijkstroomkabels zijn voor de toekomst niet uitgesloten, daarom blijft ruimte op het tracé voor toekomstige buisleidingen.[5]

Om de energietransitie om te zetten van een energiesysteem met CO_2-uitstoot naar een klimaatneutraal energiesysteem is in het HIC Rotterdam een groot aantal projecten en programma's actief. Deze projecten omvatten de aanlanding van windenergie van zee, gedeeltelijke omzetting naar waterstof, CO_2-opvang en -opslag, restwarmtebenutting en de invoer, conversie, gebruik en doorvoer van klimaatneutrale energiedragers. Bovendien zijn er sectoren actief in het HIC Rotterdam waar waterstof belangrijk is in de decarbonisatie, zoals raffinage, chemie en brandstofbunkering. Ook vormt het HIC een doorvoerhaven naar het Europese achterland, waar eveneens vraag naar waterstof of waterstofdragers gaat ontstaan voor soortgelijke sectoren. De ontwikkelingen in de gehele ARRRA-regio (Antwerpen, Rotterdam, Rheinland, Ruhr, Amsterdam) hangen met elkaar samen. Import van waterstofdragers van overzee zal nodig zijn om aan de energievraag te voorzien. Er zijn in het HIC initiatieven voor elektrolysers ten behoeve van lokale productie van waterstof en ook voor terminals ten behoeve van import van waterstof en waterstofdragers. Duidelijk is dat waterstof en waterstofdragers in opkomst zijn en een belangrijke rol gaan spelen in de energietransitie en in het HIC.

Het Havenbedrijf Rotterdam heeft, in samenwerking met Oxford Economics, vier toekomstscenario's[6] opgesteld voor de ontwikkeling van de haven naar 2050:

- **Connected Deep Green:** veel hernieuwbare energie zoals waterstof en ammoniak, met een grote toename van containers door groeiende wereldhandel.

[3] https://open.overheid.nl/documenten/9b957903-442d-4ca3-9aba-d73b6785cf6e/file, p.2
[4] https://open.overheid.nl/documenten/a2b31efb-d05e-4845-932f-eee43711b991/file
[5] https://open.overheid.nl/documenten/6321fef5-16b2-494a-8f08-ba2dd11e23f6/file
[6] https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/port-of-rotterdam-authority-presents-future-scenarios-for-2050

- **Wake-Up Call:** meer import van biomassa en een snelle energietransitie, met een toename van containers door een gunstig economisch klimaat.
- **Regional Well-Being:** afname van ruwe olie en kolen, met meer breakbulk volume door de import van halffabricaten.
- **Protective Markets:** handelsbelemmeringen vertragen de overgang naar hernieuwbare energie, met minder raffinage van ruwe olie en minder stukgoed door *reshoring* en *nearshoring*.

Deze scenario's worden in dit rapport gebruikt om inzicht te geven in mogelijke toekomstige stromen van waterstof en waterstofdragers (zie hoofdstuk 4).

2.3 Kabinetsvisie waterstofdragers

De ontwikkeling van de waterstofketen en de rol die de verschillende waterstofdragers in elk van de schakels van de keten zullen gaan spelen, hangen mede af van rijksbeleid. Een belangrijke stap hierin is de kabinetsvisie op waterstofdragers die recent ontwikkeld is.[7] Deze vatten we hier kort samen.

2.3.1 Visie op de dragers

Het kabinet zet bewust in op de ontwikkeling en gebruik van meerdere soorten waterstofdragers, deze diversificatie voorkomt afhankelijkheid van één technologie. Het kabinet ziet bovendien dat verandering over de tijd kan optreden in welke dragers meer of minder kansen bieden. Op middellange termijn, tot ongeveer 2035, lijkt een belangrijke rol voor ammoniak onvermijdelijk, terwijl ontwikkelingen ervoor kunnen zorgen dat op lange termijn, circa 2035, andere dragers naar voren komen.

Het kabinet ziet daarom tot 2035 ruimte voor het ondersteunen van alle waterstofdragers, hoewel met verschillen per drager in de voorkeur en mate van ondersteuning. Na 2035 wil het kabinet meer sturen op basis van de maatschappelijke voorkeuren. Gebruikers hebben dan namelijk meer keuze tussen dragers en transportmogelijkheden. Het kabinet ziet op termijn een belangrijke rol voor vloeibare waterstof en vloeibare organische waterstofdragers (LOHC's), in het bijzonder bij conversie naar waterstofgas in de importhaven. Ook wordt veel potentie gezien voor methanol en vloeibare synthetische methaan (LSM), met als voorwaarde dat gebruik wordt gemaakt van duurzame koolstof.

Ammoniak wordt van belang geacht voor het opbouwen van een mondiale waterstofmarkt, maar het kabinet wijst ook op de nadelen van ammoniak voor milieu en veiligheid. Doorvoer van ammoniak is toegestaan, mits veilig, en bij voorkeur in geconcentreerde stromen via een buisleiding of binnenvaart, maar niet beperkt tot deze opties. Distributie en uitbreiding van doorvoer per spoor of weg wordt ongewenst geacht, hoewel niet geheel te vermijden. Dit wordt aangemerkt als tijdelijk optie of terugvaloptie, en is gewenst zoveel mogelijk over de Betuweroute plaats te vinden.

2.3.2 Beoordeling per drager

In het Verdiepingsdocument is de visie uitgewerkt per drager.[8] Verschillende dragers zijn beoordeeld op tien publieke belangen. Hier liggen onder andere een maatschappelijke kosten-batenverkenning en een multicriteria-analyse aan ten grondslag. Er is een beleidsvertaling gemaakt met een classificatie in: stimuleren, faciliteren, accepteren, of ongewenst. Daarnaast is onderscheid gemaakt tussen de middellange termijn (tot circa 2035) en lange termijn (na circa 2035).

Per stof komt samengevat de volgende beoordeling naar voren:

[7] https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2024/11/22/kamerbrief-kabinetsvisie-waterstofdragers
[8] https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2024/11/22/bijlage-2-minvkgg-verdiepingsdocument-beoordeling-waterstofdragers-rapport-november-2024

- **Vloeibare waterstof**: Het kabinet ziet een belangrijke rol voor vloeibare waterstof, vooral als (terminal)bedrijven dit in importhavens omzetten naar waterstofgas. De kabinetsvisie biedt ruimte voor stimuleren van conversie in de haven en (tijdelijk tot 2035) ook elders in Nederland, en voor stimuleren van direct gebruik in mobiliteit.
- **Ammoniak**: Het kabinet ziet voor ammoniak een duidelijke rol bij het opbouwen van een wereldwijde waterstofmarkt, maar is zich ook bewust van de nadelen, vooral op veiligheid en milieu. Daarom wil het kabinet dat (terminal)bedrijven ammoniak direct gebruiken of omzetten naar waterstofgas in de importhavens, zo ver mogelijk van bewoonde gebieden. De visie accepteert decentraal kraken van ammoniak binnen Nederland, maar enkel tot 2035. Direct gebruik als brandstof in het achterland wordt niet positief beoordeeld.
  Eventuele doorvoer van ammoniak gebeurt het liefst zoveel mogelijk gebundeld en in grotere hoeveelheden, via buisleidingen of binnenvaart. Het kabinet wil het gebruik van ammoniak in Nederland buiten de importhavens zoveel mogelijk beperken, net als vervoer per spoor of over de weg. Deze typen vervoer ziet het kabinet hooguit als tijdelijke of terugvalopties. De kabinetsvisie biedt ruimte voor het tijdelijk stimuleren van conversie in de haven, direct gebruik in de haven en als bunkerbrandstof voor de zeevaart.
- **Methanol**: Volgens het kabinet biedt deze stof kansen, mits geproduceerd met duurzame koolstof. De kabinetsvisie biedt ruimte voor stimuleren van conversie in de haven en tijdelijk ook elders in Nederland, en voor stimuleren van direct gebruik als grondstof in de industrie en als bunkerbrandstof in mobiliteit. De voorkeur voor transport naar het achterland gaat uit naar buisleiding of binnenvaart.
- **LOHC's**: Het kabinet ziet een rol voor LOHC's, vooral als (terminal)bedrijven deze in importhavens omzetten naar waterstofgas. De visie biedt ruimte voor stimuleren van conversie in de haven, er is geen direct gebruik voorzien. Transport naar het achterland bij voorkeur met binnenvaart.
- **Vloeibare synthetische methaan**: Volgens het kabinet biedt deze stof kansen, mits geproduceerd met duurzame koolstof. De kabinetsvisie biedt ruimte voor stimuleren van conversie in de haven en (tijdelijk) ook elders in Nederland, en tijdelijk stimuleren van direct gebruik in industrie, elektriciteit en mobiliteit, zowel in de haven, elders in Nederland als in Duitsland. De gasvormige methaan wordt dan in het gasnet ingevoegd, vergelijkbaar met bestaande LNG-faciliteiten.

2.3.2.1 Algemene voorkeuren voor locatie, transportmodaliteit en gebruik

In het Verdiepingsdocument zijn ook de voorkeuren wat betreft locatie, transportmodaliteit en gebruiksvorm nader uitgewerkt.

- **Locatie**: waar mogelijk gaat de voorkeur uit naar conversie en eindgebruik buiten bewoonde gebieden, bijvoorbeeld in de zeehaven. Dit voorkomt emissies, naast energieverbruik voor transport, en het vermindert veiligheidsrisico's, transportkosten en congestie.
- **Transportmodaliteit**: de voorkeursvolgorde van modaliteiten is: 1. buis, 2. binnenvaart, 3. spoor, 4. weg. Er gelden nuances per waterstofdrager, transportvolume en transportcapaciteit. Ook merkt het kabinet op dat de mate van flexibiliteit van de modaliteiten omgekeerd loopt aan de voorkeursvolgorde. Alle modaliteiten zullen tot op zekere hoogte een rol blijven spelen.
- **Gebruiksvorm**: het kabinet geeft de voorkeur aan het directe gebruik van de drager, in plaats van conversie naar waterstof. Dit vermindert energieverlies, emissies, ruimtegebruik en veiligheidsrisico's.

In dit hoofdstuk is getracht de kabinetsvisie op waterstofdragers beknopt weer te geven. In deze studie wordt de ontwikkeling van waterstofdragers en van de waterstofketen beschouwd in het kader van NOVEX. Dit is het onderwerp van de volgende hoofdstukken.

3 Waterstofdragers

In dit hoofdstuk beschrijven we waterstof en de voornaamste waterstofdragers in relatie tot gehele waterstofketen. We beschouwen de volgende stoffen, waarbij we de selectie hebben beperkt tot de vijf meest veelbelovende dragers, waarvan wordt verwacht dat ze op korte termijn een rol kunnen spelen in waterstofketens:

- Gasvormige waterstof (GH2);
- Vloeibare waterstof (LH2);
- Ammoniak (NH3);
- Methanol (MeOH);
- Vloeibare organische koolwaterstoffen (LOHC's).

Bij elke stof gaan we in op:

- Energetische eigenschappen;
- Milieu- en veiligheidseigenschappen;
- Productie;
- Transport (zowel aanvoer als afvoer);
- Opslag;
- Conversie naar gasvormige waterstof;
- Eindgebruik.

We bespreken eerst de basale eigenschappen van waterstof en waterstofdragers met betrekking tot de energiedichtheid, het milieu en de veiligheid.[9] Deze eigenschappen zijn medebepalend voor de kansen en beperkingen van de stoffen in de verschillende schakels van de waterstofketen. Na die eigenschappen gaan we steeds de verschillende schakels van de keten langs. Dit begint bij productie van waterstof en/of waterstofdragers. Binnen het havengebied van Rotterdam en op de Noordzee wordt waterstofproductie voorzien, de andere dragers zullen waarschijnlijk elders geproduceerd worden en worden geïmporteerd. Transport kan in verschillende modaliteiten plaatsvinden: aanvoer en ook afvoer met zeevaart, en afvoer per buisleiding, spoor, weg of binnenvaart.

Op verschillende plekken in de keten zal opslag van dragers plaatsvinden, ook in Rotterdam. Opslag biedt zekerheid en continuïteit voor de achterliggende schakels in de waardeketen. Dit is met name van belang bij overslag (voor logistiek zonder oponthoud) en voor installaties die volcontinu opereren (bijvoorbeeld installaties voor conversie of eindgebruik). Conversie is het terug omzetten van de drager naar gasvormige waterstof. In Rotterdam wordt conversie voorzien voor een deel van de geïmporteerde waterstofdragers.

De waterstofketen eindigt met het eindgebruik van de waterstof of waterstofdrager. Waterstof kent diverse toepassingen, en sommige dragers kunnen direct worden gebruikt zonder eerst omgezet te hoeven worden naar waterstof. Het eindgebruik kan plaatsvinden in Rotterdam maar ook, na transport, in het achterland. We belichten bij elke drager de mogelijkheden voor direct gebruik. Voor alle dragers geldt daarnaast de mogelijkheid van conversie naar gasvormige waterstof met bijbehorende toepassingen.

[9] *We gaan in op de eigenschappen van de stof, niet op de gevolgen voor de omgeving. Deze zijn onderwerp van de milieuverkenning.*

3.1 Gasvormige waterstof (GH2)

3.1.1 Energetische eigenschappen

Waterstofmoleculen bestaan uit twee waterstofatomen die een binding vormen (H_2). Bij atmosferische druk en kamertemperatuur is het een gas met lage dichtheid (0,083 kg/m^3), wat aanzienlijk lager is dan de dichtheid van lucht (1,29 kg/m^3). Gasvormige waterstof wordt daarom meestal opgeslagen in hogedrukvaten bij een drukniveau van 200, 350, 500 of 700 bar. Bij 700 bar en kamertemperatuur is de dichtheid 42 kg/m^3.

Waterstofdichtheid
In de vergelijking van waterstof en waterstofdragers is de volumetrische waterstofdichtheid van belang. Deze geeft aan hoeveel kilogram waterstof is gevat in 1 m^3. Bij waterstof zelf is deze erg laag bij kamertemperatuur en atmosferische druk, wat economisch ongunstig is voor transport en opslag. Voor waterstofdragers ligt de waterstofdichtheid per 1 m^3 van de drager hoger. De waterstofdichtheid is dus een belangrijke parameter in de vergelijking van waterstof(dragers).

Energetische dichtheid
In geval van direct gebruik van een waterstofdrager, bijvoorbeeld inzet van methanol als brandstof, is de energetische dichtheid van belang. Dit is de hoeveelheid energie die vrijkomt bij toepassing (meestal: verbranding) van 1 m^3 van de stof. Dat is een belangrijke parameter in de vergelijking van de stof met andere energiedragers zoals conventionele, fossiele brandstoffen.

3.1.2 Milieu- en veiligheidseigenschappen

Waterstofgas is kleurloos, geurloos en smaakloos. Het is zeer ontvlambaar en kan explosieve mengsels vormen met lucht. Het is niet giftig. Waterstof is het lichtste en kleinste molecuul en kan vervliegen doordat het ijler is dan lucht, wat het moeilijk maakt om lekken te voorkomen. Ook kan waterstof leiden tot verbrossing van leidingen, met risico's op lekkage. Lekkages zijn lastig te detecteren, want het gas is kleurloos en geurloos.

3.1.3 Productie

Gasvormige waterstof wordt momenteel voornamelijk geproduceerd door stoom-methaan reforming (SMR) of elektrolyse van water. Bij SMR wordt methaan verhit met stoom om waterstof en koolstofdioxide te produceren. Dit wordt grijze waterstof genoemd. Indien de koolstofdioxide wordt afgevangen en opgeslagen is sprake van blauwe waterstof. Elektrolyse splitst water in waterstof en zuurstof met behulp van elektriciteit. Er zijn verschillende type elektrolysers, met name alkaline en *Proton Exchange Membrane* (PEM). Bij gebruik van groene elektriciteit wordt de waterstof uit elektrolyse groene waterstof genoemd.[10] Een derde route om waterstof te produceren is vergassing van biomassa. De meeste aandacht voor klimaatneutrale productie van waterstof gaat momenteel uit naar elektrolyse.

3.1.4 Transport

Transport met zeevaart is toegestaan, maar is vanwege de lage dichtheid van gasvormige waterstof niet rendabel of hooguit in bijzondere gevallen met kleine hoeveelheden. Transport van gasvormige waterstof kan door buisleidingen. Gasunie-dochter HyNetwork Services (HNS) werkt aan de zogenoemde *backbone*, waarvan het eerste deel zich in de haven van Rotterdam bevindt. De backbone maakt zoveel

[10] *Voor de productie van waterstof door middel van elektrolyse is een nieuwe PGS-richtlijn in ontwikkeling: PGS40.*

mogelijk gebruik van bestaande buisleidingen, die na technische aanpassingen, hiervoor vrijgemaakt kunnen worden uit het aardgasnet. Het net krijgt een operationele druk van 30 tot 50 bar(g).[11] In de Delta Rhine Corridor wordt een waterstofleiding aangelegd die onderdeel wordt van de backbone en zal zorgen voor verbinding tussen het HIC, het Ruhrgebied en Chemelot. Transport is ook mogelijk via tubetrailers over de weg en het spoor, maar dit gaat om relatief kleine volumes. Transport via de binnenvaart met tankers is momenteel niet toegestaan, maar er wordt aan gewerkt om dit in de toekomst mogelijk te maken. Voor nu zijn slechts kleinere verpakkingsheden (die ook over weg/spoor kunnen worden vervoerd) toegestaan.[12]

Wet- en regelgeving transport
Voor alle waterstofdragers zijn veiligheidseisen van toepassing op transport, zoals vastgelegd in nationale en internationale wetgeving. Nationaal staat de Wet vervoer gevaarlijke stoffen (Wvgs) centraal, met daaronder de Regeling vervoer over land van gevaarlijke stoffen (VLG), de Regeling vervoer over spoorweg van gevaarlijke stoffen (VSG), de Regeling vervoer over binnenwateren van gevaarlijke stoffen (VBG) en de ministeriële regeling voor het vervoer van gevaarlijke stoffen met zeeschepen (Rvgz). Deze regelingen bevatten specifieke voorschriften voor de betreffende transportmodaliteit.

Daarbij wordt verwezen naar Europese overeenkomsten: ADR voor internationaal vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg, RID voor spoor, en ADN voor water. Verder zijn er Europese technische standaarden voor binnenvaartschepen (ES-TRIN en de benodigde competenties (ES-QIN). De eisen die gesteld worden aan vervoersmiddelen voor gevaarlijke stoffen zijn vastgesteld op Europees niveau. Het is niet toegestaan om op nationaal niveau strengere of andere eisen te stellen vanwege het level playing field dat in Europa geborgd moet worden.

Naast eisen aan de vervoersmiddelen zijn er ook regels voor de ruimtelijke ordening rondom vervoersassen. Deze regels zijn vastgelegd in de Regeling basisnet en in het Besluit kwaliteit leefomgeving, behorend bij de Omgevingswet.

3.1.5 Opslag

Gasvormige waterstof wordt altijd op druk opgeslagen. De standaardwaarden hiervan zijn 200, 350, 500 en 700 bar. Voor stationaire opslag wordt met name gebruik gemaakt van grote cilindrische opslagtanks. In bepaalde delen van Nederland (noord en oost) kan gebruik worden gemaakt van ondergrondse waterstofopslag in zoutcavernes (druk in de orde van 150 tot 250 bar)[13], maar in de nabijheid van Rotterdam is deze opslagmethode niet mogelijk. Er wordt echter verkend of (kleine) lege gasvelden kunnen worden gebruikt voor ondergrondse opslag.

3.1.6 Conversie naar waterstof

Met conversie bedoelen we hier: omzetting naar gasvormige waterstof. Dat is in dit geval niet van toepassing.

[11] *https://www.hynetwork.nl/zakelijk/klant-worden/specificaties*
[12] *Het verbod is vastgelegd in randnummer 3.2.1 van het ADN26, in combinatie met Kolom 8 van de hoofdtabel voor gecomprimeerde waterstof, UN 1049. rapport Volumes Modaliteiten en Veiligheid Waterstofrijke Energiedragers, Arcadis, Berenschot en TNO 2023*
[13] *https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2022/07/01/22286281bijlage-1-haalbaarheidsstudie-offshore-ondergrondse-waterstofopslag/Haalbaarheidsstudie+offshore+ondergrondse+waterstofopslag+EBN+TNO+2022.pdf*

3.1.7 Eindgebruik

Waterstof wordt gebruikt voor een groot aantal processen in de raffinage, met name als grondstof in hydrogenatie, en daarnaast in hydrocracking, katalytische reforming, hydrotreating, ontzwaveling en hydrodesulfurisatie. Ook in de raffinaderijen in Rotterdam wordt hiervoor waterstof ingezet. Daarnaast heeft waterstof toepassingen als grondstof in de chemie. Waterstof heeft ook een rol in groene staalproductie, zoals ook is voorzien in de nieuw te bouwen *Direct Reduction Plant* bij Tata Steel in IJmuiden. Ook kan waterstof een grondstof vormen voor *Sustainable Aviation Fuels* (SAF's) en *e-fuels*. Waterstof moet dan worden gecombineerd met een koolwaterstof, zoals methanol. In de haven van Rotterdam wordt door Advario en Power2X een productiefaciliteit gebouwd voor 250 kiloton per jaar aan SAF uit groene waterstof en methanol.[14]

Waar hoge temperatuur warmte nodig is, kan verbranding van groene waterstof een mogelijkheid voor decarbonisatie vormen. Het gaat bijvoorbeeld om de bouwkeramiek, of wel om ovens voor bijvoorbeeld bakstenen of glas. Verbranding van waterstof is ook een optie voor elektriciteitscentrales, ter vervanging van aardgas. Aandachtspunt bij verbranding is het ontstaan van NO_x, dat is meer dan bij verbranding van methaan. Een mogelijke oplossing hiervoor is het gebruik van zuivere zuurstof bij de verbranding. (Zuurstof is een bijproduct van elektrolysers en dit zou hier een toepassing kunnen vinden).

Tot slot kan waterstof in brandstofcellen terug worden omgezet in elektriciteit en water. De elektriciteit kan worden gebruikt voor elektromotoren. Dit is geschikt voor wegtransport, binnenvaart en ook voor de elektriciteitssector.

3.2 Vloeibare waterstof (LH2)

3.2.1 Energetische eigenschappen

Om waterstof vloeibaar te maken moet de waterstof worden afgekoeld naar -253 °C. De dichtheid gaat hierbij omhoog naar 71 kg/m^3 (tegenover 42 kg/m^3 van gasvormige waterstof onder druk van 700 bar). Daar staat tegenover dat rekening gehouden moet worden met energieverlies door verdamping en met de installaties en isolatie die nodig zijn voor de zeer lage temperatuur.

3.2.2 Milieu- en veiligheidseigenschappen

Vloeibare waterstof is ook kleurloos en geurloos. Het is zeer licht ontvlambaar en kan explosieve mengsels met lucht vormen. Hoewel het niet giftig is, kan de lage temperatuur vrieswonden veroorzaken en, bij bijvoorbeeld lekkage, condensatie van zuurstof, met mogelijke veiligheidsrisico's. Bij hogere temperaturen kan vloeibare waterstof verdampen, wat de druk doet toenemen en het risico op lekkage of explosie vergroot. Voor koud overladen zijn speciale voorzieningen aan de wal en op het schip noodzakelijk.

3.2.3 Productie

Vloeibare waterstof wordt geproduceerd door gasvormige waterstof te koelen tot onder het kookpunt van waterstof (-253 °C), waarop het condenseert tot een vloeistof. Dit proces begint met het comprimeren van het gas tot een hoge druk. Vervolgens wordt het gas door een warmtewisselaar geleid, waar het wordt afgekoeld door een koelmiddel. Het gas wordt verder gekoeld in een cryogene koeler totdat het benodigde temperatuur bereikt.

[14] *A world-scale e-SAF hub in the Port of Rotterdam - Advario*

3.2.4 Transport

Transport met zeevaart is toegestaan en technisch mogelijk. Het schip wordt uitgerust met installaties om de cryogene temperatuur te behouden. Dit is bewezen op kleine schaal, en opschaling hiervan is in ontwikkeling. Transport van vloeibare waterstof via buisleidingen over grote afstanden is niet haalbaar, vanwege de benodigde koeling. Over korte afstanden, zoals bijvoorbeeld een buisleiding in een waterstof terminal, is dit wel mogelijk. Transport over de weg en over het spoor zijn wel toegestaan en technisch mogelijk, maar hierbij gaat het om kleine volumes. Transport via de binnenvaart is momenteel niet toegestaan, op dezelfde grond als gasvormige waterstof. Om transport via de binnenvaart mogelijk te maken, zal Europese wetgeving aangepast moeten worden.

3.2.5 Opslag

De opslag van vloeibare waterstof gebeurt in cilindrische tanks en bolvormige tanks. Een bol minimaliseert de contactoppervlakte met de relatief warme buitenwereld en daarmee de energie benodigd voor koeling. Deze bolvormige tanks worden sinds de jaren zeventig gebruikt voor de opslag van vloeibare waterstof in met name de ruimtevaartsector, en ze worden ook gebruikt voor opslag van LNG. Er wordt momenteel ook verkend of zeer grootschalige opslag van LH2 mogelijk is, zoals vergelijkbare grootschalige opslag van LNG in cilindrische tanks. Bij de opslag van vloeibare waterstof komt per dag circa 1 tot 5% gasvormige waterstof vrij. Vaak staat er daarom naast de opslagfaciliteit ook een liquefactie-installatie om de gasvormige waterstof weer vloeibaar te maken.

3.2.6 Conversie naar waterstof

Om vloeibare waterstof om te zetten naar gasvormige waterstof wordt de temperatuur verhoogd. Dit wordt gedaan door de vloeibare waterstof door een warmtewisselaar te leiden. Het medium in de warmtewisselaar kan bijvoorbeeld water of lucht zijn. Naarmate de vloeibare waterstof wordt verwarmd, begint het te verdampen. De gasvormige waterstof die ontstaat, wordt op druk gebracht om het geschikt te maken voor transport. Dit kan worden gedaan met behulp van compressoren.

3.2.7 Eindgebruik

Vloeibare waterstof krijgt mogelijk toepassingen voor direct gebruik in scheepvaart en luchtvaart. De waterstof wordt gekoeld opgeslagen vanwege de hogere energiedichtheid, en dan gebruikt in een brandstofcel. Vloeibare waterstof brengt echter de nodige uitdagingen met zich mee in de infrastructuur in luchthavens en de kosten voor koeling daarbij.

3.3 Ammoniak (NH3, koud/warm)

3.3.1 Energetische eigenschappen

Ammoniak bestaat uit één stikstofatoom met daar drie waterstofatomen aan gebonden (NH_3). Ammoniak is gasvormig bij kamertemperatuur en atmosferische druk. Om de dichtheid te verhogen wordt het vloeibaar gemaakt, ofwel onder druk van 8,5 bar (warme ammoniak) ofwel gekoeld naar -33 °C (koude ammoniak).

Voor een waterstofdrager is relevant hoeveel waterstof er per kilogram of per kubieke meter aanwezig is, ook wel gravimetrische dan wel volumetrische waterstofdichtheid genoemd. Uit 1 kilogram ammoniak kan theoretisch 0,18 kg waterstof worden gehaald, en uit 1 m^3 ammoniak kan 124 kg waterstof gehaald worden. Dit is enkel op basis van moleculair gewicht, zonder conversieverliezen. Ammoniak wordt als waterstofdrager naar voren geschoven vanwege de hoge volumetrische waterstofdichtheid. Daarvoor is

wel koeling of druk nodig, maar de energie die hiervoor nodig is, is aanzienlijk lager dan bij vloeibare waterstof.

3.3.2 Milieu- en veiligheidseigenschappen

Ammoniak is bij kamertemperatuur een kleurloos gas met een scherpe, prikkelende geur. Het is ontvlambaar en kan explosieve mengsels vormen met lucht, maar er is relatief veel energie nodig voor ontsteking waardoor deze risico's lager zijn dan bij waterstof. Ammoniak is echter giftig bij inademing, inslikken of contact met de huid. Ook is ammoniak corrosief, zodat speciale materialen zijn vereist voor opslag en transport. In geval van lekkage is ammoniak gemakkelijk te detecteren, maar leidt het ook tot risico's en overlast door de sterke geur en irriterende werking. In combinatie met het feit dat ammoniak gasvormig wordt en zich zo verspreidt door de lucht kunnen de effecten van ammoniak ver reiken.

Vloeibaar gemaakte ammoniak kan bij hogere temperaturen verdampen, waardoor de druk opbouwt, wat het risico op lekkage of explosie verhoogt. Bij lagere temperaturen is koude ammoniak gemakkelijker te bewerken en onder controle te houden. Koud overladen vereist wel speciale voorzieningen aan de wal en op het schip.

3.3.3 Productie

Ammoniak wordt voornamelijk geproduceerd via het zogenaamde Haber-Bosch proces, waarbij stikstof (N_2) uit de lucht en waterstof (H_2) worden gecombineerd onder hoge druk en temperatuur in aanwezigheid van een katalysator om ammoniak (NH_3) te vormen. De productie van groene ammoniak verschilt in principe niet, alleen wordt daarbij groene waterstof betrokken.

3.3.4 Transport

Transport van ammoniak via zeevaart is toegestaan, technisch mogelijk en gebeurt ook al. Hier is een voorkeur voor transport van vloeibare (koude) ammoniak, wegens o.a. de betere beheersbaarheid. De verschillende activiteiten met ammoniak zijn niet nieuw; ammoniak wordt al decennialang op grote schaal gebruikt en getransporteerd, waardoor veel expertise is opgebouwd omtrent de veiligheid en technische aspecten van het omgaan met deze stof.

Ammoniak kan ook per buisleiding worden getransporteerd. Dit kan in vloeibare vorm door verhoogde druk. Transport van ammoniak die door koeling vloeibaar is gemaakt, is niet haalbaar via buisleidingen. Transport van ammoniak onder druk kent bijkomende risico's, om die reden moet het veilig vervoeren van ammoniak per buisleiding nader worden onderzocht. Vanwege de risico's is veel discussie gaande over de wenselijkheid van het vervoer van ammoniak via buisleidingen.[15] Omdat ammoniak sterk corrosief is, moet de buis van zeer bestendig materiaal zijn of van een geschikte coating worden voorzien. Verder maakt het voor het gedrag van ammoniak veel uit of ammoniak in gekoelde vorm of gasvormig onder druk wordt vervoerd. Bij een incident met gekoelde ammoniak ontstaan veel kleinere effectgebieden (aandachtsgebieden) dan bij ammoniak onder druk[16]. Het is daarom relevant om rekening te houden met de toestand waarin ammoniak getransporteerd wordt. Het plan van de Delta Rhine Corridor (DRC) omvatte ook een buisleiding voor ammoniak. In het kabinetsstandpunt in relatie tot de DRC[17] is echter aangegeven dat voorlopig alleen wordt ingezet op waterstof en CO_2. De reden hiervoor is dat het plan (met name veiligheid) en de business case voor ammoniaktransport via een buisleiding nog onvoldoende zijn uitgewerkt en meer tijd nodig hebben.[18]

---

[15] *Veiligheid transport van ammoniak door buisleidingen, Witteveen + Bos, AVIV, januari 2024; Transport van waterstofdragers door buisleidingen en bijbehorende risico's, Antea Group, november 2023.*
[16] *Presentatie Air Products, 2024 (niet publiek)*
[17] *Kabinet zet in op waterstof- en CO2-infrastructuur in Delta Rhine Corridor | Nieuwsbericht | Rijksoverheid.nl*
[18] *https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2024/12/05/scope-en-vervolg-delta-rhine-corridor*

Naar aanleiding van de ketenstudies[19] uit 2004 is door het Rijk besloten dat het transport van ammoniak over het spoor niet wenselijk is. Het reguliere transport van de IJmond naar Limburg is van het spoor gehaald door met rijkssubsidie lokale productie mogelijk te maken. Transport via Nederland naar andere EU-landen kan niet worden verboden, vanwege Europese regels. Wel mogen bepaalde voorkeursroutes worden aangewezen. Met de Omgevingswet zijn zogenoemde risicoplafonds voor het transport van gevaarlijke stoffen vervallen. Tot slot is er relatief weinig ruimte beschikbaar voor extra goederenvervoer op het spoor in combinatie met het groeiende personenverkeer. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft plannen voor een zogenoemd 'Robuust basisnet' ontwikkeld, waarin nieuwe regels voor het transport van gevaarlijke stoffen zijn vastgelegd. De brief hierover is inmiddels gepubliceerd. Ook is transport van ammoniak over het spoor een van de onderwerpen van de nieuwe rijksvisie op waterstof(dragers).

Binnenvaart heeft een marktaandeel van ruim 95% in het vervoer naar het achterland van ammoniak[20]. Momenteel wordt de ammoniak warm vervoerd, maar voor een deel van de sector heeft koud transport op termijn de voorkeur[21], aangezien aanvoer, op- en overslag ook bij voorkeur met koude ammoniak plaatsvindt.[22] De binnenvaartschepen voor ammoniak zijn niet standaard bruikbaar voor bijvoorbeeld methanol of andersom, omdat het om aparte klassen van schepen gaat. LPG-tankers vormen hierop echter een uitzondering en zijn vaak, na kleine aanpassingen, goed bruikbaar voor transport van ammoniak Wegtransport van ammoniak is mogelijk, maar komt in de praktijk nauwelijks voor vanwege kosten en risico's.[23] Er zijn strenge technische eisen voor de verschillende modaliteiten, en ook gespecialiseerde trainingen voor vervoerend personeel. Deze eisen zijn vastgelegd in eerdergenoemde nationale en internationale wet- en regelgeving.

3.3.5 Opslag

Ammoniak kan zowel onder druk in cilinders en bollen, als in gekoelde atmosferische tanks worden opgeslagen. Vanwege de giftige aard van ammoniak, zijn er strikte regels over de vorm van opslag.[24] De PGS12-richtlijn is geactualiseerd, waardoor de regels voor de opslag nu voldoen aan de huidige stand der techniek. De opslagvoorziening moet een levensduur van minimaal vijftig jaar hebben, moet een full-containment opslagtank zijn, beschikken over een dikke betonnen buitenwand, over interne pompen, een fundering op palen, en een volledig vrije wand en bodem om risico op lekkage te minimaliseren. In de haven van Rotterdam is momenteel opslag van ammoniak door OCI in tanks van 15.000 m^3 per stuk.. Daarnaast hebben verschillende bedrijven plannen op grote schaal ammoniak op te gaan slaan en/of te kraken naar waterstof.

3.3.6 Conversie naar waterstof

Ammoniak wordt gesplitst in stikstof en waterstof door middel van katalytisch kraken. De reactie vindt plaats bij temperaturen tussen 500 en 900 °C zonder katalysator, of op een lagere temperatuur bij 400 tot 700 °C met behulp van een katalysator. Na het kraakproces bevat het gasmengsel zowel waterstof als stikstof. Deze gassen moeten worden gescheiden. Katalytisch kraken is nader uitgewerkt bij het voorbeeldbedrijf in paragraaf 6.1.

[19] *Ketenstudies ammoniak, chloor en LPG : gedeelde risico's : externe veiligheid productieketens, TNO, 2004*
[20] *Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers (TNO, Arcadis, Berenschot, 2024)*
[21] *Haalbaarheidsonderzoek Vervoer ammoniak naar het achterland (RHDHV, 2024, niet publiek)*
[22] *Haalbaarheidsonderzoek Vervoer ammoniak naar het achterland (RHDHV, 2024, niet publiek)*
[23] *Notitie Quick Scan Verkenning Vervoer Gevaarlijke Stoffen, Ecorys*
[24] *https://publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/pgs12/*

3.3.7 Eindgebruik

Ammoniak is een belangrijke grondstof voor kunstmest. Ook wordt ammoniak gebruikt in de productie van verschillende industriële chemicaliën en toepassingen, waaronder explosieven, kunstmest, kunststoffen en synthetische vezels. Het is een belangrijk ingrediënt in de productie van nylon en andere polymeren. Andere toepassingen zijn als koelmiddel in industriële koelsystemen, vooral in de voedselverwerking en opslag, en in waterzuiveringsprocessen, zowel om de pH-waarde te reguleren als bij biologische behandelingsprocessen. Verder kan ammoniak dienen als reagens in DeNOx-systemen om de emissie van NOx te verminderen.

Ammoniak kan daarnaast als brandstof dienen. Allereerst in de scheepvaart, met daartoe aangepaste verbrandingsmotoren. Ammoniak kan daarom uitgroeien tot voorname bunkerbrandstof. Daarnaast kan ammoniak als brandstof dienen voor elektriciteitsproductie, in eerste instantie co-verbranding in kolen- of gascentrales, en er zijn ontwikkelingen voor centrales die werken met 100% ammoniak. Aandachtspunt bij verbranding is het ontstaan van NO_x.[25] Tot slot kan ammoniak ook aan boord van een schip worden geconverteerd naar waterstof, die vervolgens wordt gebruikt in een brandstofcel, of rechtstreeks worden gebruikt in een brandstofcel.[26]

3.4 Methanol (MeOH)

3.4.1 Energetische eigenschappen

Methanol (CH_3OH) bestaat uit één koolstofatoom met daaraan verbonden drie waterstofatomen en één hydroxylgroep (OH). Methanol is vloeibaar bij kamertemperatuur en atmosferische druk. Dit is een voordeel voor opslag en transport. Voor gebruik als methanol merken we op dat de verbrandingswaarde (20 MJ/kg) lager is dan waterstof maar vergelijkbaar met ammoniak, en dat de energiedichtheid naar volume (16 GJ/m^3) hoger is dan waterstof en ook hoger dan ammoniak. Voor conversie terug naar waterstof is het relevant dat uit 1 kg methanol theoretische tot 0,13 kg waterstof gehaald kan worden, en uit 1 m^3 tot 99 kg waterstof. Zowel wat betreft volume als gewicht is methanol daarmee gunstiger dan waterstof maar minder dan ammoniak. Nadeel is dat bij verbranding CO_2 vrijkomt, wat bijdraagt aan de uitstoot van broeikasgassen. Dat betekent dat ook de koolstof afkomstig moet zijn uit een hernieuwbare bron of atmosfeer, anders draagt de methanol bij aan de opwarming van de aarde.

3.4.2 Milieu- en veiligheidseigenschappen

Methanol is een kleurloze vloeistof met een licht zoete geur. Het is ontvlambaar en kan explosieve mengsels vormen met lucht. Het is ook giftig bij inademing, inslikken of contact met de huid. De gevolgen van lekkage kunnen relatief beperkt blijven doordat methanol vloeibaar is en blijft bij omgevingstemperaturen, en zich dus niet zomaar als gas door de lucht verspreid.

3.4.3 Productie

Methanol wordt nu doorgaans geproduceerd uit fossiele grondstoffen (kolen of aardgas). Daarnaast kan methanol geproduceerd worden uit biomassa, door vergassing of vergisting. Methanol kan ook uit waterstof worden geproduceerd door katalytische hydrogenering van koolmonoxide (CO) en kooldioxide (CO_2). Dit proces vindt plaats onder hoge druk en temperatuur in aanwezigheid van een katalysator. De CO_2 kan afkomstig zijn van bijvoorbeeld industriële afvalgassen (*Carbon Capture and Usage*, CCU) of direct worden gewonnen uit de atmosfeer (*Direct Air Capture*, DAC). De productie van methanol uit groene waterstof vergt echter een enigszins ander proces dan de fossiele of biogene productieroute.

[25] *Hiervoor kan een denoxinstallatie noodzakelijk zijn, en daarbij kan ook gebruik gemaakt worden van de ammoniak. Ammoniak en ureum, een afgeleide van ammoniak, zijn een veelgebruikte reagens in denoxinstallaties.*
[26] *The world's first high-temperature ammonia-powered fuel cell for shipping*

Bovendien moet er CO_2 beschikbaar zijn waar de methanol uit groene waterstof wordt geproduceerd. Het vraagt dus op twee niveaus nieuwe faciliteiten waarvoor de technologie nog niet zo ver is ontwikkeld dat die al grootschalig wordt geïmplementeerd.

3.4.4 Transport

Transport via zeevaart is toegestaan, technisch goed mogelijk en gebeurt ook al, waaronder in de haven van Rotterdam. Transport van methanol via buisleidingen is ook goed mogelijk. Ook is transport via binnenvaart, weg of spoor mogelijk met bestaande methanoltankers, tankwagens en tankwagons.

3.4.5 Opslag

Methanol wordt meestal opgeslagen in rechtopstaande cilindrische tanks op atmosferische druk en bij kamertemperatuur. Deze passieve opslag is een van de voordelen van methanol.

3.4.6 Conversie naar waterstof

Waterstof kan worden teruggewonnen uit methanol door middel van *Steam Reforming of Methanol* (SRM). Dit lijkt op *Steam Methane Reforming* (SMR), wat op grote schaal wordt toegepast om waterstof te produceren uit aardgas. SRM vindt plaats op temperaturen van 200 tot 300 °C. De methanol wordt voorverwarmd zodat het verdampt, vervolgens wordt deze door een katalytische reactor geleid. Daarbij kunnen ook methaan, water, kooldioxide en koolmonoxide ontstaan. Deze stoffen worden met één of twee zuiveringsstappen eruit gefilterd.

3.4.7 Eindgebruik

Methanol wordt nu vooral als grondstof ingezet in de chemie, met name voor de productie van formaldehyde, wat wordt gebruikt in de productie van kunststoffen, harsen en andere chemicaliën. Daarnaast wordt methanol gebruikt als oplosmiddel voor harsen, inkten, kleefstoffen en coatings. Ook wordt methanol toegevoegd aan antivriesmiddelen voor auto’s en vliegtuigen. Methanol kan een nieuwe toepassing vinden als basis voor SAF’s, e-fuels of biofuels (dit laatste in geval van methanol uit biomassa).

Methanol wordt als brandstof gebruikt, vooral in de autosport en voor bijmenging. Het heeft een hoog octaangetal en geeft een relatief schone verbranding. De scheepvaart ziet ook toepassingen van methanol als brandstof. Motoren hebben relatief kleine aanpassingen nodig om op methanol te varen. Methanol kan daarom uitgroeien tot belangrijke bunkerbrandstof. Bij verbranding van methanol komt CO_2 vrij, maar als de koolstof in de methanol uit een duurzame bron komt (dat is, uit biomassa of DAC), dan is er netto over de hele cyclus bezien geen bijdrage aan broeikasgassen in de atmosfeer.

Methanol kan ook worden gebruikt voor elektriciteitsopwekking. Het kan worden verbrand (met eventueel naast elektriciteit ook warmtelevering). Een andere optie is het gebruik van methanol in een brandstofcel. De meest gebruikt optie hiervoor is een *indirect methanol fuel cell*: eerst wordt de methanol omgezet naar waterstof door *steam reforming*, waarna de waterstof in een brandstofcel wordt gebruikt. Een andere optie is een *direct methanol fuel cell*. In deze optie is de conversiestap naar waterstof niet nodig, maar de efficiëntie van de brandstofcel ligt lager en het wordt voornamelijk op kleine schaal toegepast.

3.5 Vloeibare organische koolwaterstoffen (LOHC's)

3.5.1 Energetische eigenschappen

LOHC's zijn organische verbindingen die waterstof kunnen opnemen en afgeven via chemische reacties. De drager ondergaat hierbij geen blijvende verandering en kan herhaaldelijk worden gebruikt. Het betekent wel dat een retourstroom nodig is van de drager. LOHC's worden aangeduid als koppel van het niet en wel gehydrogeneerde molecuul. Onder de meest veelbelovende LOHC's bevinden zich tolueen/ methylcyclohexaan (MCH), naftaleen/ decaline, benzeen/ cyclohexaan, benzyltolueen (BT)/ perhydro-benzyltolueen (PBT) en dibenzyltolueen (DBT)/ perhydro-dibenzyltolueen (PDBT). De energetische eigenschappen verschillen per LOHC, maar de waterstofdichtheid is minder gunstig dan ammoniak of methanol, zowel naar gewicht als naar volume.

3.5.2 Milieu- en veiligheidseigenschappen

LOHC's zijn meestal kleurloze vloeistoffen zonder specifieke geur. LOHC's zijn minder ontvlambaar en explosief dan pure waterstof, doordat er meer energie nodig is voor ontsteking. Bij ontleding kunnen gevaarlijke stoffen vrijkomen, bijvoorbeeld benzeen, wat vaak wordt opgelost met extra zuiveringsstappen.

3.5.3 Productie

LOHC's worden geproduceerd door waterstof te binden aan vloeibare organische verbindingen zoals tolueen. Dit proces maakt gebruik van een katalysator en vindt plaats onder gematigde druk en temperatuur.

3.5.4 Transport

Transport via zeevaart is toegestaan en technisch mogelijk. Transport van LOHC's door buisleidingen is ook toegestaan en technisch mogelijk. Wel hebben sommige LOHC's een hoge viscositeit, wat het transport via buisleidingen energie-intensief maakt. Bovendien zijn twee (parallelle) buisleidingen nodig: één om de LOHC heen te brengen en één voor de retourstroom van de gedehydrogeneerde LOHC. Transport over spoor, weg of binnenvaart is goed mogelijk. Het zijn goed te hanteren vloeistoffen, waarbij wel rekening gehouden moet worden met de milieu- en veiligheidseigenschappen.

3.5.5 Opslag

LOHC's kunnen op atmosferische druk en bij kamertemperatuur opgeslagen worden. Deze LOHC's hebben vergelijkbare eigenschappen met typische koolwaterstofverbindingen die nu worden opgeslagen, zoals olie. Ze kunnen dus ook in vergelijkbare tanks opgeslagen worden en bestaande infrastructuur zou hiervoor hergebruikt kunnen worden. De meest gangbare vorm voor opslag is opslagtanks met een vast of een drijvend dak.

3.5.6 Conversie naar waterstof

Waterstof wordt teruggewonnen uit LOHC's door middel van dehydrogenatie. Dit is een exotherme reactie die plaatsvindt op temperaturen van 200°C of hoger, in aanwezigheid van katalysatoren. Dehydrogenatie is een bekend proces uit de petroleumchemie. Het proces wordt toegepast op bijvoorbeeld nafta om bijvoorbeeld ethyleen, propyleen of buteen te produceren. De specificaties van het proces verschillen tussen de verschillende LOHC's wat betreft temperatuur, druk, katalysator en reactormethodiek. Na dehydrogenatie moet de waterstof gefilterd worden, wat kan worden opgelost met een membraan of met PSA.

3.5.7 Eindgebruik

LOHC's zijn primair bedoeld voor intercontinentaal transport van waterstof. Het enige directe gebruik van LOHC's is in de vorm van een *direct LOHC fuelcell*. Dit is een innovatieve brandstofcel die de organische drager direct omzet in elektriciteit zonder dat het waterstofgas eerst moet worden vrijgemaakt. Dit kan bijvoorbeeld worden toegepast in de scheepsvaart voor de aandrijving van elektrische motoren. Deze technologie verkeert echter nog in de experimentele fase en er is nog onderzoek en ontwikkeling nodig voordat ze klaar is voor commerciële toepassing. Ook is indirect gebruik van LOHC's mogelijk, door eerst de waterstof vrij te maken, en die in een brandstofcel te gebruiken.

3.6 Overige dragers

Er zijn nog andere waterstofdragers, die niet binnen de scope vallen van de gehele studie, maar we bespreken hier kort vloeibare synthetische methaan. Ook is een korte vergelijking met andere (fossiele) energiedragers gegeven,

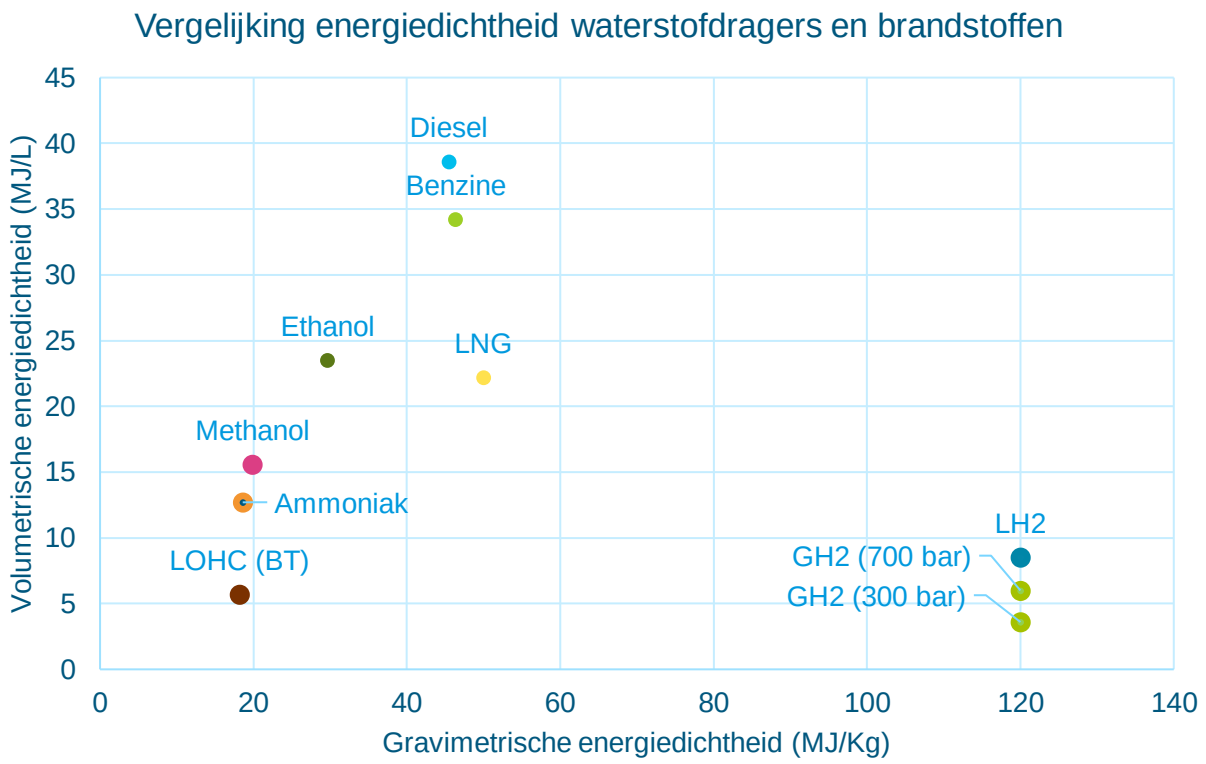
3.6.1 Vloeibare synthetische methaan (LSM of e-LNG)

LSM is methaan geproduceerd uit koolstofdioxide (CO_2) en waterstof (H_2) met behulp van hernieuwbare elektriciteit. Het wordt ook wel e-LNG genoemd. Methaan is het belangrijkste bestanddeel van aardgas en is dus een bekende stof. Bij atmosferische druk en kamertemperatuur is methaan een gas, maar het kan worden omgezet in vloeibare vorm door het te koelen tot -162 °C. Dit verhoogt de energiedichtheid per volume-eenheid aanzienlijk, waardoor het efficiënter kan worden opgeslagen en getransporteerd. De energiedichtheid van LSM is 22 GJ/m^3, wat hoger is dan die van waterstof (4,6 GJ/m^3) en andere waterstofdragers (ammoniak 13 GJ/m^3).

Een voordeel van LSM is dat het kan worden gebruikt in bestaande LNG-infrastructuur zonder grote aanpassingen, wat het een aantrekkelijke optie maakt voor de maritieme sector en andere industrieën die op zoek zijn naar koolstofarme brandstoffen. Nadelen zijn echter de zeer energie-intensieve productie van LSM en het feit dat er bij de verbranding CO_2 vrijkomt, wat bijdraagt aan de uitstoot van broeikasgassen. Dat betekent dat ook de koolstof afkomstig moet zijn uit een hernieuwbare bron. LSM wordt in de verdere uitwerking van waterstofdragers in deze systeembeschrijving daarom niet meer meegenomen.

3.6.2 Vergelijking met andere energiedragers

Voor alle waterstofdragers geldt dat de energiedichtheid lager ligt dan bij de koolwaterstoffen die nu veel worden verwerkt in het Rotterdamse havengebied. Zie hiervoor Figuur 1 waar waterstof of waterstofdragers dergelijke koolwaterstoffen substitueren of in vergelijkbare hoeveelheden energie benodigd zijn, daar zullen grotere volumes nodig zijn. Dit kan implicaties hebben voor de ruimtelijke planning van het HIC.



Figuur 1 Vergelijking energiedichtheid waterstofdragers en brandstoffen

3.7 Samenvattend overzicht

Groene waterstof heeft een belangrijke rol in de klimaatneutrale economie. Waterstof is op zich een bekende en beschikbare stof. Huidige productie is grotendeels op basis van aardgas, maar waterstofproductie met elektrolyse komt op steeds grotere schaal beschikbaar. Waterstof kan goed per buis worden getransporteerd, maar is voor intercontinentaal transport economisch ongunstig doordat het bij kamertemperatuur en atmosferische druk een ijl gas is. Dit is de aanleiding voor de aandacht voor waterstofdragers.

Vloeibare waterstof heeft een hogere dichtheid dan gasvormige. De koeling (-253 °C) is een technische en economische opgave, maar hierin staan de ontwikkelingen niet stil. Op de lange termijn kan dit een gunstige optie zijn als waterstofdrager in intercontinentaal transport.

Ammoniak kan vloeibaar gemaakt worden hetzij door koeling (koude ammoniak, bij -33 °C), hetzij door druk (warme ammoniak, 8,5 bar). Het heeft dan een hoge waterstofdichtheid per 1 m^3. De productie van groene ammoniak verschilt niet van de conventionele ammoniakproductie, het is hetzelfde proces waarin enkel de waterstof van een andere (groene) bron wordt betrokken. Dit maakt dat bestaande faciliteiten, kennis en ervaring direct toegepast kunnen worden. Deze bestaande infrastructuur, samen met bestaande toepassingen in met name kunstmest, maakt dat ammoniak op korte termijn een vooraanstaande waterstofdrager is. Alleen het kraken voor conversie terug naar waterstof is nog in ontwikkeling. Ook is ammoniak een giftige stof, waardoor opslag en transport aandacht nodig heeft, met name door bewoonde gebieden.

Methanol is vloeibaar onder normale omstandigheden, en wat dat betreft vergelijkbaar met bekende koolwaterstoffen zoals benzine. Methanol heeft een hoge waterstofdichtheid, hoewel iets lager dan

ammoniak. Methanol kent ook al toepassingen, zoals bijmenging in brandstoffen. Opslag en transport zijn bewezen technologieën en er kan van bestaande infrastructuur gebruik worden gemaakt. Methanol wordt nu meestal geproduceerd uit fossiele brandstoffen. Alternatief is productie uit biomassa mogelijk. Productie op basis van waterstof kan door deze te koppelen aan CO_2, die daarvoor moet worden afgevangen bij industrie (CCU) of uit de lucht (DAC). Deze productieroute is nog in ontwikkeling en dat geldt ook voor de beschikbaarheid van CO_2. Daarom wordt verwacht dat methanol als waterstofdrager op korte termijn achterblijft bij ammoniak. Op langere termijn kan die rol van methanol groeien.

LOHC's worden ontwikkeld als vloeibare waterstofdrager bij normale omstandigheden. Aan de productiezijde wordt waterstof gekoppeld aan de drager, aan de andere zijde wordt de waterstof daaruit weer vrijgemaakt, waarna de drager retour gaat en opnieuw gebruikt kan worden. LOHC's zijn nieuw, transport en opslag zijn relatief overzichtelijk, maar productie en conversie zijn nog in ontwikkeling. Als de ontwikkeling doorgezet kan worden, dan kunnen LOHC's (of een van de LOHC's) op termijn een grotere rol innemen als waterstofdrager.

Tabel 1 Overzichtstabel eigenschappen van waterstofdragers

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC[27]
Waterstofdichtheid	**42 kg H_2/m^3** bij 20°C en 700 bar, gasvormig	**71 kg H_2/m^3** bij -253°C en 1 bar, vloeibaar	**124 kg H_2/m^3** vloeibaar, bij -33°C en 1 bar (koud) of 20°C en 8,5 bar (warm)	**99 kg H_2/m^3** bij 20°C en 1 bar, vloeibaar	**47 kg H_2/m^3** bij 20°C en 1 bar, vloeibaar
Energiedichtheid van de waterstofdrager	**4,6 GJ/m^3** bij 20°C en 700 bar	**8,5 GJ/m^3** bij -253°C en 1 bar	**13 GJ/m^3** koud of warm	**16 GJ/m^3** bij 20°C en 1 bar	**15 GJ/m^3** bij 20°C en 1 bar
Milieu en veiligheid	Explosief	Explosief, risico op vrieswonden	Toxisch, irriterend, corrosief	Licht toxisch, ontvlambaar	Licht toxisch
Productie	Elektrolyse van H_2O met elektriciteit, SMR uit aardgas (met CCUS), vergassing van biomassa	Koelen van GH_2	Haber-Bosch uit N_2 en GH_2	Uit GH_2 en CO_2 (uit DAC of CCU), uit kolen of aardgas, of uit biomassa	Hydrogeneren van drager met GH_2
Transport	Buis (kleine hoeveelheden: zeevaart, binnenvaart, spoor, weg)	Zeevaart (kleine hoeveelheden: spoor, weg)	Zeevaart, buis, binnenvaart (Kleine hoeveelheden: spoor, weg)	Zeevaart, buis, binnenvaart, spoor, weg	Zeevaart, buis, binnenvaart, spoor, weg (retourstroom)
Opslag	Cilinders, containers, tanks (hoge druk, lage dichtheid)	Tanks (koeling)	Cilinders, containers, tanks (veiligheids-voorzieningen)	Cilinders, containers, tanks	Tanks
Conversie naar GH2	N.v.t.	Verwarmen aan warmte-wisselaar	Katalytisch kraken	Steam reforming	Dehydroge-neren met katalysator
Eindgebruik als grondstof	Raffinage, staal, chemie, SAF, e-fuel	-	Kunstmest, industrie, waterzuivering	Chemie, SAF, e-fuel, biofuel	-
Eindgebruik als brandstof	HT-warmte, elektriciteit	-	Scheepvaart, elektriciteit	Weg, schepen	-
Eindgebruik in brandstofcel	Weg, binnenvaart, elektriciteit	Scheepvaart, luchtvaart	Scheepvaart	Weg, scheepvaart	Scheepvaart

[27] *Waterstofdichtheid en energiedichtheid zijn hier weergegeven voor de specifieke LOHC tolueen/ methylcyclohexaan (MCH).*

4 Ontwikkeling waterstofketens in Rotterdam

In dit hoofdstuk geven we een kwantitatieve invulling weer van de ontwikkeling van de waterstofketens in havengebied Rotterdam in de jaren 2030, 2040 en 2050. Deze volumes zijn gebaseerd op toekomstscenario's van HbR.[28] Deze scenario's zijn niet bedoeld als voorspelling, maar om uiteenlopende mogelijke ontwikkelingen te verkennen. De scenario's zijn gebaseerd op beschikbare inzichten en hebben een grote bandbreedte voor ontwikkelingen op de lange termijn. De HbR-scenario's zijn het uitgangspunt, omdat deze specifiek zijn ontwikkeld voor de ontwikkelingen in de haven en de bredere 'omgeving', met externe factoren die van invloed zijn op de havenactiviteiten en doorvoer, zoals de ontwikkelingen in het Noordwest-Europese achterland.

N.B.: in dit hoofdstuk staan alle volumes opgegeven in waterstofequivalenten, tenzij anders aangegeven.

Op de scenariodata hebben we enkele bewerkingen uitgevoerd. Allereerst moesten de scenario's aangevuld worden wat betreft conversie en een uitsplitsing naar verschillende waterstofdragers in transport naar het achterland.
Ook is een extra scenario gecreëerd. In het oorspronkelijke "Connected Deep Green"-scenario is sprake van grote economische activiteit met een nadruk op industrie in het havengebied, aansluitend op de NOVEX groene industriehaven. De duurzame hubfunctie van NOVEX heeft een soortgelijke economische activiteit, maar legt de nadruk op doorvoer. Daarom is r een aanpassing gemaakt op het "Connected Deep Green"-scenario, waarbij het scenario is aangepast met doorvoer van ammoniak, gezien de gelijkenis in economische activiteit. Hierbij is de aanname gedaan dat de importvolumes van scenario 1a en 1b gelijk zijn.
Tot slot, voor de scenario's 2 t/m 4 (zie Tabel 2) is de verdeling van waterstofdragers voor 2030 en 2040 middels extrapolatie teruggerekend vanaf de verdeling in 2050[29].

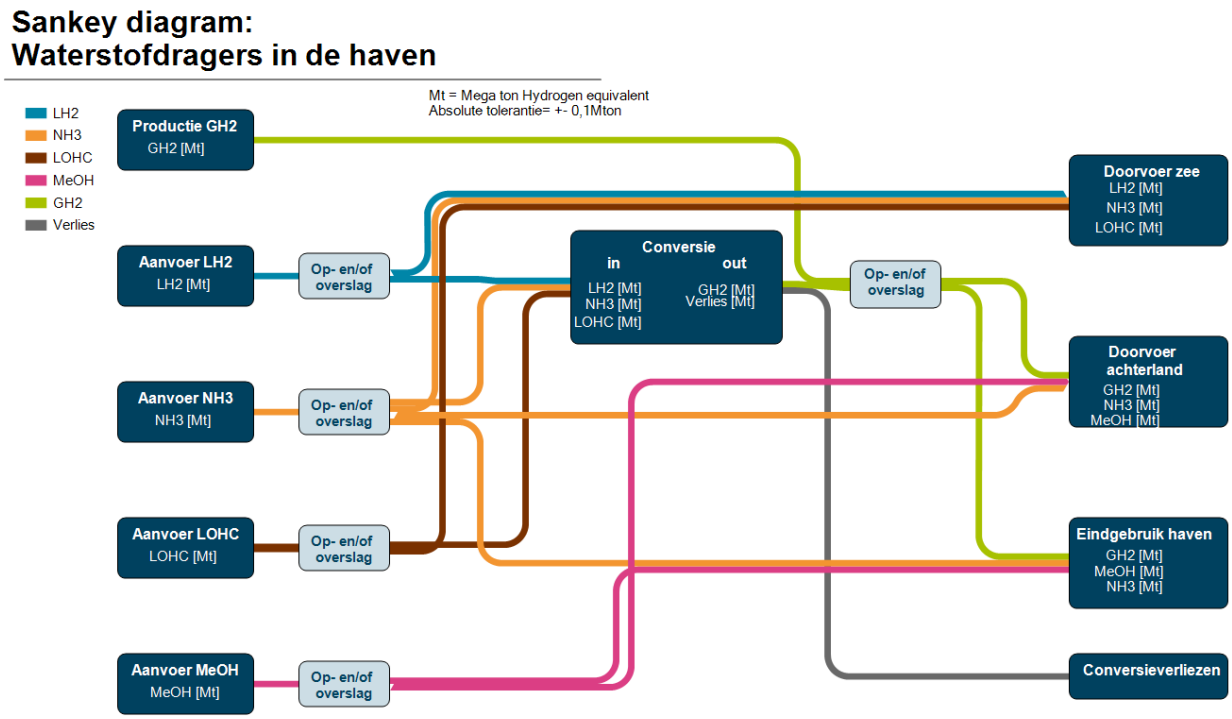
Voor LH2 en LOHC houden de scenario's geen rekening met transport naar het achterland. Echter, voor bepaalde eindgebruik is transport naar eindgebruik in het achterland mogelijk (bijv. LH2 naar waterstoftankstations). Deze volumestromen zijn echter niet gekwantificeerd.

In Rotterdam zijn vijf ontwikkelrichtingen ontwikkeld voor het NOVEX-gebied Rotterdamse Haven, die het havenindustriële cluster omvat.[30] Voor deze ontwikkelrichtingen zijn geen speciale scenario's ontwikkeld. Wel geven we een handreiking hoe de scenario's van HbR te koppelen zijn aan de ontwikkelrichting van NOVEX (Tabel 2). De voorgestelde koppeling is gelegd op basis van overeenkomstige economische parameters en is weergegeven in Tabel 2.[31] Het belangrijkste is dat de scenario's samen een bandbreedte aangeven welke ontwikkelingen in de waterstofketen in NOVEX verder kunnen worden opgepakt. Voor ieder scenario uit Tabel 2 is voor 2030, 2040 en 2050 een Sankey diagram opgesteld, waarin de waterstofketen is uitgezet. In Figuur 2 is een voorbeeld gegeven van een Sankey diagram.

[28] https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/port-of-rotterdam-authority-presents-future-scenarios-for-2050
[29] Havenscenario's - stroomschema's liquids en biomass
[30] https://open.overheid.nl/documenten/dpc-c834ba8f739d191e121c28999a78b8304c186f10/pdf
[31] Deze handreiking is gebaseerd op de economische cijfers aan beide zijden: enerzijds de volumes in de scenario's en anderzijds de parameters 'Economie' en 'Grondstoffen en energiesysteem' (zie paragraaf 3.1 in het rapport over de ontwikkelperspectieven). De achtergrondverhalen van de scenario's enerzijds en ontwikkelperspectieven anderzijds komen verder beperkt overeen.

Tabel 2 Koppeling tussen NOVEX ontwikkelrichtingen en de scenario's van HbR.

NOVEX ontwikkelrichtingen	Scenario HbR	Overeenkomstige parameters
Groene industriehaven	1a. Connected Deep Green	Grote economische activiteit, nadruk op industrie in havengebied
Duurzame hubfunctie	1b. Connected Deep Green met doorvoer ammoniak	Grote economische activiteit, nadruk op doorvoer
Circulaire maakhaven	2. Wake-up Call	Gemiddelde economische activiteit
Haven in de metropool	3. Regional Well-being	Gemiddelde economische activiteit, nadruk op regionale samenwerking
Schone haven in de delta	4. Protective markets	Relatief lage economische activiteit



Figuur 2 Sankey-diagram van waterstofketens per waterstofdrager

4.1 Scenario 1a Groene industriehaven

Het scenario "*Connected Deep Green"* gaat uit van effectieve wereldwijde samenwerking waarbij klimaatneutraliteit wordt behaald in 2050. Er is hoge economische activiteit en een verschuiving naar hernieuwbare bronnen. Het HIC richt zich op groene chemie en duurzame industrieën. Daarnaast is er groei in containeroverslag en zijn er investeringen in groene technologieën.

Het totaal van productie en aanvoer groeit in dit scenario tot 20,1 Mtpa[32] (waterstof equivalent) in 2050. Daarvan komt 2 Mtpa van Nederlandse **waterstofproductie**. Voor elektrolyse in het havengebied zelf houden we een maximum aan 1 Mtpa of circa 10 GW elektrolysercapaciteit. Bij hogere productie gaan we uit van waterstofproductie direct bij windparken op de Noordzee en/of andere locaties in Nederland, waarna de waterstof per buis naar het havengebied getransporteerd wordt. Dit zou voor 2040 beslag kunnen krijgen en verder kunnen groeien richting 2050.

[32] *Miljoen ton per jaar*

Er wordt een grote groei voorzien van **import** van waterstofdragers, waarbij sommige zich eerder ontwikkelen en andere zich later in de periode tot 2050. Vloeibare waterstof ontwikkelt zich later. Dit start op na 2030, komt op 2 Mtpa in 2040 en wordt een belangrijke drager in 2050 met 7,2 Mtpa. Ammoniak kent de grootste groei al eerder, met 5,9 Mtpa in 2040 en 6,9 Mtpa in 2050. Voor methanol is een stabiel groeipad voorzien naar 2,6 Mtpa in 2050. LOHC's houden een bescheiden aandeel, maar maken de grootste ontwikkeling door voor 2040, uitkomend op 1,3 Mtpa in 2050.

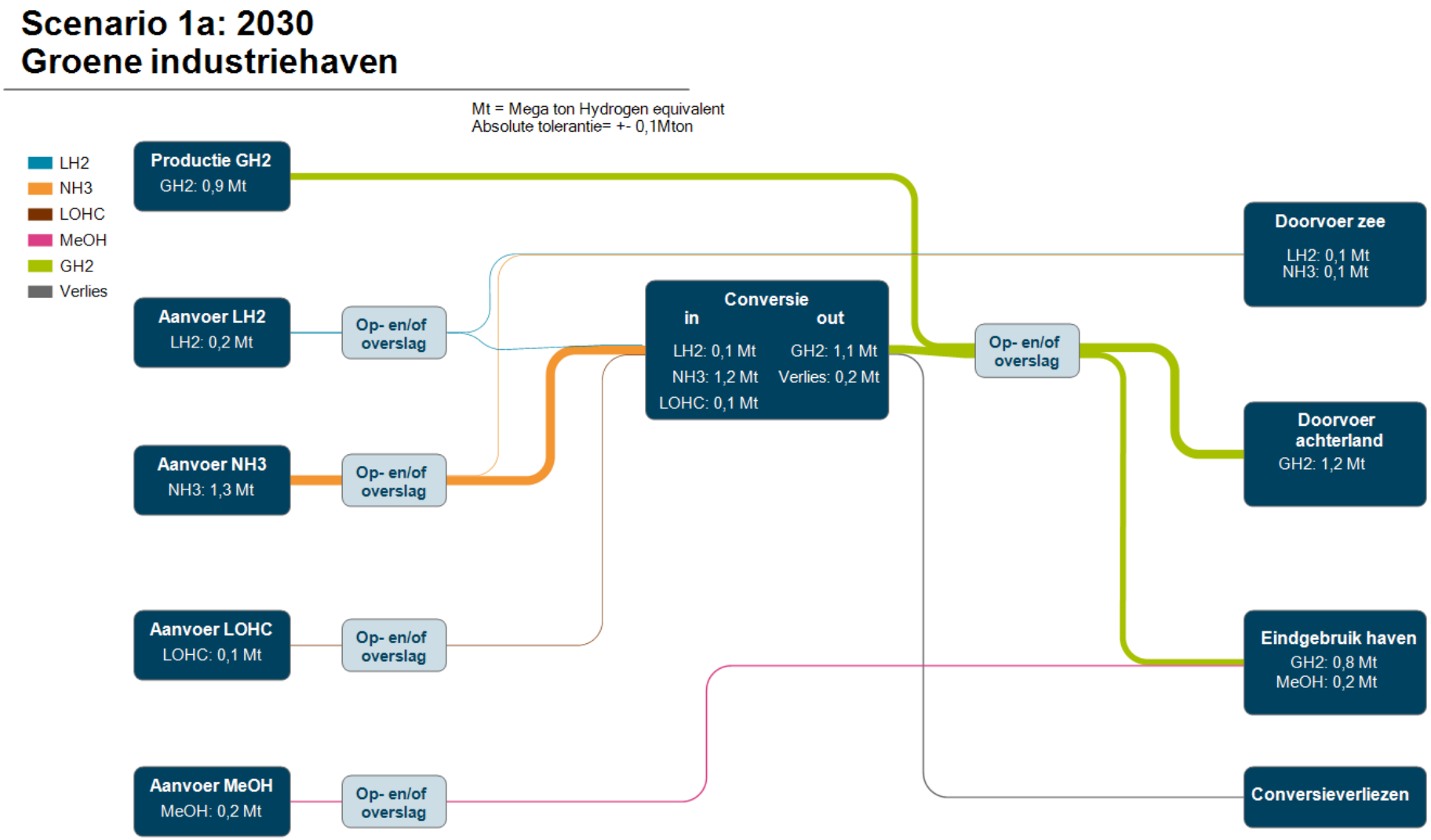
Voor **opslag** houden we aan dat de voorraad gelijk is aan een kwart van de jaarlijkse overslag. De opslag dient als werkvoorraad voor toepassingen in het havengebied (conversie en eindgebruik) en dient daarnaast als strategische voorraad. De gekozen verhouding ligt in lijn met een indicatie van HbR over huidige reserves van fossiele energiedragers. Per waterstofdrager spelen daarbij eigen overwegingen. Gasvormige waterstof zal in grote volumes niet worden opgeslagen in het havengebied, maar in zoutcavernes. Vloeibare waterstof wordt evenmin opgeslagen in grote volumes, vanwege de kosten voor koeling. De algemene regel zal wel gelden voor ammoniak, methanol en LOHC's, wat neerkomt op respectievelijk 1,7, 0,7 en 0,3 Mt opslagcapaciteit in 2050.

Wat betreft **conversie** gaan alle scenario's van HbR er van uit dat een groot deel van de vloeibare waterstof, ammoniak en LOHC's naar gasvormige waterstof worden omgezet. Het totale volume waterstof uit geïmporteerde waterstofdragers groeit naar 11,5 Mtpa in 2050. De daarbij benodigde capaciteit aan ammoniakkrakers is 4,7 Mtpa en LOHC-krakers is 1,1 Mtpa. De conversieverliezen tellen op tot 1 Mtpa.

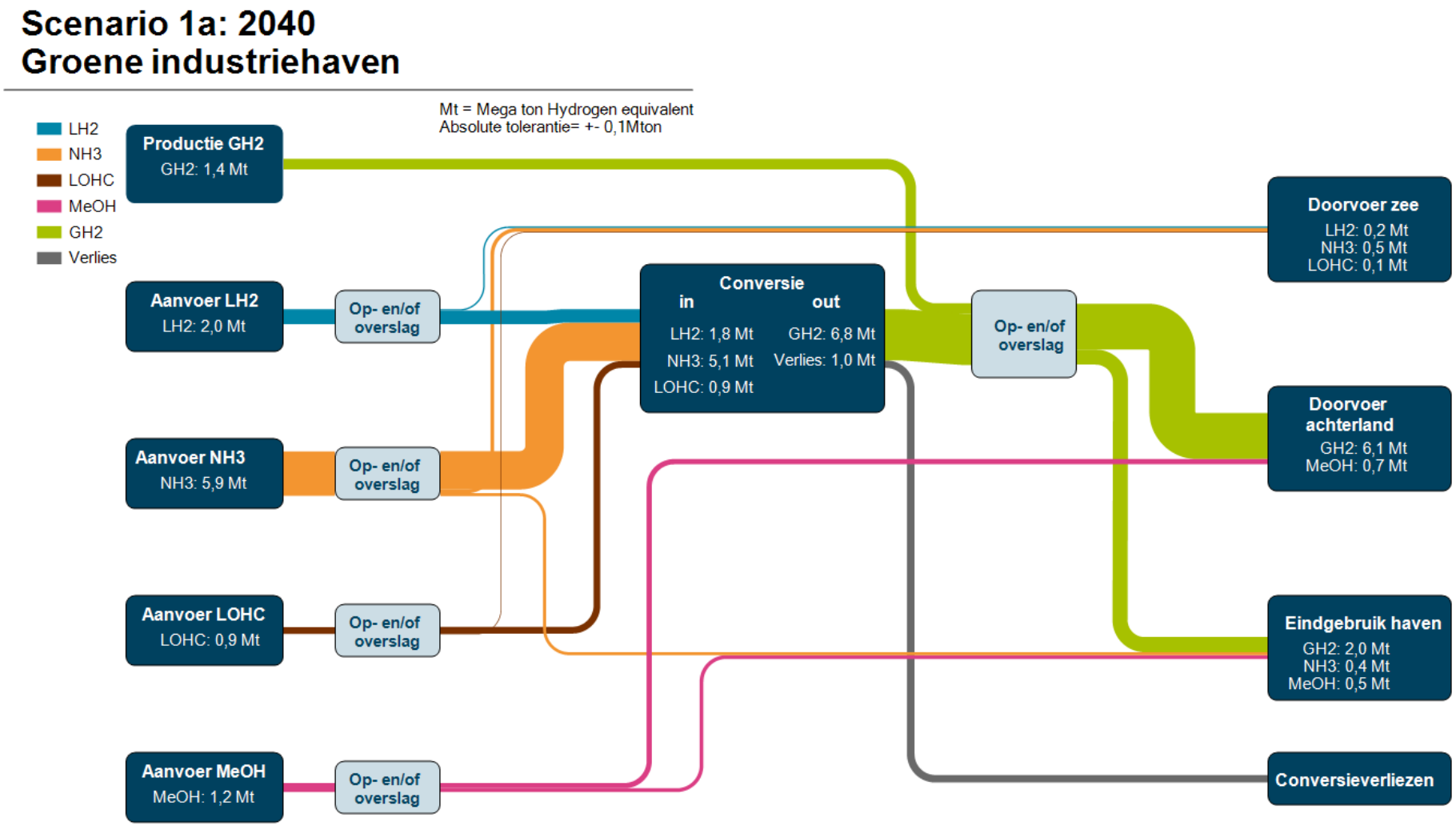
Er vindt **doorvoer** plaats over zee naar andere havens in Europa (*short sea*) van vloeibare waterstof, ammoniak en LOHC's. In 2050 zou het in totaal gaan om 1,4 Mtpa. Een grotere stroom aan doorvoer vindt plaats naar het achterland, in totaal 10,6 Mtpa. In lijn met de aanname dat vrijwel alle aangevoerde waterstofdragers worden geconverteerd, vindt er alleen doorvoer naar het achterland plaats van gasvormige waterstof, vloeibare waterstof en een beperkte hoeveelheid methanol.

Tot slot is er in de haven een **eindgebruik** van gasvormige waterstof, ammoniak en methanol, met een totaal van 7,0 Mtpa. In dit scenario wordt het grootste deel van de waterstofdragers gebruikt voor maritieme bunkerbrandstof, productie van duurzame brandstoffen (zoals SAF), in de chemische sector en voor elektriciteitsproductie.

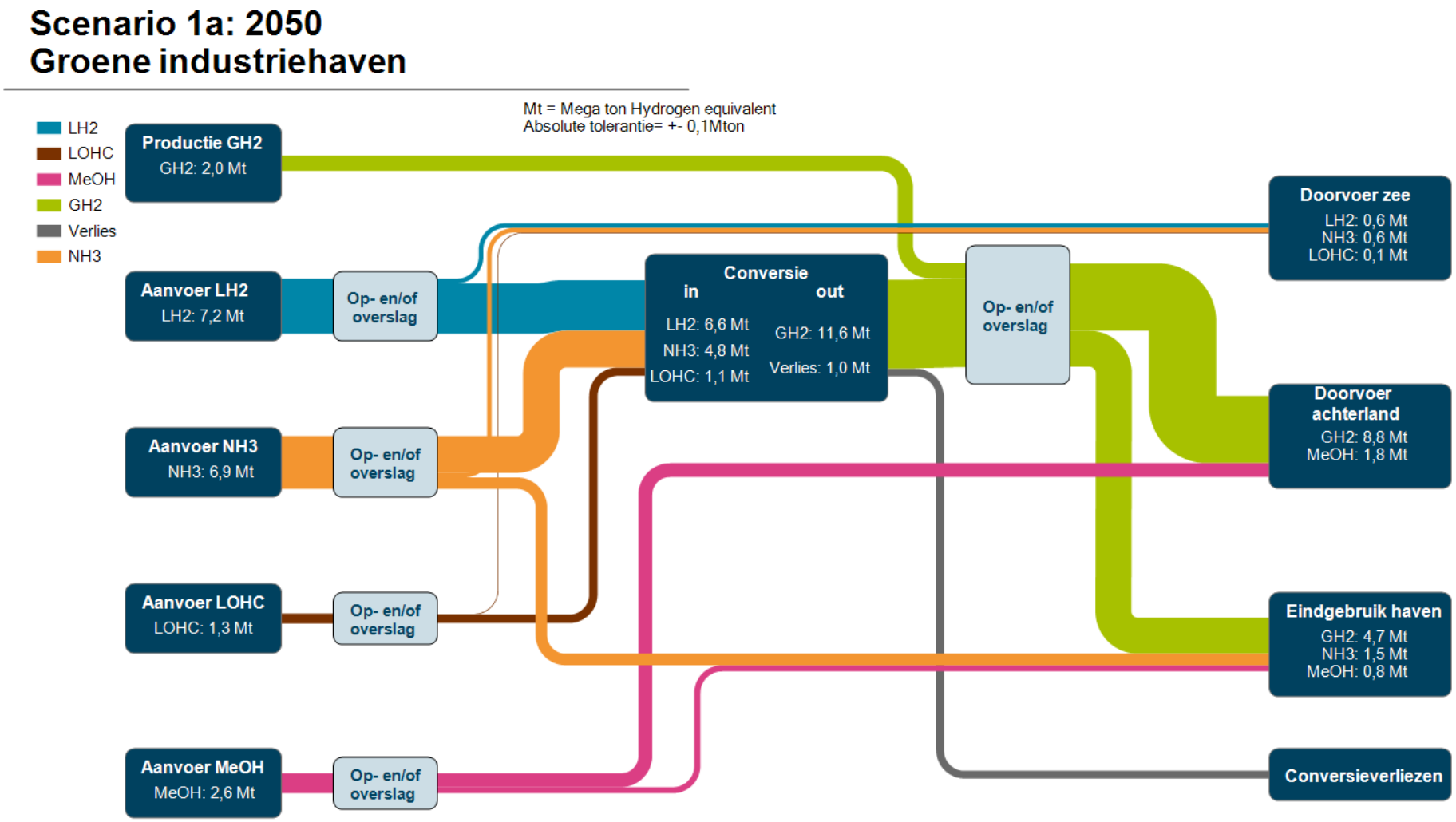
De gehele waterstofketen in dit scenario voor 2030, 2040 en 2050 is weergegeven in onderstaande Sankeys, Figuur 3 t/m Figuur 5.



Figuur 3 Sankey-diagram scenario 1a Groene industriehaven in 2030



Figuur 4 Sankey-diagram scenario 1a Groene industriehaven in 2040



Figuur 5 Sankey-diagram scenario 1a Groene industriehaven in 2050

4.2 Scenario 1b Duurzame hubfunctie

Dit is een variant op scenario 1a. Er is dus ook dan grote economische activiteit, met wereldwijde samenwerking en een verschuiving naar klimaatneutrale energie. In deze variant is het eindgebruik van ammoniak in de haven van Rotterdam vervangen met de doorvoer van ammoniak naar het achterland. Hiermee sluit het beter aan op de ontwikkelingsrichting *Duurzame hubfunctie*, met nadruk op doorvoer van energiestromen. Bovendien geven de scenario's zo een sterkere bandbreedte voor de doorvoer van waterstofdragers.

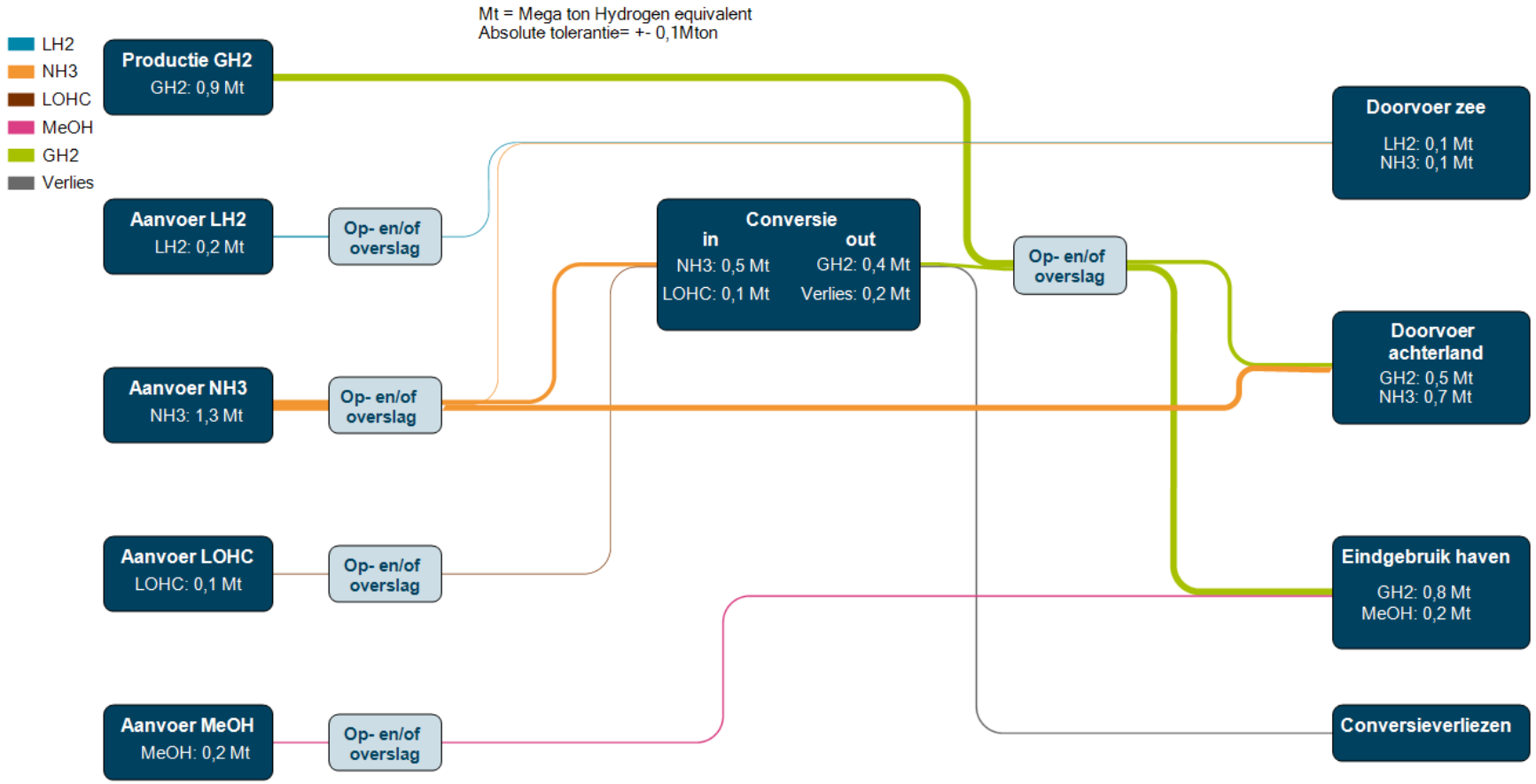
Concreet is er een verschuiving in deze variant van het kraken van ammoniak en doorvoer als waterstof naar doorvoer van ammoniak. Er wordt in 2050 2,6 Mtpa (waterstof equivalent) ammoniak omgezet in waterstof (in plaats van 4,7 Mtpa), er is 2,2 Mtpa (waterstof equivalent) doorvoer van ammoniak en evenredig minder doorvoer van gasvormige waterstof. Ook is er minder opslag nodig, omdat een deel van de ammoniak direct wordt doorgevoerd. De opslagcapaciteit is in 2050 1,0 Mt. in plaats van 1,7 Mt.

Tot slot is er in de haven een **eindgebruik** van gasvormige waterstof, ammoniak en methanol, met een totaal van 7,0 Mtpa. In dit scenario wordt het grootste deel van de waterstofdragers gebruikt voor maritieme bunkerbrandstof, productie van duurzame brandstoffen (zoals SAF), in de chemische sector en voor elektriciteitsproductie.

De gehele waterstofketen in dit scenario voor 2030, 2040 en 2050 is weergegeven in onderstaande Sankeys, Figuur 6 t/m Figuur 8.

Royal HaskoningDHV

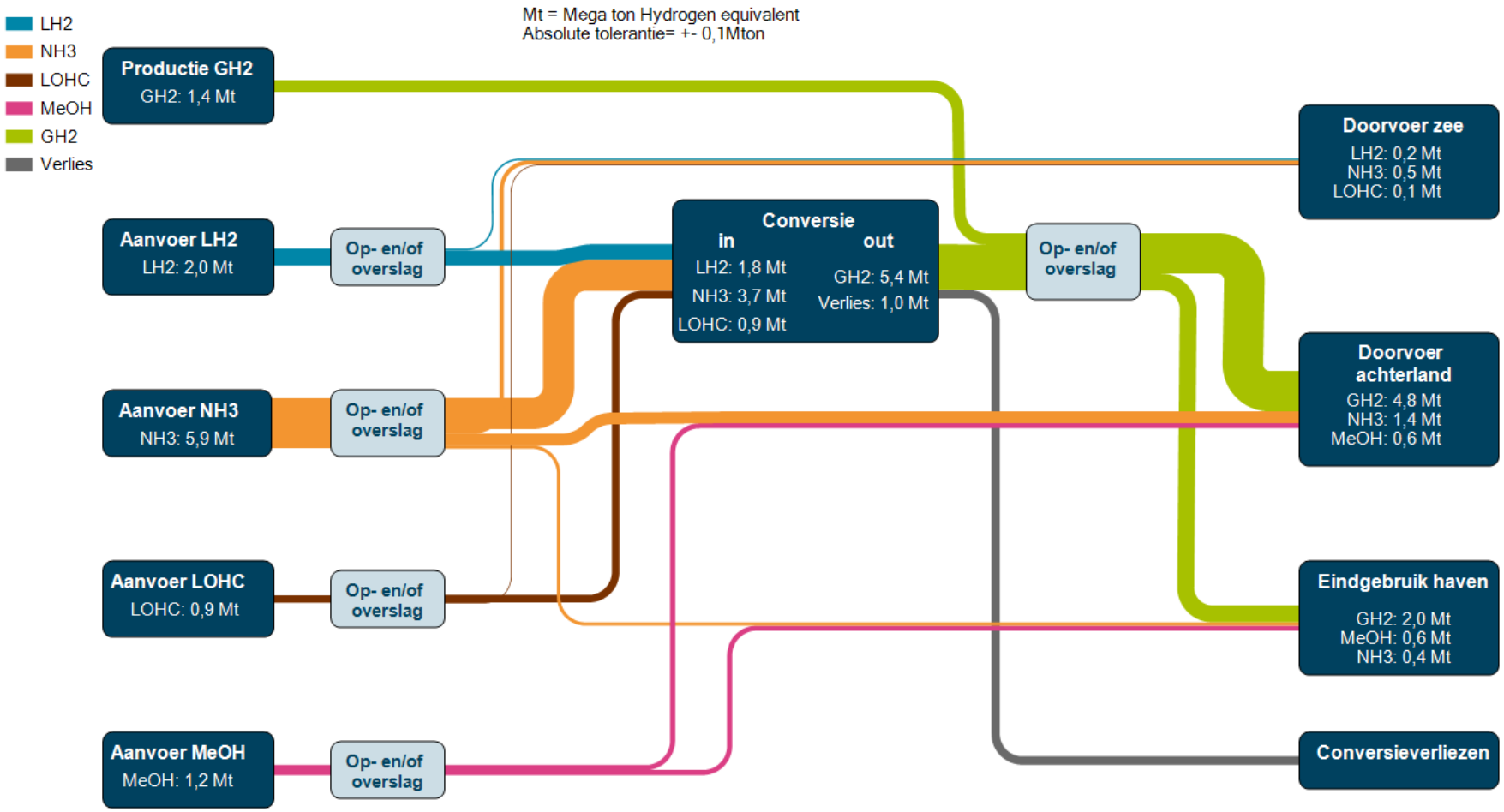
Scenario 1b: 2030
Duurzame hubfunctie



Figuur 6 Sankey-diagram scenario 1b Duurzame hubfunctie in 2030

Royal HaskoningDHV

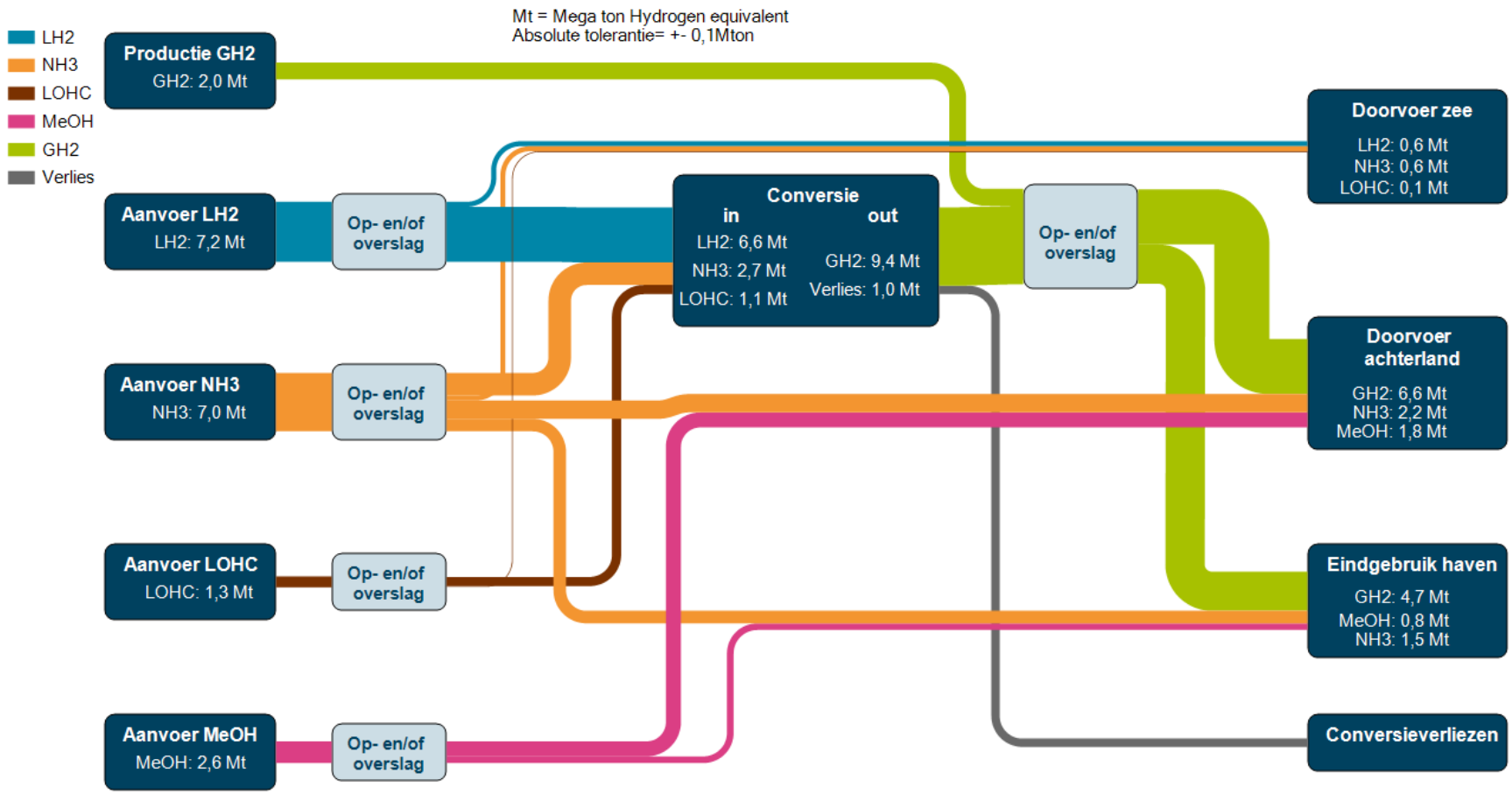
Scenario 1b: 2040
Duurzame hubfunctie



Figuur 7 Sankey-diagram scenario 1b Duurzame hubfunctie in 2040

Royal HaskoningDHV

Scenario 1b: 2050
Duurzame hubfunctie



Figuur 8 Sankey-diagram scenario 1b Duurzame hubfunctie in 2050

4.3 Scenario 2 Circulaire maakhaven

Het scenario *Regional Well-Being* gaat uit van initieel dezelfde beweging als bij Connected Deep Green naar brede welvaart, samenwerking en een klimaatneutrale economie. Rond 2030-35 komt, in dit scenario, een meer regionale focus op *schone en gezonde omgeving.* Er is gematigde economische groei en afname van doorvoer van fossiele brandstoffen. De Europese markt is sterk, met groei in *short sea*. De aandacht voor de kwaliteit van de leefomgeving beïnvloedt het bedrijfsleven in Noordwest-Europa.

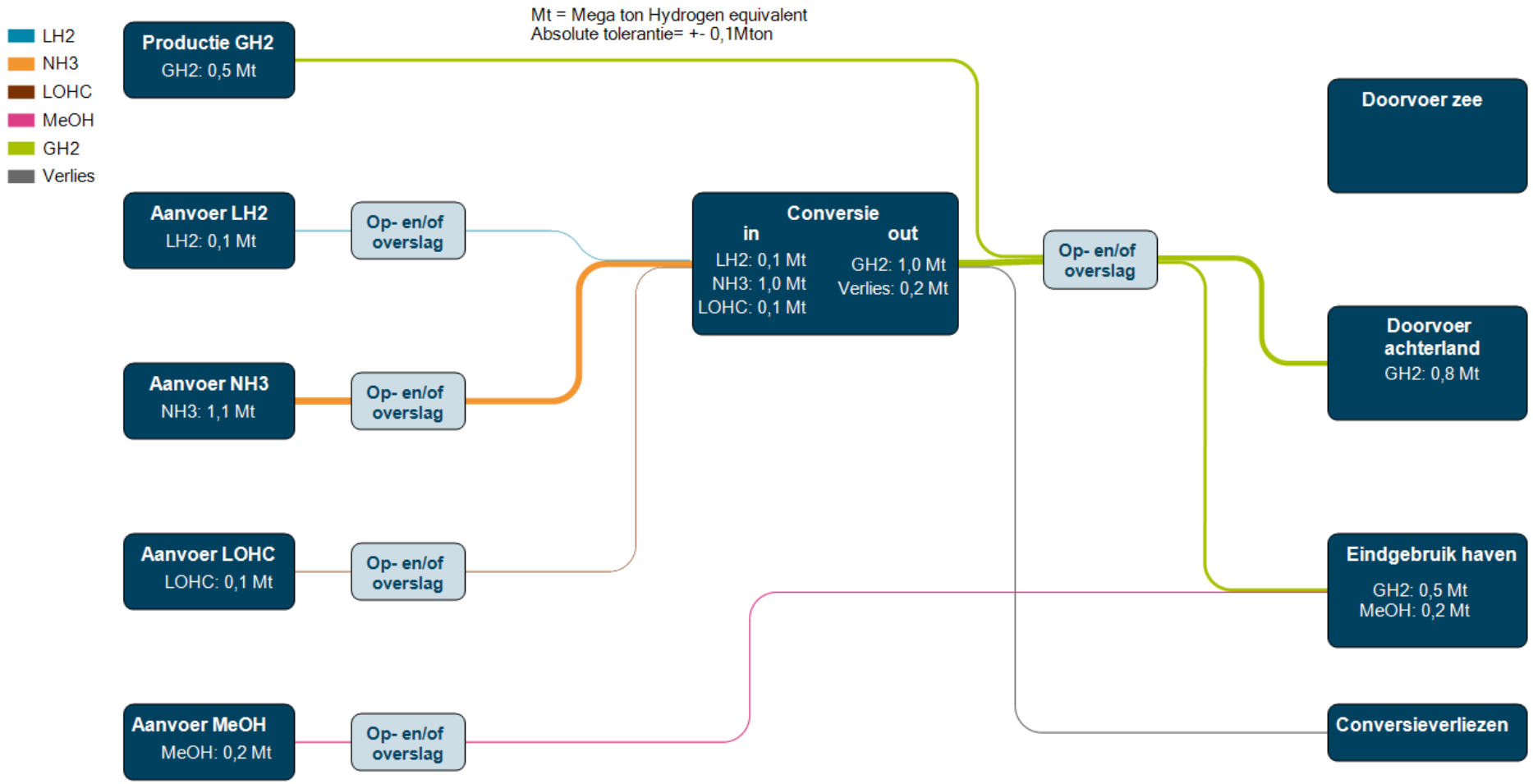
In dit scenario zijn alle ontwikkelingen in de waterstofketen vergelijkbaar van aard met het scenario Connected Deep Green, maar met kleinere volumes en een groter aandeel LOHC's. Het totaal van productie en aanvoer over alle dragers bedraagt 8,3 Mtpa in 2050, en doorvoer naar het achterland komt op 4,8 Mtpa (geheel gasvormige waterstof).

Tot slot is er in de haven een **eindgebruik** van gasvormige waterstof, ammoniak en methanol, met een totaal van 2,3 Mtpa. In dit scenario wordt het grootste deel van de waterstofdragers gebruikt voor maritieme bunkerbrandstof en elektriciteitsproductie.

De gehele waterstofketen in dit scenario voor 2030, 2040 en 2050 is weergegeven in onderstaande Sankeys, Figuur 9 t/m Figuur 11.

Royal HaskoningDHV

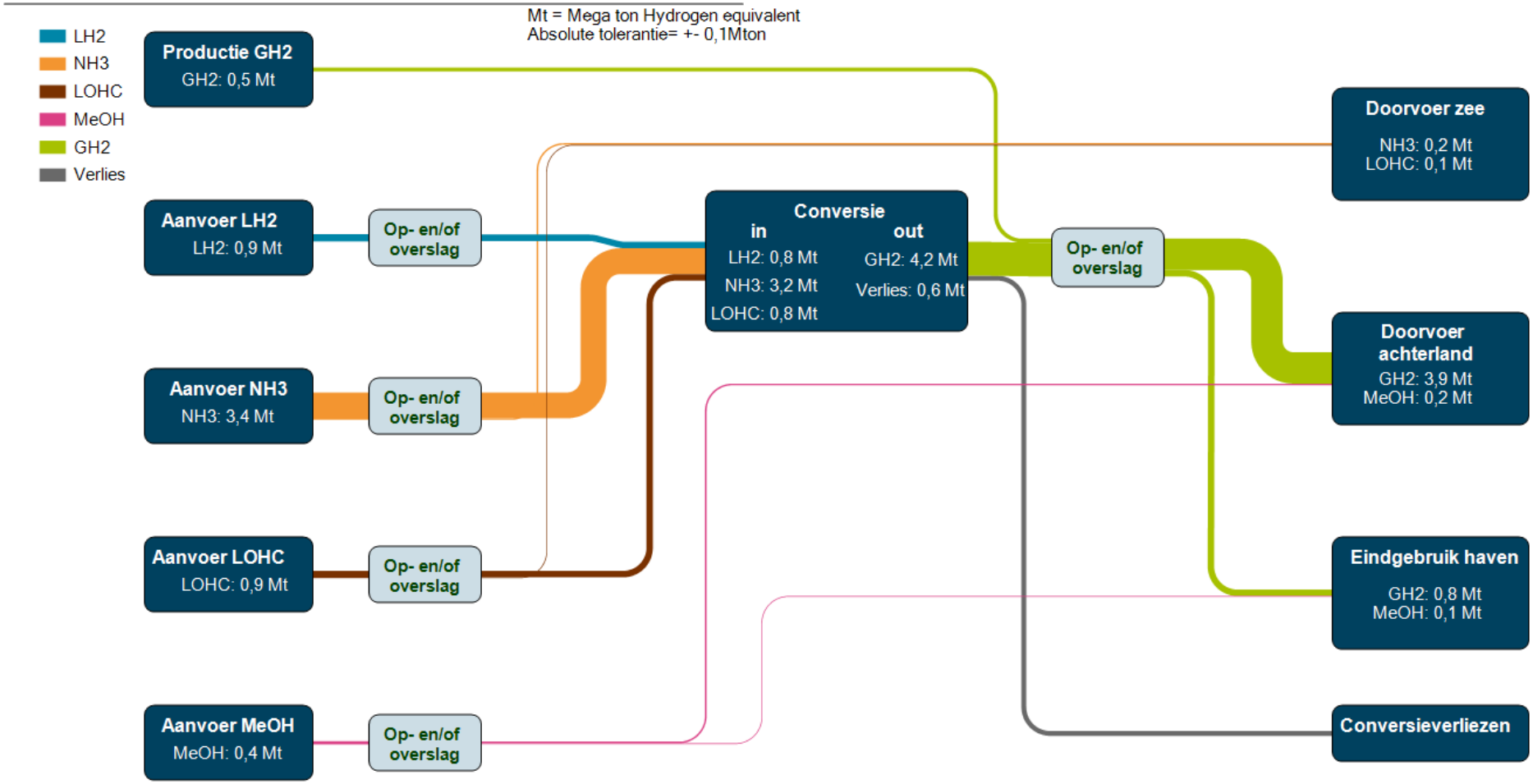
Scenario 2: 2030
Circulaire maakhaven



Figuur 9 Sankey-diagram Scenario 2 Circulaire maakhaven in 2030

Royal HaskoningDHV

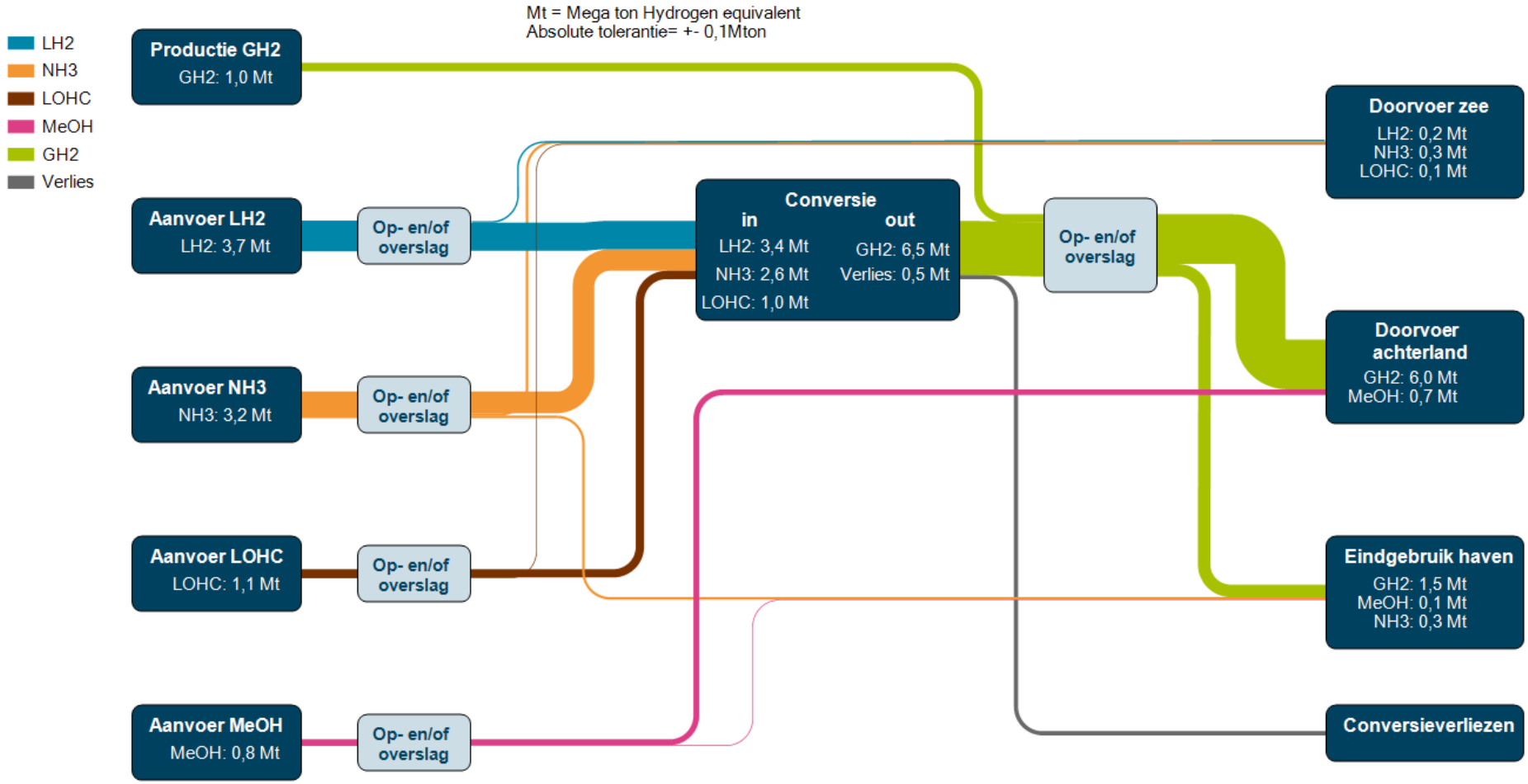
Scenario 2: 2040
Circulaire maakhaven



Figuur 10 Sankey-diagram Scenario 2 Circulaire maakhaven in 2040

Royal HaskoningDHV

Scenario 2: 2050
Circulaire maakhaven



Figuur 11 Sankey-diagram scenario 2 Circulaire maakhaven in 2050

4.4 Scenario 3 Haven in de metropool

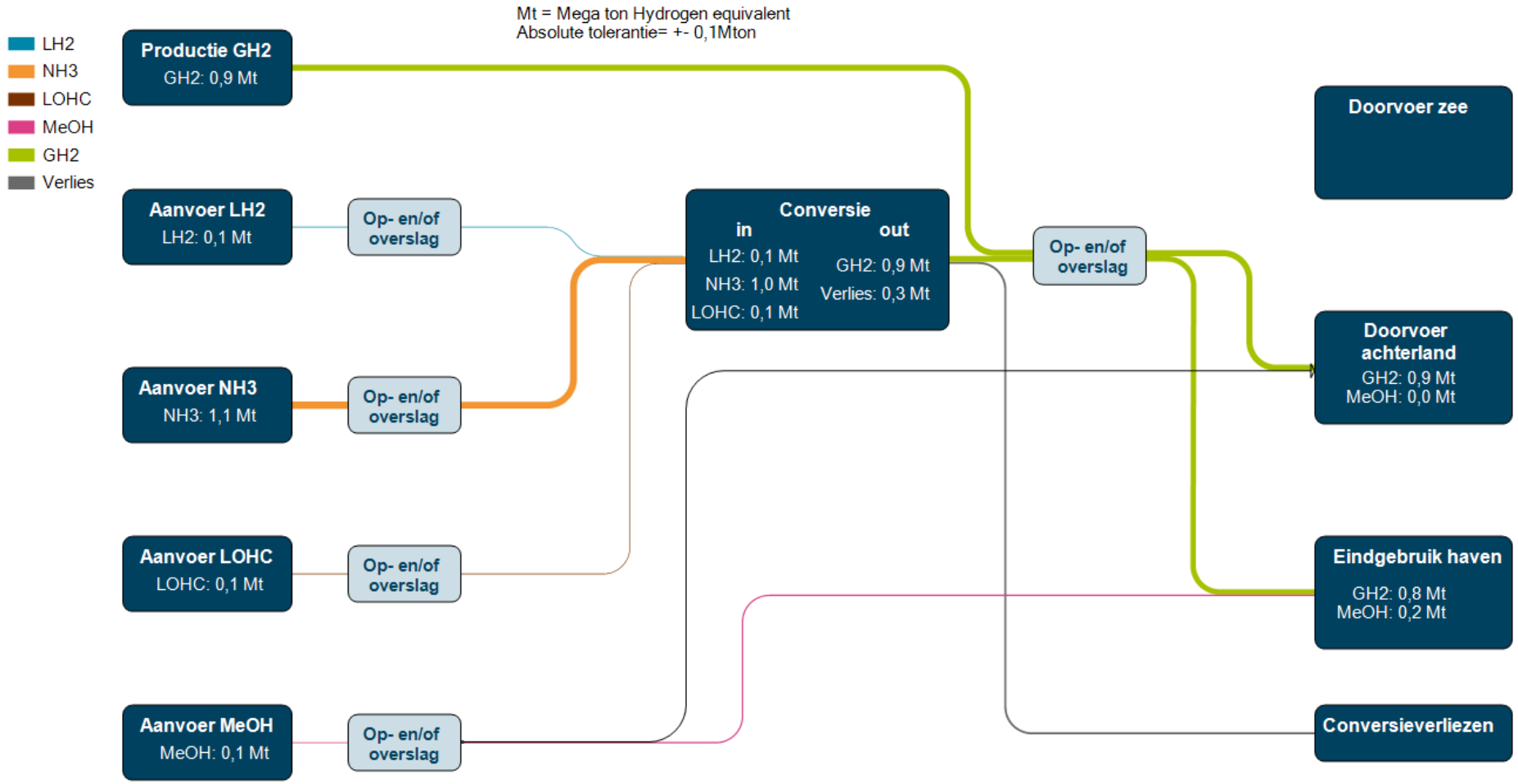
Dit scenario gaat uit van geopolitieke spanningen en een focus op financiële welvaart en protectionisme. Er is lage economische groei en geen wereldwijde klimaatneutraliteit voor 2100. Er is een terugval in doorvoer van energiestromen (olie) en op vracht, mede door *reshoring* en *nearshoring*. De volumes van de waterstofketen blijven hier het laagst van alle scenario's. Daarnaast wordt in dit scenario niet uitgegaan van een keten voor LOHC's. Het totaal van productie en aanvoer komt tot 5,6 Mtpa in 2050 en doorvoer naar het achterland tot 3,7 Mtpa (geheel gasvormige waterstof).

Tot slot is er in de haven een **eindgebruik** van gasvormige waterstof, ammoniak en methanol, met een totaal van 1,2 Mtpa. In dit scenario wordt het grootste deel van de waterstofdragers gebruikt voor maritieme bunkerbrandstof, productie van duurzame brandstoffen (zoals SAF) en voor elektriciteitsproductie.

De gehele waterstofketen in dit scenario voor 2030, 2040 en 2050 is weergegeven in onderstaande Sankeys, Figuur 12 t/m Figuur 14.

Royal HaskoningDHV

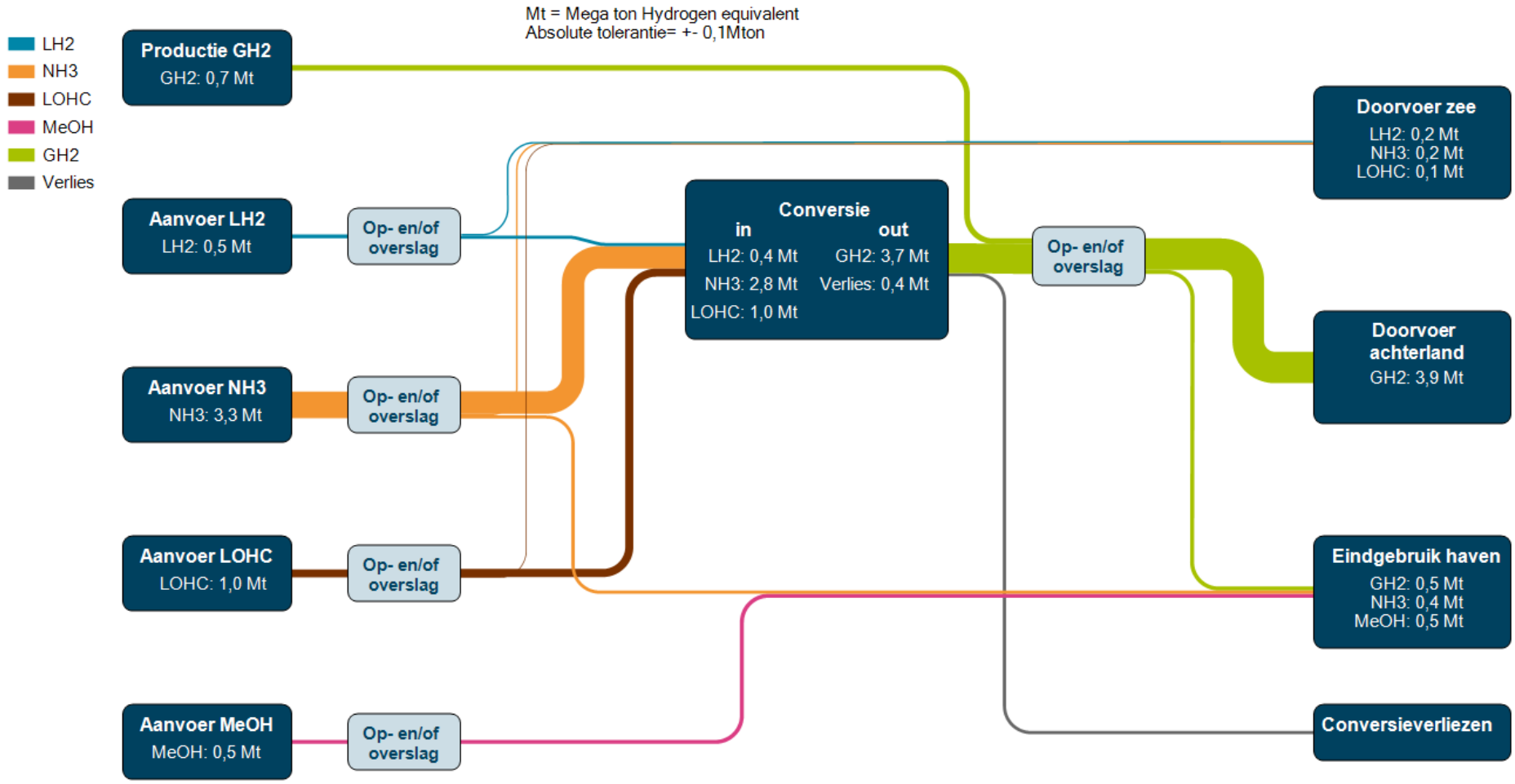
Scenario 3: 2030
Haven in de metropool



Figuur 12 Sankey-diagram Scenario 3 Haven in de metropool in 2030

Royal HaskoningDHV

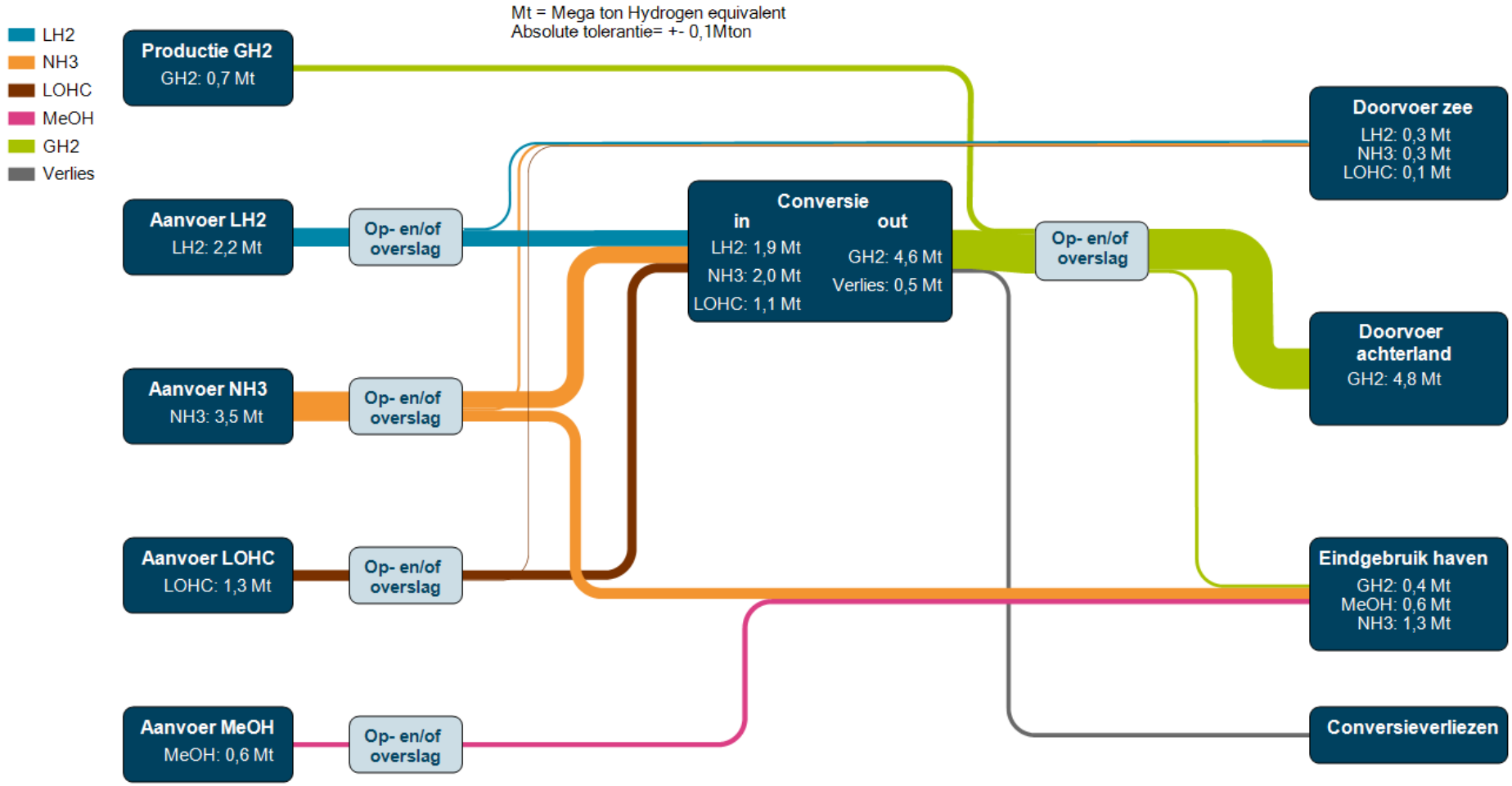
Scenario 3: 2040
Haven in de metropool



Figuur 13 Sankey-diagram Scenario 3 Haven in de metropool in 2040

Royal HaskoningDHV

Scenario 3: 2050
Haven in de metropool



Figuur 14 Sankey-diagram Scenario 3 Haven in de metropool in 2050

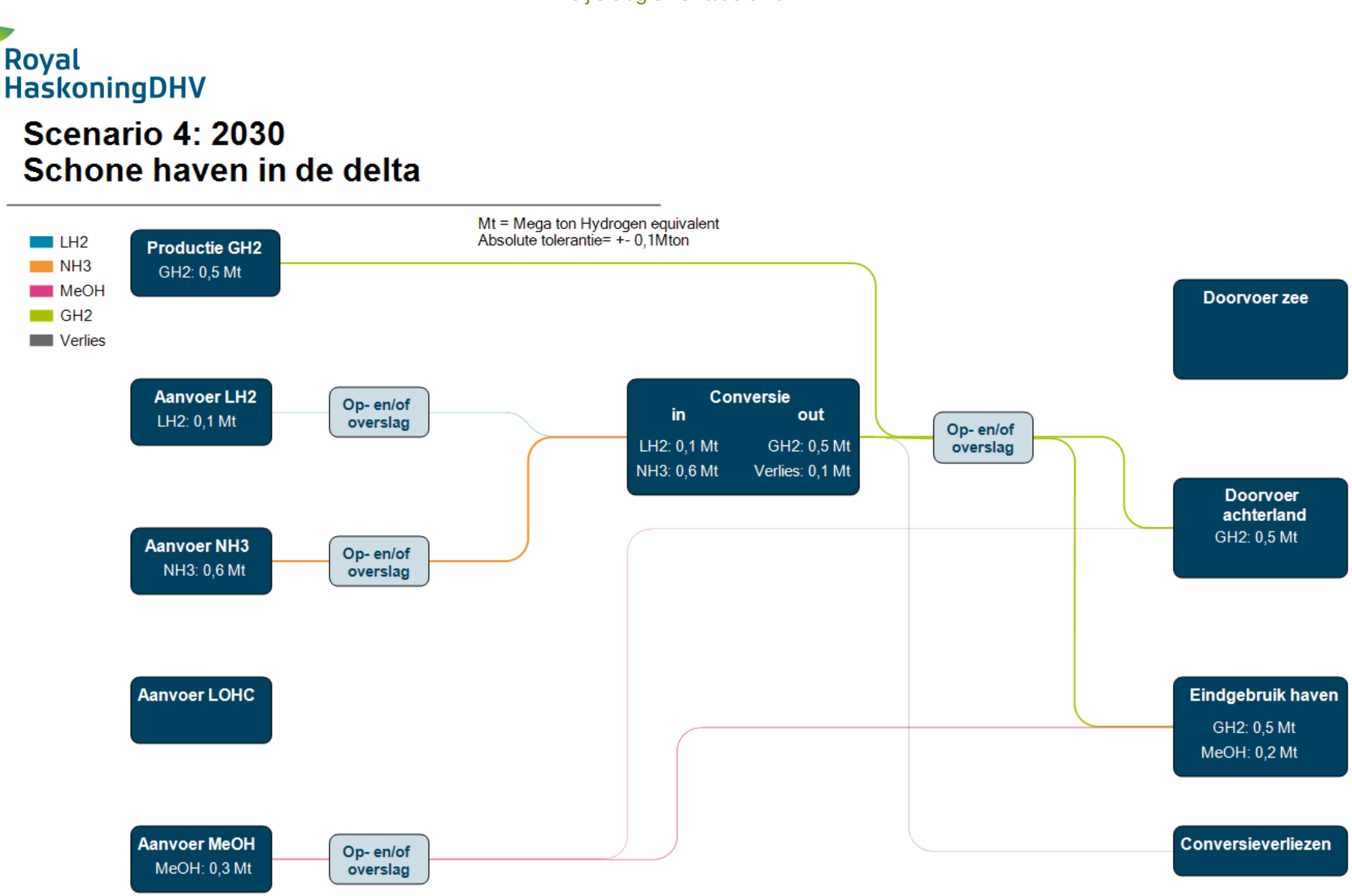
4.5 Scenario 4 Wake-Up Call

Dit scenario gaat eveneens uit van geopolitieke spanningen, maar een kantelpunt in de periode 2030-35 vanwege toenemende zorgen over externe schokken in bijvoorbeeld de voedsel- en energievoorziening. In reactie komen er sterke EU-beleidsmaatregelen en een snelle overgang naar hernieuwbare energie. Er is gematigde economische groei, een verschuiving in consumentengedrag en een toename van investeringen in niet-fossiele brandstoffen.

De volumes van de waterstofketen komen in 2050 in dit scenario uit op een niveau iets boven dat van scenario 2 Regional Well-Being, maar de ontwikkelingen vinden later plaats in de tijd. In 2030 zijn de volumes nog zeer beperkt. In 2040 maakt de waterstofketen een sterke groei door. In 2050 bedraagt het totaal van aanvoer en productie 9,8 Mtpa, en de doorvoer naar het achterland 6,7 Mtpa (6,0 Mtpa gasvormige waterstof en 0,7 Mtpa methanol).

Tot slot is er in de haven een **eindgebruik** van gasvormige waterstof, ammoniak en methanol, met een totaal van 1,9 Mtpa. In dit scenario wordt het grootste deel van de waterstofdragers gebruikt voor maritieme bunkerbrandstof, productie van duurzame brandstoffen (zoals SAF) en voor elektriciteitsproductie.

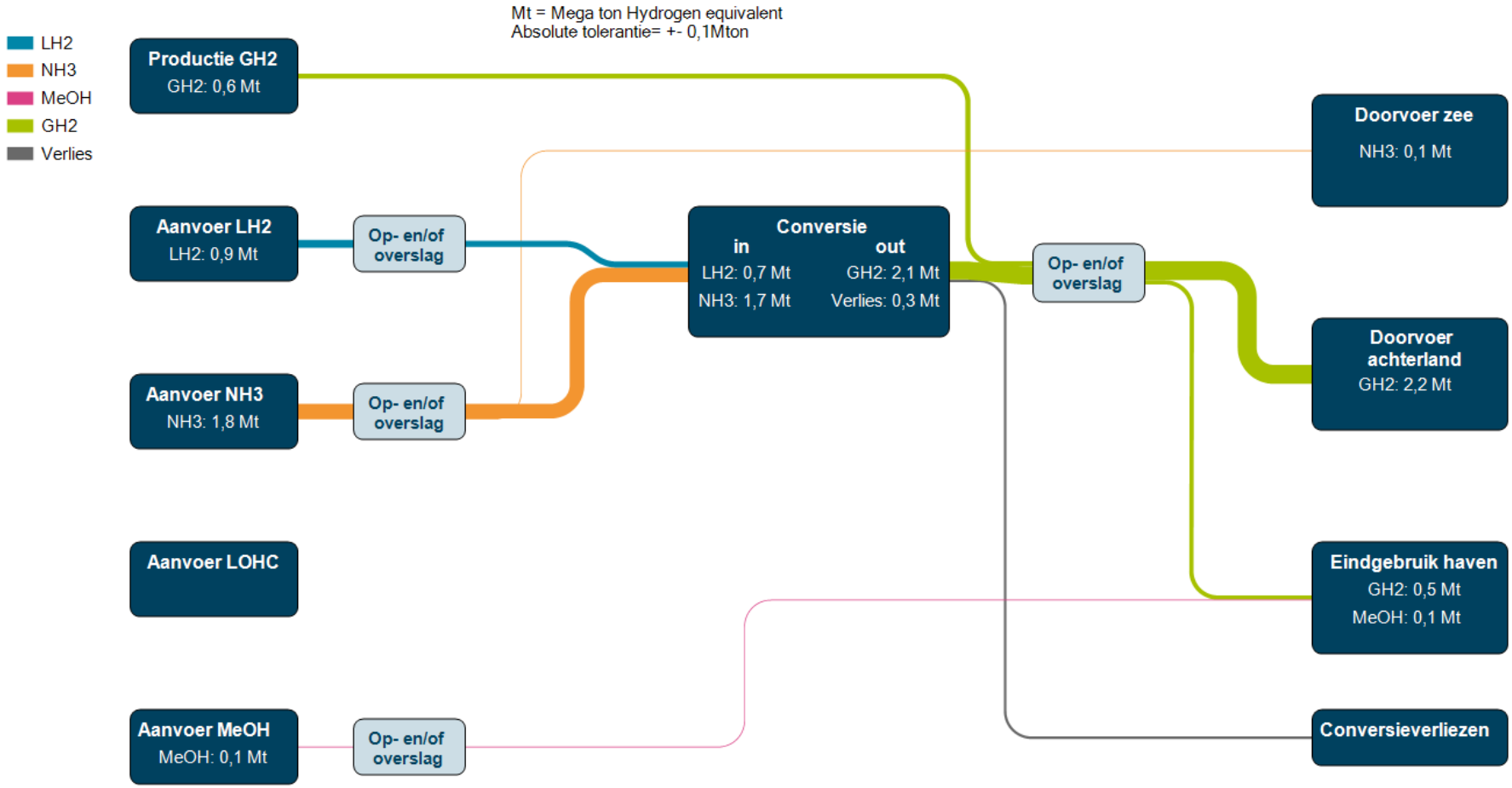
De gehele waterstofketen in dit scenario voor 2030, 2040 en 2050 is weergegeven in onderstaande Sankeys, Figuur 15 t/m Figuur 17.



Figuur 15 Sankey-diagram Scenario 4 Schone haven in de delta in 2030

Royal HaskoningDHV

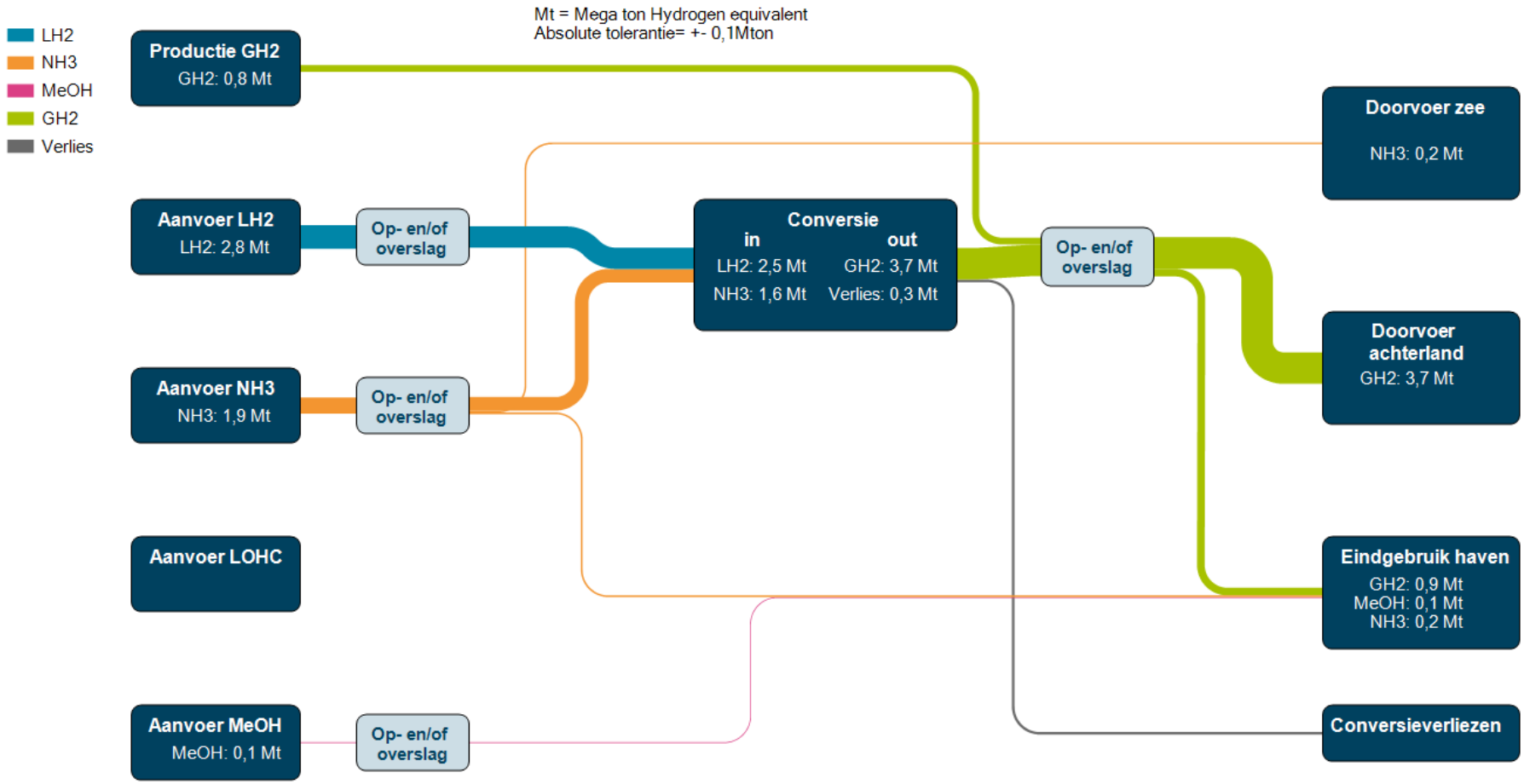
Scenario 4: 2040
Schone haven in de delta



Figuur 16 Sankey-diagram Scenario 4 Schone haven in de delta in 2040

Royal HaskoningDHV

Scenario 4: 2050
Schone haven in de delta



Figuur 17 Sankey-diagram Scenario 4 Schone haven in de delta in 2050

4.6 Bandbreedtes en verdeling binnen havengebied

De scenario's zijn bedoeld om inzicht te bieden in uiteenlopende toekomstontwikkelingen. We kijken hier naar de bandbreedtes[33] die hieruit te halen ze zijn voor 2050 en waar de ontwikkelingen neerslaan binnen het havengebied: Maasvlakte, Europoort, of Botlek-Vondelingenplaat. Deze gegevens combineren we in hoofdstuk 7 met de bedrijven zoals voorgesteld in hoofdstuk 6, om zo uiteindelijk een beeld te geven van de bedrijvigheid die in het HIC zou kunnen ontstaan vanuit de waardeketen: welk type bedrijven, in welke aantallen en in welke groottes.

De bandbreedtes zijn in Tabel 3 en Tabel 4 samengevat. De bandbreedtes van 2030 en 2040. zijn opgenomen in in Bijlage A1 voor

Tabel 3 Bandbreedtes in 2050 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa H2 equivalent).

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2050 H2 equivalent						
Productie	0,7 tot 2,0 (boven 1,0 Mtpa offshore)	-	-	-	-	Mtpa H_2-eq
Overslag	-	2,2 tot 7,2	1,9 tot 6,9	0,1 tot 2,6	0 tot 1,3	Mtpa H_2-eq
Opslag	-	-	0,5 tot 1,7	0 tot 0,7	0 tot 0,3	Mt H_2-eq
Conversie	3,7 tot 11,5 (output)	1,9 tot 6,6 (input)	1,5 tot 4,7 (input)	-	0 tot 1,1 (input)	Mtpa H_2-eq
Doorvoer zee	-	0 tot 0,6	0 tot 0,7	-	0 tot 0,1	Mtpa H_2-eq
Doorvoer achterland	3,7 tot 8,8	-	0 tot 2,2	0 tot 1,8	-	Mtpa H_2-eq
Eindgebruik haven	0,4 tot 4,7	-	0,2 tot 1,5	0,1 tot 0,8	-	Mtpa H_2-eq

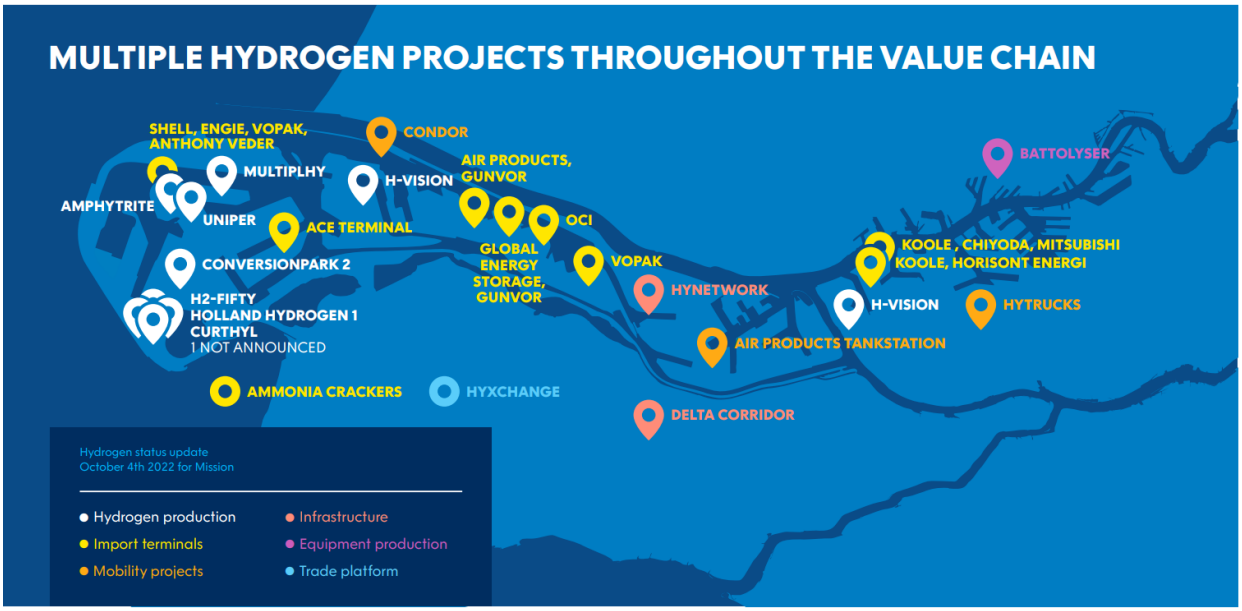
Tabel 4 Bandbreedtes in 2050 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa drager)

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2050 Gewicht drager						
Productie	0,7 tot 2,0 (boven 1,0 Mtpa offshore)	-	-	-	-	Mtpa
Overslag	-	2,2 tot 7,2	12,3 tot 44,5	0,6 tot 15,5	0 tot 21,1	Mtpa
Opslag	-	-	3,2 tot 11,0	0 tot 4,2	0 tot 4,9	Mt
Conversie	3,7 tot 11,5 (output)	1,9 tot 6,6 (input)	9,7 tot 30,3 (input)	-	0 tot 17,8 (input)	Mtpa
Doorvoer zee	-	0 tot 0,6	0 tot 4,5	-	0 tot 1,6	Mtpa
Doorvoer achterland	3,7 tot 8,8	-	0 tot 14,2	0 tot 10,7	-	Mtpa
Eindgebruik haven	0,4 tot 4,7	-	1,3 tot 9,7	0,6 tot 4,8	-	Mtpa

[33] *De laagste waarde komt overeen met het laagste scenario, de hoogste waarde is afkomstig uit het hoogste scenario.*

De bandbreedtes zijn goed vergelijkbaar met de volumes opgegeven in andere studies. Een studie van TNO, Arcadis en Berenschot[34] over ontwikkelingen van waterstofvolumes laat volumes zien voor de aanvoer van verschillende dragers in het havengebied die in lijn liggen met bandbreedtes in de tabel hierboven. Ook de bovengrens van de bandbreedte van geproduceerde waterstof in de haven (horend bij 10 GW elektrolysecapaciteit) is in lijn met de berekende elektrolysecapaciteit in het II3050v2 scenario Nationale sturing in 2050.[35] Ten slotte is de bovengrens van de bandbreedte van doorvoer van waterstof (ongeveer 13 Mton H2-equivalent) vergeleken met de hoogste prognose voor gebruik van waterstof in Nederland in een rapport van TNO (ongeveer 14 Mton H2-equivalent).[36] Aangezien ook doorvoer van waterstof naar Duitsland verwacht wordt, is de bovengrens voor doorvoer van waterstof in dit rapport in lijn met prognoses in andere studies.

Voor de geografische verdeling houden we rekening met de huidige situatie in het havengebied. De eerste projecten met betrekking tot waterstofdragers zijn hier al gestart. Een overzicht van de stand van zaken in 2022 is te zien in Figuur 18. Verwacht wordt dat activiteiten met betrekking tot de aanlanding van wind op zee in combinatie met waterstofproductie zullen plaatsvinden op de Maasvlakte. Daarnaast zullen de ontwikkelingen rondom de import van dragers bij de terminallocaties en de conversie van dragers naar waterstof waarschijnlijk dicht bij de tankopslag plaatsvinden. Verdere inzichten uit milieuverkenningen onder NOVEX of andere studies kunnen later een gewenste of verwachte geografische verdeling specificeren.



Figuur 18: Stand van zaken van waterstofprojecten in het havengebied (2024)[37]

In hoofdstuk 5 bespreken we eerst de implicaties van de scenariodata voor transport naar het achterland. In hoofdstuk 6 geven we invulling aan bedrijven als prototypes voor de verschillende elementen van de waterstofketen, om in hoofdstuk 7 uiteindelijk een beeld te geven van de bedrijvigheid die in het HIC zou kunnen ontstaan vanuit de waardeketen: welk type bedrijven, in welke aantallen en in welke grootes, en waar in het havengebied.

[34] Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers, TNO, Arcadis en Berenschot, 2023
[35] Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's, 2023, Netbeheer Nederland
[36] Hydrogen in the Netherlands, TNO, 2020
[37] Port of Rotterdam developing Europe's Hydrogen Hub | PoR

5 Implicaties voor transport

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de transport naar het achterland. In hoofdstuk 4 zijn de volumes aangegeven voor de verschillende scenario's. Hier worden deze uitgesplitst naar transportmodaliteit: buis, spoor, weg of binnenvaart. Dit is per waterstofdrager uitgewerkt. Er kunnen verschuivingen optreden in vervoerstromen, bijvoorbeeld door vertraging in de ontwikkeling van buisleidingen.

5.1 Gasvormige waterstof

De volumes voor doorvoer naar het achterland van gasvormige waterstof zijn samengevat in Tabel 5. Vrijwel al deze doorvoer zal door buisleidingen gaan.

Tabel 5 Doorvoer van gasvormige waterstof naar het achterland in 2030, 2040 en 2050.

Scenario	2030	2040	2050	
Groene industriehaven	1,2	6,0	8,8	Mtpa H_2
Duurzame hubfunctie	0,5	4,7	6,6	Mtpa H_2
Haven in de metropool	0,9	3,8	4,8	Mtpa H_2
Schone haven in de delta	0,5	2,2	3,7	Mtpa H_2
Circulaire maakhaven	0,8	3,9	6,0	Mtpa H_2

Voor de transportmodaliteiten zijn de volgende overwegingen relevant. Allereerst buisleidingen: in 2030 zal de waterstof backbone in bedrijf komen en in 2032 mogelijk de DRC (als onderdeel van de backbone). Daarnaast is er al een netwerk van Air Liquide aanwezig dat de Rotterdamse haven verbindt met Noord-Frankrijk, weergeven in Figuur 19. De Nederlandse waterstof backbone zou een capaciteit krijgen van 15 GW bij een druk van 30 barg.[38,39] Dit komt neer op ongeveer 4 Mtpa.[40] Gasunie/HNS geeft daarbij aan dat de druk opgevoerd kan worden naar 50 barg en misschien op termijn 66 barg. Bij 50 barg zou de capaciteit (inclusief het DRC tracé) toenemen tot 8,8 Mtpa. De totale capaciteit komt dan in de buurt van het maximale volume voor 2050, waarbij moet worden aangetekend dat niet de gehele backbone zal dienen voor doorvoer van het HIC naar het achterland.

[38] https://www.gasunie.nl/nieuws/gasunie-en-het-klimaatakkoord/$991/$993
[39] https://www.hynetwork.nl/media/bsgefp5v/pressure-specification.pdf
[40] Eigen berekening Royal HaskoningDHV

Figuur 19 Waterstofnetwerk van Hynetwork Gasunie[41]

Transport over spoor is mogelijk met kleine tubetrailers. Dit gaat om zeer beperkte volumes. Dat geldt ook voor transport over de weg. Dit zal met name relevant zijn voor relatief kleine afnemers op locaties die op andere manieren niet goed bereikbaar zijn, zoals een waterstofaggregaat. Transport via binnenvaart is op dit moment niet toegestaan. Dus vrijwel alle gasvormige waterstof voor doorvoer naar het achterland zal door buisleidingen gaan. Dit kan een kwetsbaarheid inhouden voor de eindgebruikers in het achterland, die bij voorkeur meerdere opties hebben voor transport, zodat er bij een verstoring toch continuïteit in de levering is.

5.2 Vloeibare waterstof

In geen van de scenario's is een significant doorvoervolume naar het achterland van vloeibare waterstof voorzien. In de praktijk zal er in beperkte mate transport van vloeibare waterstof over spoor en weg plaatsvinden. Transport via het water met binnenvaarttankers is vooralsnog niet toegestaan.

5.3 Ammoniak

Alleen de variant op scenario "Connected Deep Green met doorvoer ammoniak" behelst doorvoer van ammoniak naar het achterland, met volumes van 4,5 Mtpa (hier: massa van ammoniak, niet in waterstofequivalenten) in 2030, 9 Mtpa in 2040 en 14 Mtpa in 2050 (Tabel 6).

Voor de verdeling over transportwijze zijn twee paden geanalyseerd, namelijk met een buisleiding voor ammoniak in de DRC en een pad zonder. Inmiddels is door het rijk aangegeven dat vooralsnog geen ammoniakleiding in de DRC wordt aangelegd. We nemen aan dat deze buisleiding voor ammoniak, als deze zou worden gerealiseerd, in 2040 in bedrijf zou zijn. Het scenario voorziet al in behoorlijke volumes voor doorvoer in 2030. Dat betekent dat de markt zich eerst op alternatieven moet richten.

[41] Waterstofnetwerk Nederland | Hynetwork

Dat zal vooral de binnenvaart zijn, hierin is op korte termijn rekening gehouden met lage en hoge waterstanden in de Rijn. Ammoniak wordt al jaren via de binnenvaart getransporteerd en er is hiervoor de mogelijkheid om het transport op te schalen tot een capaciteit van 8 tot 10 Mtpa.[42,43] Transport over het spoor en de weg worden ontmoedigd vanwege de hogere risico's. In de kabinetsvisie op waterstofdragers is aangegeven dat, zolang een alternatief ontbreekt, er ruimte is voor vervoer over weg en spoor, als tijdelijke optie dan wel als terugvaloptie. Transport via spoor moet zoveel mogelijk plaatsvinden via de Betuweroute.[44] Vanwege de ontmoediging van transport over spoor, is er aangenomen dat het getransporteerde volume over spoor maximaal 190 kton bedraagt, gebaseerd op data uit 2021[45]. Echter, de initiatieven in de haven kunnen leiden tot meer spoortransport dan hier wordt aangenomen. Een buisleiding zou transport van grote volumes faciliteren,[46] maar de capaciteit van de buis in de DRC is nog niet vastgesteld.[47] Met de optie van transport door een buisleiding is er bovendien de gewenste redundantie voor eindgebruikers. Met meerdere opties voor transport kan er niet alleen continuïteit in de levering worden gerealiseerd, maar ook de beschikbaarheid van waterstof en ammoniak worden vergroot. Omdat een buisleiding niet overal komt te liggen, blijven andere transportmethoden, zoals vrachtwagens, schepen en spoorwegen, nodig om alle afnemers te bereiken.

Tabel 6 Doorvoer van ammoniak naar het achterland in 2030, 2040 en 2050

Met buisleiding	**2030**	**2040**	**2050**	
Buis	-	3,3	7,0	Mtpa NH_3
Spoor	0,2	0,2	0,2	Mtpa NH_3
Weg	0,01	0,01	0,01	Mtpa NH_3
Binnenvaart	4,3	5,6	6,8	Mtpa NH_3

Zonder buisleiding	**2030**	**2040**	**2050**	
Buis	-	-	-	Mtpa NH_3
Spoor	0,2	0,2	0,2	Mtpa NH_3
Weg	0,01	0,01	0,01	Mtpa NH_3
Binnenvaart	4,3	8,8	13,8	Mtpa NH_3

5.4 Methanol

Er is vervoer van methanol naar het achterland in de scenario's Groene industriehaven en Duurzame hubfunctie en Circulaire maakhaven (Tabel 7). We merken op dat er nu ook transport is van methanol: ongeveer 0,3 Mtpa over het spoor en 2,9 Mtpa[48] met binnenvaart (hier: massa van de methanol, niet in waterstofequivalenten).

De cijfers voor 2030 in de scenario's van HbR sluiten niet goed aan op de huidige praktijk. In ieder geval, als de behoefte aan doorvoer van methanol naar het achterland in de toekomst toeneemt, zou dit

[42] *Haalbaarheidsonderzoek Vervoer ammoniak naar het achterland (Royal HaskoningDHV, 2024, niet publiek). Huidig transportvolume is 0,6 Mtpa. Notitie Quick Scan Verkenning Vervoer Gevaarlijke Stoffen (Ecorys, sept 2024, niet publiek)*
[43] *Het is mogelijk om in Europa 20 tot 40 ammoniakschepen bij te bouwen per jaar in serie. Huidige capaciteit per tanker is ca. 1.500 ton, en toekomstige schepen kunnen potentieel tot 4.800 ton ammoniak vervoeren.*
[44] *https://open.overheid.nl/documenten/6fd5d27a-b334-4aa2-b8fc-f0edaad4d832/file*
[45] *Notitie Quick Scan Verkenning Vervoer Gevaarlijke Stoffen (Ecorys, sept 2024, niet publiek)*
[46] *Over de verhoudingen is nog weinig bekend. We hebben hier de aanname gedaan dat in 2050 de helft van de totale behoefte door de buisleiding plaatsvindt, en voor 2040 ongeveer lineaire ingroei voor zowel buis als binnenvaart.*
[47] *Er zijn buisleidingen met een capaciteit van 5 Mtpa over lange afstanden, zie https://ispt.eu/publications/clean-ammonia-roadmap-public-report/*
[48] *Notitie Quick Scan Verkenning Vervoer Gevaarlijke Stoffen (Ecorys, sept 2024, niet publiek)*

voornamelijk via de binnenvaart moeten gebeuren, gezien de voorkeur van de kabinetsvisie voor waterstofdragers. Een buisleiding voor methanol is niet voorzien, omdat de prognoses voor methanol te klein zijn om de aanleg van buisleidingen te kunnen verantwoorden. Er kan wel behoefte zijn bij eindgebruikers aan een extra transportmogelijkheid naast de binnenvaart, ten behoeve van leveringszekerheid.

Tabel 7 Doorvoer van methanol naar het achterland in 2030, 2040 en 2050

Groene industriehaven	**2030**	**2040**	**2050**	
Buis	-	-	-	Mtpa MeOH
Spoor	-	0,3	0,3	Mtpa MeOH
Weg	-	-	-	Mtpa MeOH
Binnenvaart	-	3,7	10,7	Mtpa MeOH

Duurzame hubfunctie (met doorvoer ammoniak)	**2030**	**2040**	**2050**	
Buis	-	-	-	Mtpa MeOH
Spoor	-	0,3	0,3	Mtpa MeOH
Weg	-	-	-	Mtpa MeOH
Binnenvaart	-	3,7	10,7	Mtpa MeOH

Circulaire maakhaven	**2030**	**2040**	**2050**	
Buis	-	-	-	Mtpa MeOH
Spoor	0,05	0,3	0,3	Mtpa MeOH
Weg	-	-	-	Mtpa MeOH
Binnenvaart	0,5	2,3	3,7	Mtpa MeOH

5.5 LOHC's

In geen van de scenario's is een significant doorvoervolume naar het achterland van LOHC's voorzien. Er kunnen stromen van LOHC's naar het achterland ontstaan, bijvoorbeeld naar bedrijven die over warmte op temperatuurniveau beschikken die nodig is om LOHC's te dehydrogeneren. Deze zijn echter niet gekwantificeerd binnen deze studie.

5.6 Brandbreedtes en transportbewegingen

Het transport van waterstofdragers, zowel aanvoer als doorvoer, zal in de toekomst toenemen. De verschillende scenario's voor 2030, 2040 en 2050 laten uiteenlopende volumes zien voor activiteiten met waterstof en waterstofdragers. De modaliteit van de doorvoer – buis, spoor, weg, binnenvaart en zeevaart – kan ook verschillen. Dit is in voorgaande paragrafen uitgewerkt. In Tabel 8 zijn de bandbreedtes weergegeven, in megaton per jaar (massa van de betreffende stof, niet in waterstofequivalenten). Daarna worden hierbij corresponderende transportbewegingen berekend.

Tabel 8 Bandbreedtes van vervoer van waterstofdragers naar het achterland in 2030, 2040 en 2050.

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Buis						
2030	0,5 – 1,2	-	-	-	-	Mtpa
2040	2,2 – 6,0	-	0 – 3,3	-	-	Mtpa
2050	3,7 – 8,8	-	0 – 7,0	-	-	Mtpa
Weg						
2030	-	-	0,01	-	-	Mtpa
2040	-	-	0,01	-	-	Mtpa
2050	-	-	0,01	-	-	Mtpa
Spoor						
2030	-	-	0 – 0,2	-	-	Mtpa
2040	-	-	0 – 0,2	0 – 0,4	-	Mtpa
2050	-	-	0 – 0,2	0 – 1,1	-	Mtpa
Binnenvaart						
2030	-	-	0 – 4,3	-	-	Mtpa
2040	-	-	0 – 8,8	0 – 3,6	-	Mtpa
2050	-	-	0 –13,8	0 – 9,9	-	Mtpa
Zeevaart: import						
2030	-	0,1 – 0,2	3,8 – 8,3	0 – 0,9	0 – 1,6	Mtpa
2040	-	0,5 – 2,0	11,6 – 38,4	0,3 – 7,2	0 – 17,0	Mtpa
2050	-	2,2 – 7,2	12,3 – 45,0	0,5 – 15,3	0 – 20,6	Mtpa
Zeevaart: doorvoer						
2030	-	0 – 0,1	0,2 – 0,8	-	0 – 0,3	Mtpa
2040	-	0,2 – 0,2	0,6 – 3,0	-	0 – 1,1	Mtpa
2050	-	0,3 – 0,6	1,0 – 4,0	-	0 – 2,0	Mtpa

Als de volumes toenemen, vinden meer transportbewegingen plaats. Om het bijbehorende aantal transportbewegingen te berekenen, hanteren we de uitgangspunten zoals hieronder opgegeven. We merken op dat wegtransport niet is meegenomen vanwege de lage totale volumes. Er kunnen voor methanol en ammoniak wel transportbewegingen over de weg plaatsvinden. Ook wijzen we erop dat is gerekend met de capaciteit van bestaande schepen, wagons en trucks. Waar relevant, is aangegeven dat hier ontwikkelingen gaande zijn.

Vloeibare waterstof

- Zeevaart: Tot 2030 zullen vloeibare waterstof carriers een capaciteit van hebben ongeveer 50.000 m^3 , of 3.550 ton per carrier. Op de langere termijn zal de capaciteit meer dan verdrievoudigen, zo ontwikkelt Kawasaki Heavy vloeibare waterstof carriers van 160.000 m^3, of 11.400 ton.

Ammoniak[49]

- Weg: 12,5 ton per truck
- Spoor: 50 tot 60 ton per wagon, ongeveer 20 wagons per trein.
- Binnenvaart: typisch schip nu 1.500 ton vervoerd gewicht, toekomstige schepen mogelijk 4.800 ton vervoerd gewicht. Capaciteit hangt ook sterk af van de waterstand van de rivier.
- Zeevaart: huidige schepen hebben een capaciteit van ongeveer 50.000 ton. Maersk heeft recent tien VLAC's (*very large ammonia carriers*) besteld met een capaciteit van 93.000 m^3, oftewel ruim 62.000 ton koude ammoniak.

Methanol

- Weg: ongeveer 40 ton per truck.
- Spoor: 70 ton per wagon, ongeveer 20 wagons per trein.[50]
- Binnenvaart: de grootste, bestaande methanoltankers voor de binnenvaart hebben een capaciteit van ongeveer 2.500.
- Zeevaart): huidige zeewaardige methanol carriers kunnen ongeveer 40.000 ton methanol vervoeren. Er liggen al ontwerpen klaar voor schepen die 94.800 ton kunnen vervoeren.

LOHC's

- Zeevaart: 50.000 ton per carrier.

Deze uitgangspunten, gecombineerd met de bandbreedtes in de transportvolumes, resulteren in aantallen transportbewegingen per jaar (Tabel 9). Weergegeven zijn de aantallen bewegingen met lading aan boord, de (retour) bewegingen zonder lading of met andere lading zijn niet meegenomen. De maximale doorvoer van ammoniak over binnenvaart is 9.200 schepen op jaarbasis, oftewel meer dan één per uur. De ontwikkeling van grotere schepen is niet meegenomen in dit overzicht om een conservatief beeld te schetsen, maar het is aannemelijk dat de capaciteit van de schepen voor alle dragers drie keer zo groot zullen worden. Hierdoor het mogelijk is om het aantal scheepsbewegingen tot een derde te reduceren.

[49] *Bron van alle ammoniak transportcapaciteiten: Spoor, weg en binnenvaarttransportbedrijven, geïnterviewd voor Haalbaarheidsonderzoek Vervoer ammoniak naar het achterland (Royal HaskoningDHV, 2024, niet publiek).*
[50] *Website van Russische en Chinese wagonbouwers: https://www.uniwagon.com/en/products/tank_cars_for_transportation_of_chemically_active_substances/tank_car_for_transportation_of_methanol_model_15-6880_15-5880-01/ & https://www.crrcgc.cc/en/2016-02/01/article_C1532A11DF13400A934363485B327F51.html*

Tabel 9 Aantallen transportbewegingen per jaar voor verschillende waterstofdragers in 2030, 2040 en 2050

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Spoorbewegingen						
2030	-	-	0 – 190	-	-	Per jaar
2040	-	-	0 – 190	0 – 290	-	Per jaar
2050	-	-	0 – 190	0 – 790	-	Per jaar
Binnenvaart-bewegingen						
2030	-	-	0 – 2900	-	-	Per jaar
2040	-	-	0 – 5900	0 – 1400	-	Per jaar
2050	-	-	0 – 9200	0 – 4000	-	Per jaar
Zeevaart-bewegingen: import						
2030	-	33 – 45	75 – 170	0 – 20	0 – 35	Per jaar
2040	-	142 – 566	240 – 770	5 – 150	0 – 340	Per jaar
2050	-	619 – 2025	250 – 910	10 – 310	0 – 420	Per jaar
Zeevaart-bewegingen: doorvoer						
2030	-	11 – 28	5 – 20	-	0 – 10	Per jaar
2040	-	43 – 58	15 – 60	-	0 – 25	Per jaar
2050	-	75 – 169	20 – 80	-	0 – 40	Per jaar

6 Bedrijven

In dit hoofdstuk geven we een omschrijving van (fictieve) bedrijven voor verschillende onderdelen van de waterstofketen. Ze geven een beeld van het type bedrijvigheid dat in het HIC gevestigd kan worden, en vormen input voor de milieustudie. De omschrijvingen van de (fictieve) bedrijven zijn getoetst bij zowel bedrijven die daadwerkelijk actief zijn in deze sector, als bij de Dienst Centraal Milieubeheer Rijnmond. In hoofdstuk 7 zullen we de bedrijven combineren met de scenariodata uit hoofdstuk 4, zodat uiteindelijk een beeld ontstaat van wat voor bedrijvigheid kan ontstaan, hoeveel en van welke omvang, en waar in het havengebied.

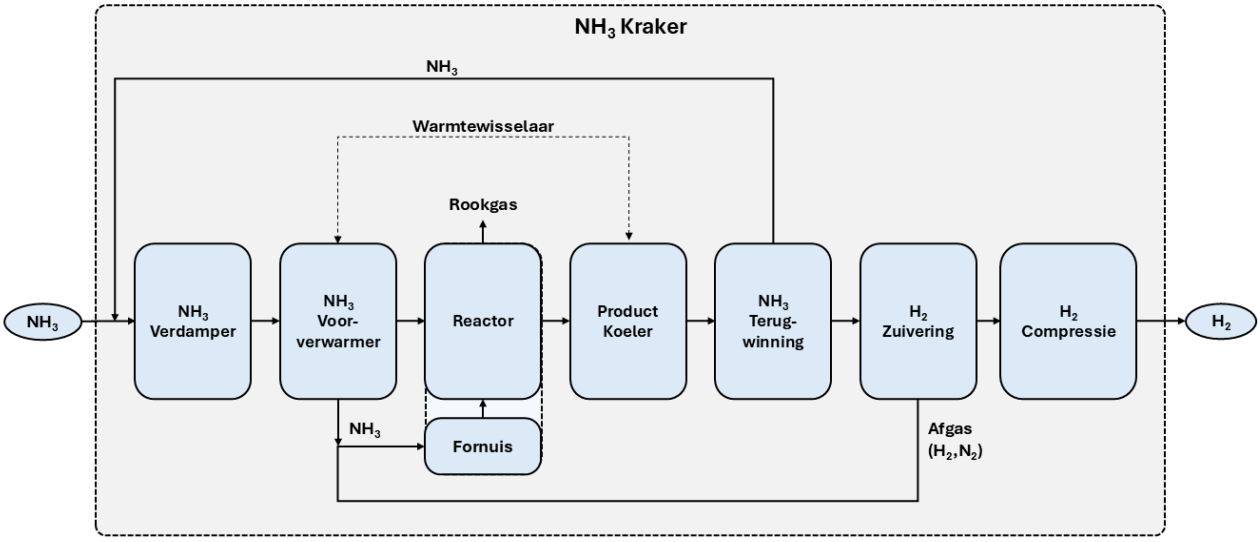
De bedrijven die we bespreken in dit hoofdstuk zijn:
- Ammoniakkraker;
- Elektrolyser;
- Vloeibare waterstofterminal;
- Ammoniakterminal (overslag en opslag);
- LOHC-terminal (inclusief conversie);
- Methanolterminal.

Er is een separate Excel waarin meer data zijn gespecificeerd over de bedrijven ten behoeve van de milieustudie. De omschrijving hier vormt daar een weerslag van.

6.1 Ammoniakkraker

6.1.1 Techniek

Voor het kraken van ammoniak bestaan verschillende technieken, waarvan de meest veelbelovende techniek momenteel het thermokatalytisch kraken is. Andere technieken zijn elektrolyse, fotokatalyse, plasmakatalyse, maar deze technieken zijn nog niet zo ver ontwikkeld. Hier gaan we daarom verder uit van thermokatalytisch kraken. In dit proces wordt ammoniak bij hoge temperaturen afgebroken tot waterstof en stikstof met behulp van een katalysator. In Figuur 20 is een schematische weergave van de belangrijkste stappen van het kraakproces weergegeven. Daarna zijn deze stappen kort toegelicht.



Figuur 20: Schematische weergave NH3 kraakproces

Kraken. De apparatuur bestaat uit een reactor en een fornuis. De reactor is verantwoordelijk voor de splitsing van ammoniak in waterstof en stikstof bij hoge temperaturen (circa 750 °C). In de reactor wordt een katalysator gebruikt om het proces te bevorderen. De meest gebruikte katalysatoren bevatten nikkel. Door consumptie en degradatie moeten de katalysatoren af en toe worden vervangen. Hiervoor wordt langdurige opslag vermeden. De katalysatoren worden op tijd besteld bij de leverancier en vervangen tijdens fabrieksonderhoud. Het fornuis voorziet in hoge temperaturen door het verbranden van ammoniak en afgassen (H_2 en N_2). Mogelijke bijmenging van aardgas met het oog op de maximaal toelaatbare CO_2-uitstoot staat ter discussie. Bij de verbranding van ammoniak en afgassen (of andere brandstoffen) kunnen (di)stikstofoxiden (NO_x, N_2O) ontstaan, mede afhankelijk van de verbrandingscondities. Het is daardoor nodig dat de afgassen van het fornuis worden behandeld in een deNOx installatie. Dit is een installatie waar bij injectie van ammoniak de gevormde (di)stikstofoxides worden omgezet naar stikstof (N_2) en waterdamp (H_2O). Uitgangspunt is dat elke kraakunit een capaciteit heeft van 3 kton NH_3 input per dag, met een bijbehorende output van 0,42 kton H_2 per dag. Een fabriek kan meerdere units bevatten voor een hogere capaciteit.

Verdampen, voorverwarmen en koeling. De apparatuur bestaat uit een warmtewisselaar. Deze wint warmte terug uit de reactieproducten, die wordt gebruikt om nieuw aangevoerde grondstoffen voor te verwarmen voordat ze de reactor in gaan.

NH_3-terugwinning en H_2-zuivering. De apparatuur bestaat uit zuiveringskolommen, inclusief adsorptie-eenheden (*temperature swing adsorption* of *pressure swing adsorption*) en een recirculatiepomp. Deze systemen zorgen ervoor dat de waterstof, stikstof en niet-gereageerde ammoniak van elkaar worden gescheiden. Voor de adsorptiestappen zijn adsorptiemiddelen nodig, essentieel voor het scheiden van verschillende gassen. Door consumptie en degradatie moeten deze middelen af en toe worden vervangen. Hiervoor wordt langdurige opslag vermeden. De adsorptiemiddelen worden op tijd besteld bij de leverancier en vervangen tijdens fabrieksonderhoud. De niet-gereageerde ammoniak wordt teruggevoerd naar de reactor voor maximale efficiëntie. De stikstof wordt geëmitteerd naar de lucht. De waterstof gaat door naar de compressor.

Compressie van ammoniak en waterstof. De apparatuur bestaat uit een compressor. Die comprimeert de ingevoerde ammoniak of geproduceerde waterstof op de gewenste druk voor verdere verwerking, opslag of export.

6.1.2 Uitgangspunten voor het gehele voorbeeldbedrijf

De ammoniakkraker is beschreven voor drie verschillende varianten: klein, middel, groot. De productiecapaciteiten zijn voorgesteld door het Havenbedrijf Rotterdam (HbR) en zijn respectievelijk:

- **500 kton** NH_3 per jaar voor de kleine variant
- **2.000 kton** NH_3 per jaar voor de middelgrote variant
- **5.000 kton** NH_3 per jaar voor de grote variant.

Varianten ingevuld zijn met de procesgegevens van bovenstaande sectie.

- **Aanvoer van ammoniak.** Aangenomen wordt dat de ammoniak via een leiding van een verder in het havengebied liggende ammoniakterminal binnenkomt, waarbij de ammoniak in vloeibare en warme vorm wordt aangevoerd bij een druk van 20 barg.
- **Opslag van ammoniak.** Om de continuïteit van de productie van de onafhankelijke kraakinstallatie te waarborgen, is een gebied ingetekend voor opslag. Hiervoor zijn sferische druktanks (Ø17m) voorzien, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank. Het volume van de buffertank zal zijn afgestemd op de dagelijks benodigde input aan ammoniak plus een extra marge van circa 25%.

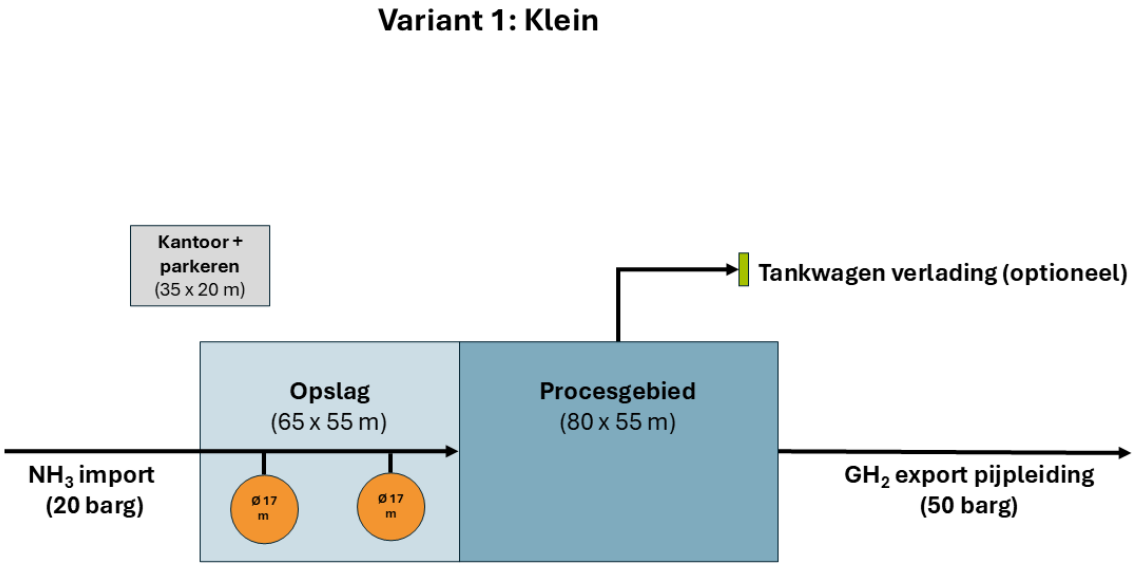
- **Kraker**. Het ingetekende procesgebied is voorzien van de ammoniakkraakinstallatie zoals hierboven beschreven. De grootte hiervan is afhankelijk van de doorvoer capaciteit en is ingeschat op basis van soortgelijke installaties.
- **Afvoer van waterstof**. De geproduceerde gasvormige waterstof wordt op een druk van 50 barg ingevoegd in een waterstofleiding voor verder transport. Daarnaast zou er een installatie voor tankwagenverlading aanwezig kunnen zijn.
- **Kantoorgebouw en parkeerruimte**. Een eerste indicatie voor het kantoorgebouw en parkeerruimte is gegeven op basis van een inschatting van circa 10% van de totale oppervlakte van het opslag- en procesgebied. Een nadere inschatting dient gedaan te worden in relatie tot veiligheidscontouren.

Een aantal aspecten is niet of niet op schaal in de figuur opgenomen, maar zullen ook op een veilige manier een plek moeten krijgen. Het gaat om opslag van katalysatoren, opslag van adsorptiemiddelen, transformatoren voor elektriciteitsvoorziening, noodstroomvoorziening en het kantoorgebouw.

In het geschetste voorbeeld van dit bedrijf wordt uitgegaan van een onafhankelijke ammoniakkraker, gelegen op een redelijke afstand van een ammoniakterminal. In dit scenario wordt de ammoniak in warme vorm aangevoerd via een leidingnetwerk. Daarom is ook voorzien in buffertanks onder druk. Als de ammoniakkraker echter direct naast de ammoniakterminal is geplaatst of een directe leiding heeft, is bufferopslag waarschijnlijk niet nodig.

6.1.3 Variant 1: klein (500 kton NH_3 per jaar)

In variant 1 heeft de kraakfabriek een jaarlijkse doorzet van 500 kton NH_3. Voor deze capaciteit is het mogelijk om de fabriek te laten functioneren met één kraakunit. De bijbehorende jaarlijkse output van waterstof bedraagt 70 kton H_2. In Figuur 21 is een schematische weergave van het terrein van de kraakfabriek voor variant 1 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 8.000 m², waarvan circa 4.400 m² procesgebied en circa 3.600 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee buffertanks van Ø17m, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



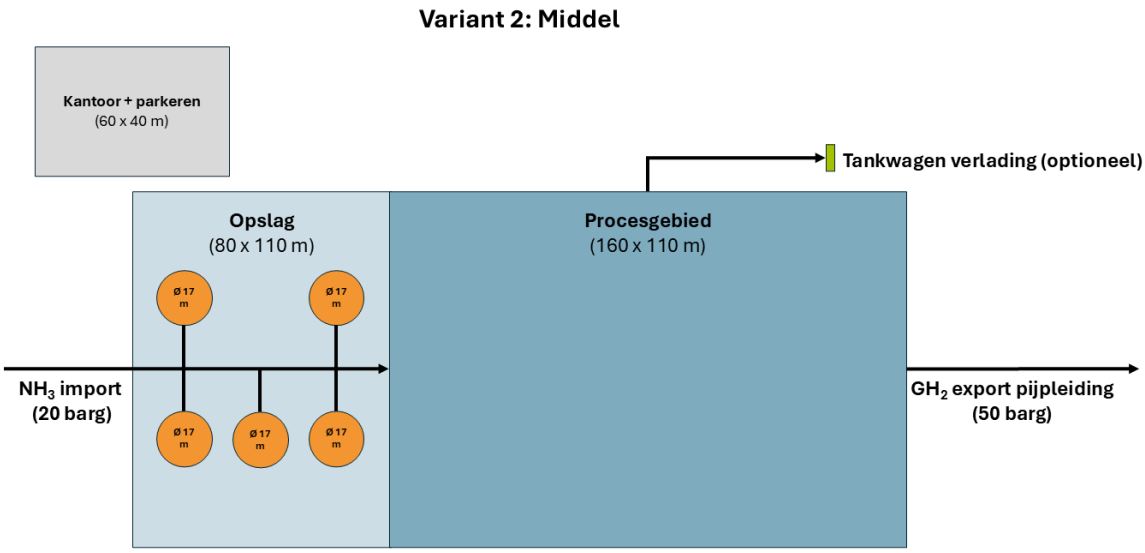
Figuur 21: Schematische weergave terrein kraakinstallatie (variant 1: klein)

Tabel 10: Factsheet Ammoniakkraker (klein)

Parameter	Waarde
Ammoniak doorzet	500 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks van Ø17m
Bruto opslagvolume	5.000 m³ / 3 kton NH_3
Oppervlakte procesgebied	Circa 4.400 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 3.600 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 700 m²

6.1.4 Variant 2: middel (2.000 kton NH_3 per jaar)

In variant 2 heeft de kraakfabriek een jaarlijkse doorzet van 2.000 kton NH_3. Voor deze capaciteit is het nodig om de fabriek te laten functioneren met twee kraakunits. De bijbehorende jaarlijkse output van waterstof bedraagt 280 kton H_2. In Figuur 22 is een schematische weergave van het terrein van de kraakfabriek voor variant 2 te zien. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 27.000 m², waarvan circa 18.000 m² procesgebied en circa 9.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit vijf buffertanks van Ø17m, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



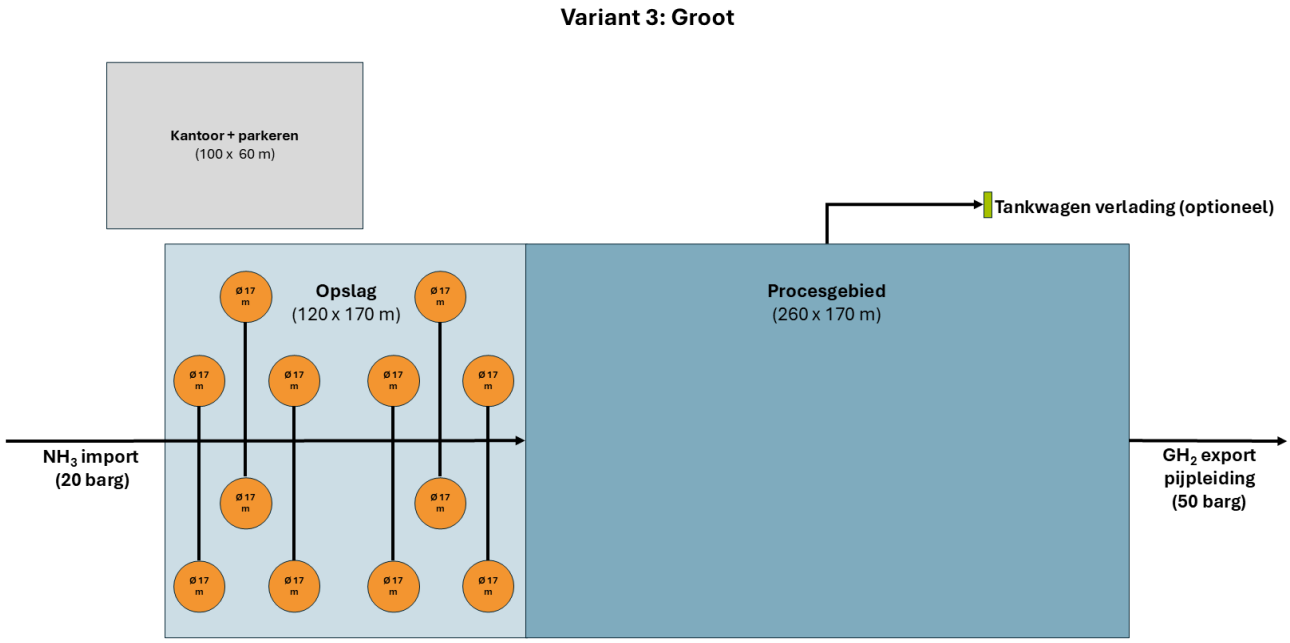
Figuur 22: Schematische weergave terrein kraakinstallatie (variant 2: middel)

Tabel 11: Factsheet Ammoniakkraker (middel)

Parameter	Waarde
Ammoniak doorzet	2.000 kton/jaar
Aantal opslagtanks	5 tanks van Ø17m
Bruto opslagvolume	12.500 m³ / 7 kton NH_3
Oppervlakte procesgebied	Circa 18.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 9.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 2.500 m²

6.1.5 Variant 3: groot (5.000 kton NH_3 per jaar)

In variant 3 heeft de kraakfabriek een jaarlijkse doorzet van 5.000 kton NH_3. Voor deze capaciteit is het nodig om de fabriek te laten functioneren met vijf kraakunits. De bijbehorende jaarlijkse output van waterstof bedraagt 700 kton H_2. In Figuur 23 is een schematische weergave van het terrein van de kraakfabriek voor variant 3 te zien. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 64.000 m², waarvan circa 44.000 m² procesgebied en circa 20.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twaalf buffertanks van Ø17m, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



Figuur 23: Schematische weergave terrein kraakinstallatie (variant 3: groot)

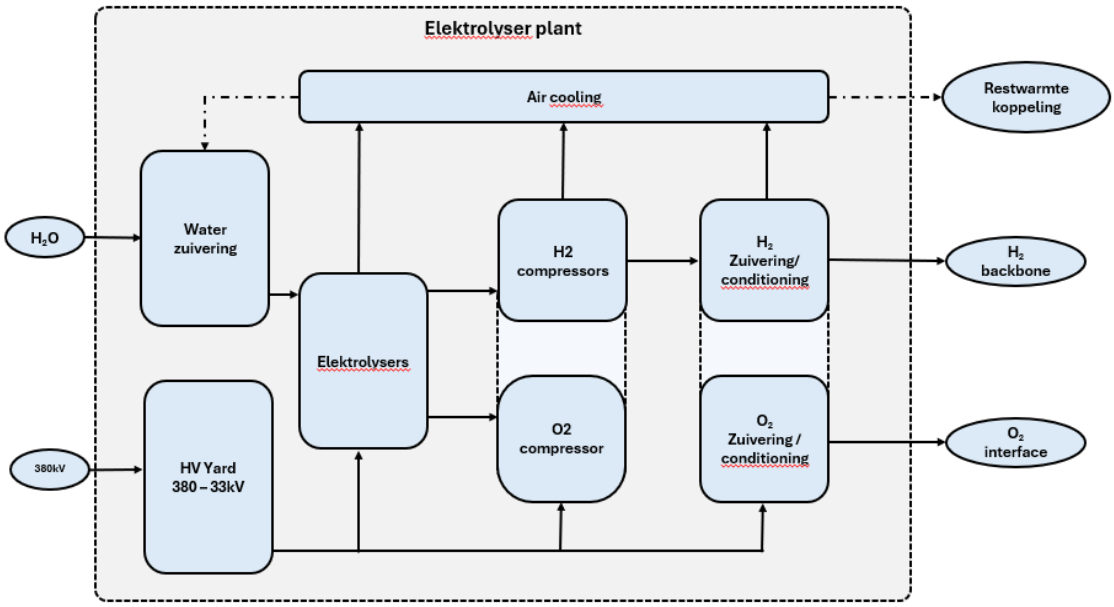
Tabel 12: Factsheet Ammoniakkraker (groot)

Parameter	Waarde
Ammoniak doorzet	5.000 kton/jaar
Aantal opslagtanks	12 tanks van Ø17m
Bruto opslagvolume	30.000 m³ / 18 kton NH_3
Oppervlakte procesgebied	Circa 44.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 20.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 6.000 m²

6.2 Elektrolyser

6.2.1 Elektrolyser technieken

Waterstof elektrolysers zijn apparaten die water (H_2O) splitsen in waterstof (H_2) en zuurstof (O_2) met behulp van elektriciteit. Er zijn verschillende soorten elektrolysers, waaronder de **alkalische elektrolyser** en de **PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolyser**. Alkalische elektrolysers gebruiken een vloeibaar alkalisch elektrolyt, zoals natrium- of kaliumhydroxide, en zijn al lange tijd commercieel beschikbaar. PEM-elektrolysers daarentegen maken gebruik van een polymeermembraan dat alleen waterstofionen doorlaat, wat hen efficiënter maakt en geschikt voor gebruik onder druk. Deze studie gaat uit van alkaline elektrolysers. De keuze moet per project afgewogen worden. Alkaline heeft vaak de voorkeur bij grootschalige waterstof productie met een relatief constante productie door het jaar heen. PEM wordt doorgaans gekozen bij lagere capaciteiten en met een fluctuerend energie aanbod.



Figuur 24 Schematische weergave van de waterstoffabriek

De volgende onderwerpen betreffen de karakteristieken van een waterstoffabriek (elektrolyser):

1. **Water**: Demi- water wordt aangevoerd naar de fabriek. Dit water wordt verder voorbereid voor het elektrolyseproces.
2. **Elektriciteit**: HV-yard is een belangrijke kostenpost. Dit omvat GIS (schakelaar), shunt reactor en substation (spanning niveaus ter indicatie: 380kV, 33kV en 700 V) en de omzetting van wisselstroom naar gelijkstroom (rectifier).
3. **Elektrolysers**: Een industriële waterstofproducent beschikt over een schaalbaar aantal elektrolyserstacks van bijvoorbeeld 10 MW. De productiecapaciteit bepaalt hoeveel stacks parallel worden geïnstalleerd. Het elektrolysergebouw van het voorbeeld bedrijf bevat vijf elektrolyserstacks, wat neerkomt op een totaal van 50 MW per gebouw. De waterstofproductie vindt plaats bij lage druk, wat vooral veiligheidsvoordelen biedt. Hoge druk elektrolysers kunnen de kosten van compressoren en waterstofleidingen verlagen, maar verhogen de kosten van het elektrolysergebouw om het explosieveilig te maken.

4. **H2 Compressoren**: De geproduceerde waterstof wordt gecomprimeerd met behulp van waterstofcompressoren. Dit verhoogt de druk van de waterstof, waardoor deze efficiënter kan worden opgeslagen en getransporteerd. De fabriek heeft meer dan drie compressoren om de waterstof op druk te krijgen, vervolgens nog 3+ booster compressoren om de maximale druk te behalen van het nationale waterstof netwerk (66 bar). Rondom de compressoren is een anti-explosie barrière gebouwd.
5. **O2 Compressoren**: De zuurstof die vrijkomt bij de elektrolyse wordt ook gecomprimeerd. Gecomprimeerde zuurstof kan worden gebruikt voor industriële toepassingen of veilig worden afgevoerd.
6. **Luchtkoeling**: Tijdens het proces komt warmte vrij. Luchtkoeling wordt gebruikt om de temperatuur van de apparatuur en de geproduceerde gassen te reguleren, waardoor de efficiëntie en veiligheid van het systeem worden gewaarborgd. Naast luchtkoeling wordt ook een HVAC (chiller) gebruikt, op basis van ammoniak of ethyleenglycol, om een deel van de koeling te voorzien.
7. **H2 Purificatie**: De waterstof wordt gezuiverd om eventuele resterende onzuiverheden te verwijderen. Dit is belangrijk om te voldoen aan de specificaties voor verschillende toepassingen, zoals brandstofcellen of industriële processen.
8. **Bemetering**: Ten slotte wordt de waterstof gemeten en gecontroleerd voordat deze wordt gedistribueerd. Dit omvat het monitoren van de druk, temperatuur en zuiverheid van de waterstof om ervoor te zorgen dat deze voldoet aan de vereiste normen.

In het kader van de NOVEX systeembeschrijving in het havengebied van Rotterdam, is een bedrijf uitgewerkt dat zich richt op de activiteiten van een waterstof producent. Deze waterstof producent wordt geanalyseerd in drie verschillende varianten: klein, middel en groot. De beschrijving zal helpen bij het begrijpen van de impact en mogelijkheden van waterstof productie binnen de context van de haven van Rotterdam.

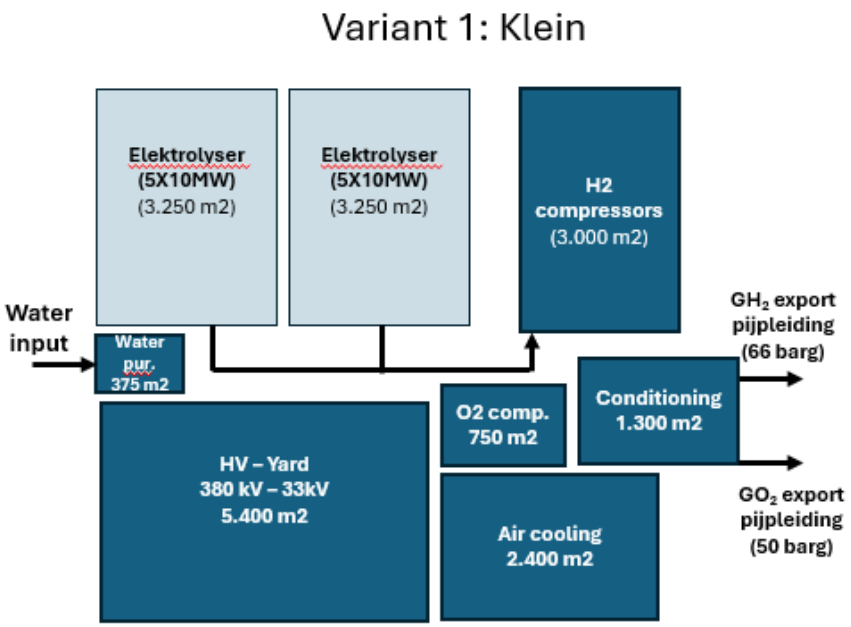
6.2.2 Uitgangspunten voor het gehele bedrijf

De waterstof producent is beschreven voor drie verschillende varianten: klein, middel, groot. De productie capaciteit geldt op basis van 5.000 vollasturen per jaar. De productiecapaciteiten zijn voorgesteld door het Havenbedrijf Rotterdam (HbR) en zijn respectievelijk:

- 9 kton H_2 per jaar voor de kleine variant (100 MW);
- 22,5 kton H_2 per jaar voor de middelgrote variant (250 MW);
- 90 kton H_2 per jaar voor de grote variant. (1.000 MW).

6.2.3 Variant 1: klein (9 kton/j; 100 MW elektrolyser vermogen)

In variant 1 heeft de waterstoffabriek een jaarlijkse output 9 kton H_2 en 72 kton O_2. Voor deze capaciteit is het nodig om de fabriek te laten functioneren met 10 elektrolyser stacks van 10 MW. Voor deze variant is gekozen voor luchtkoeling, met een gesloten koelsysteem. Het oppervlak dat voor de luchtkoeling nodig is 2.400 m^2. De watervraag wordt voorzien door een lokaal waterbedrijf, deze levert demi-water aan. Het demi water wordt in de plant verder gezuiverd. De bijbehorende jaarlijkse elektriciteit vraag is 0,5 TWh op basis van 5.000 vollasturen. De totale netto oppervlakte nodig voor de processen is 19.000 m^2. Voor wegen en ruimte voor leidingen en kabelgoten is een extra 20% aan oppervlakte ingeschat. Er is aangenomen dat de zuurstof wordt afgenomen via buisleiding en dat de waterstof direct op 66 bar wordt ingevoed in het HSN-net. De plant heeft twee flares (waterstof en zuurstof, beide met een veiligheid afstand van 20 meter. In de figuur hieronder is een schematische weergave van het terrein van de waterstoffabriek voor variant 1 te zien.



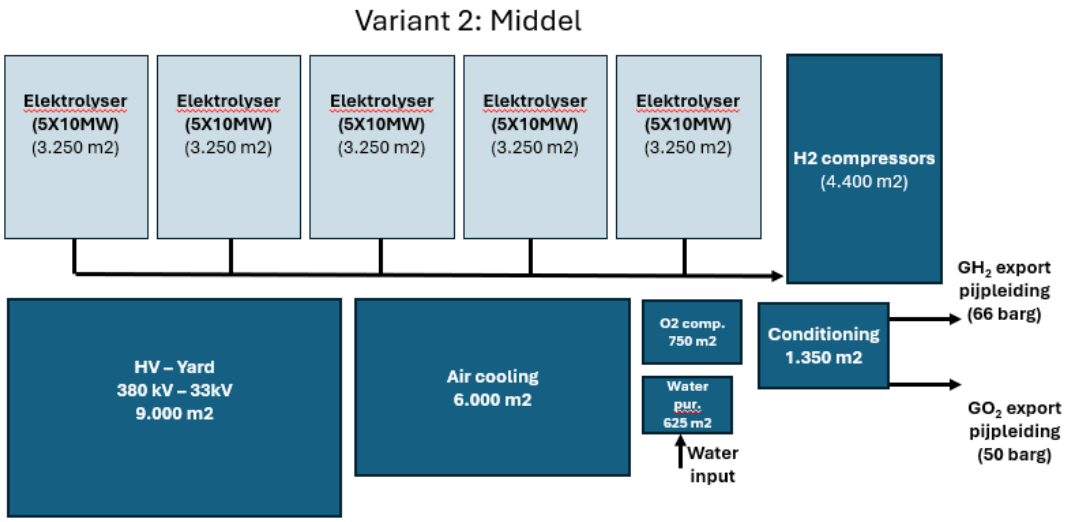
Figuur 25 Schematische weergave terrein elektrolyser (variant 1: klein)

Tabel 13 Factsheet elektrolyser (klein)

Parameter	Waarde
Waterstof doorzet	9 kton/jaar
Zuurstof doorzet	72 kton/jaar
Netto oppervlakte	Circa 19.000 m²
Bruto oppervlakte (+20%)	Circa 23.000 m^2
Demi-water vraag elektrolyser	90.000 m^3/jaar
Optie 1: Drinkwater vraag elektrolyser	100.000 m^3/jaar
Optie 2: Zeewater vraag elektrolyser	200.000 m^3/jaar

6.2.4 Variant 2: middel (22,5 kton/j; 250 MW elektrolyser vermogen)

In variant 2 heeft de waterstof plant een jaarlijkse output van 22,5 kton H_2 en 180 kton O_2. Voor deze capaciteit is het nodig om de fabriek te laten functioneren met 25 elektrolyser stacks van 10MW. Voor deze variant is wederom gekozen voor luchtkoeling, met een gesloten koelsysteem. Het oppervlak dat hiervoor nodig is 6.000 m2. De bijbehorende jaarlijkse elektriciteit vraag is 1,25 TWh op basis van 5.000 vollasturen. De totale netto oppervlakte nodig voor de processen is 36.000 m^2. Voor wegen en ruimte voor leidingen en kabelgoten is een extra 15% aan oppervlakte ingeschat. In de figuur hieronder is een schematische weergave van het terrein van de waterstoffabriek voor variant 2 te zien.



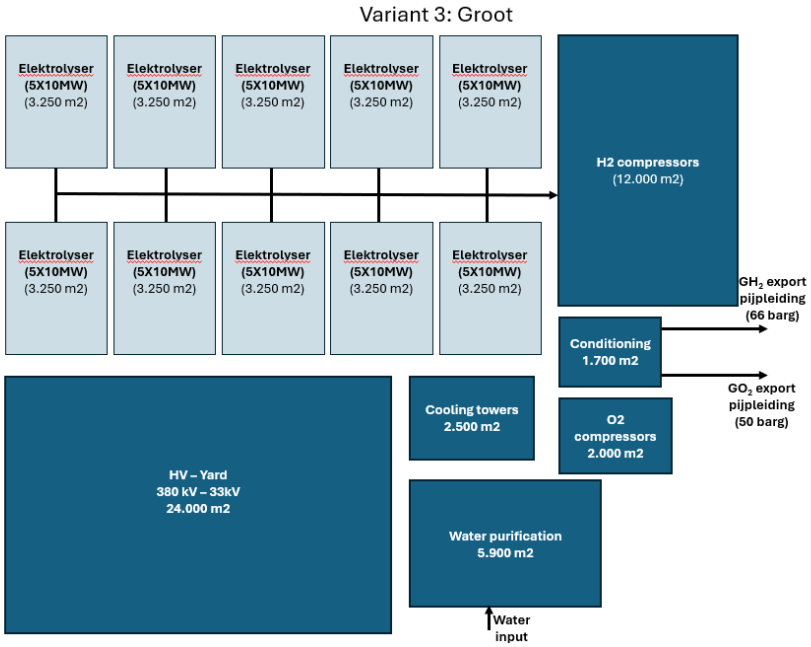
Figuur 26 Schematische weergave terrein elektrolyser (variant 2: middel)

Tabel 14 Factsheet elektrolyser (middel)

Parameter	Waarde
Waterstof doorzet	22,5 kton/jaar
Zuurstof doorzet	180 kton/jaar
Netto oppervlakte	Circa 36.000 m²
Bruto oppervlakte (+15%)	Circa 42.000 m^2
Demi-water vraag elektrolyser	225.000 m^3/jaar
Optie 1: Drinkwater vraag elektrolyser	300.000 m^3/jaar
Optie 2: Zeewater vraag elektrolyser	500.000 m^3/jaar

6.2.5 Variant 3: groot (90 kton/j; 1000 MW elektrolyser vermogen)

In variant 3 heeft de waterstof plant een jaarlijkse output van 90 kton H_2 en 720 kton O_2. Voor deze capaciteit is het nodig om de fabriek te laten functioneren met 100 elektrolyser stacks van 10MW. Voor deze variant zal een gesloten koelsysteem met luchtkoeling een minder relevante toepassing zijn door de ruimte die een luchtgekoelde installatie zou innemen, in plaats daarvan zullen koeltorens gebruikt worden in een gesloten koelsysteem. De watervraag zal sterk toenemen (stijging van meer dan 500%), echter zal het benodigde oppervlakte voor koeling sterk afnemen (van rond de 24.000 m^2 voor luchtkoeling naar 2.500 m^2). Dit is voor de bovenstaande varianten ook een optie als beschikbaar oppervlakte een kritieke ontwerpparameter is. Als zeewater gebruikt wordt (In een open koelsysteem) zal er extra ruimte gereserveerd moeten worden voor een ontziltingsinstallatie, echter gebeurt dit waarschijnlijk op een andere locatie. De bijbehorende jaarlijkse elektriciteit vraag is 5 TWh op basis van 5.000 vollasturen. In Figuur 27 is een schematische weergave van het terrein van de waterstof plant voor variant 3 te zien.



Figuur 27 Schematische weergave terrein elektrolyser (variant 3: groot)

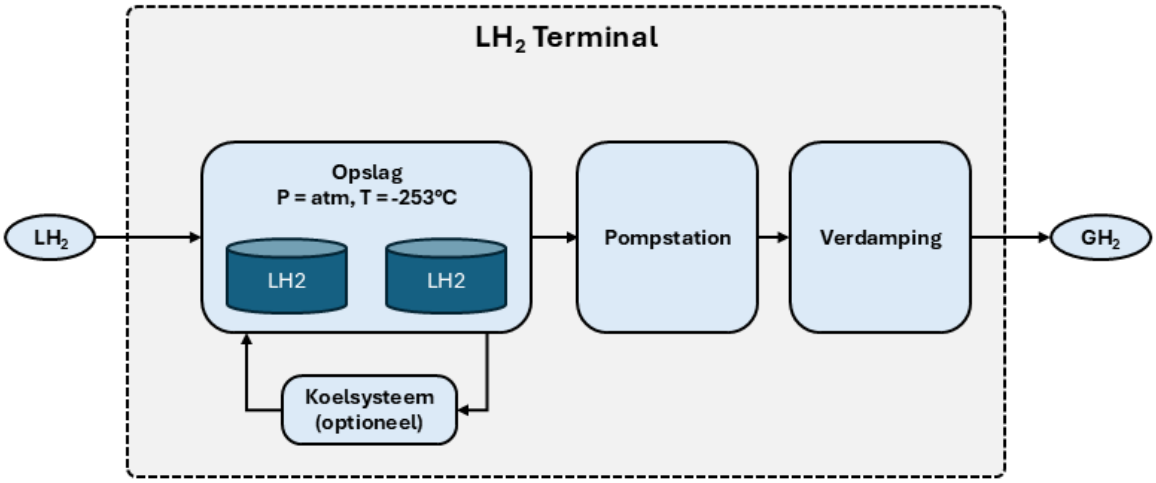
Tabel 15 Factsheet elektrolyser (groot)

Parameter	Waarde
Waterstof doorzet	90 kton/jaar
Zuurstof doorzet	720 kton/jaar
Netto oppervlakte	Circa 104.000 m²
Bruto oppervlakte (+10%)	Circa 125.000 m²
Demi-water vraag elektrolyser	900.000 m^3/jaar
Optie 1: Drinkwater vraag elektrolyser	1.100.000 m^3/jaar
Optie 2: Zeewater vraag elektrolyser	2.000.000 m^3/jaar
Optie 1: Drinkwater vraag Gesloten Koel Systeem	6.000.000 m^3/jaar
Optie 2: Zeewater vraag Open Koel Systeem	10.800.000 m^3/jaar

6.3 Vloeibare waterstofterminal

6.3.1 Techniek

Een LH_2-importterminal is bedoeld om LH_2 te aan te voeren, tijdelijk op te slaan en vervolgens door te voeren. De terminal ontvangt LH_2 via zeeschepen, waarna deze in opslagtanks wordt bewaard. De LH_2 wordt gasvormig gemaakt voor verder transport als gasvormige waterstof (GH_2) of wordt direct doorgevoerd als LH_2. Dit transport kan zowel via buisleiding, tank- of ketelwagens en schepen gebeuren. In Figuur 28 is een schematische weergave gegeven van de LH_2 import terminal. Daarna zijn de belangrijkste stappen kort toegelicht.



Figuur 28: Schematische weergave LH_2 terminal

Import en opslag. De terminal ontvangt LH_2 via zeeschepen, welke de LH_2 in koude en vloeibare vorm aanvoeren. Na het lossen wordt de LH_2 in tanks opgeslagen op de terminal.

Opslag en koelen. Huidige opslag van waterstof gebeurt in onder druk staande bolvormige dubbelwandige tanks bij ongeveer 6 barg en -244°C. Maar verondersteld wordt dat dit in de nabije toekomst zal veranderen naar 'full containment' tanks op atmosferische druk bij -253°C. Dit soort tanks worden verondersteld vergelijkbaar te zijn met huidige LNG-opslag. Tijdens de opslag ontstaat altijd 'boil-off-gas' (BOG). Als dit gas niet ontsnapt, stijgen de druk en de temperatuur in de tank. Kleine hoeveelheden BOG kunnen via een afblaasveiligheidsinstallatie vrijgelaten worden, wat de temperatuur in de tank constant houdt, terwijl bij grootschalige opslag koelsystemen middels koeling en compressie het gas weer vloeibaar maken en terug in de tank pompen. Wanneer wordt uitgegaan van een continue afname van GH_2, is her-liquefiëren niet nodig en kan de BOG direct worden geëxporteerd.

Verdamping en afvoer van GH_2. Eén of meerdere pompen verhogen de druk van de uit de opslag afkomstige LH_2 tot de gewenste druk voor het type beoogde afvoer (bijv. buis, spoor, weg of binnenvaart). Vervolgens wordt de LH_2 middels warmtewisselaars omgezet in GH_2 door het te verwarmen. Hierbij wordt de waterstof verwarmd van -253°C tot temperaturen boven 0°C om bevriezing van procescomponenten te voorkomen en gerelateerde veiligheidsrisico's te verkleinen.

6.3.2 Uitgangspunten voor het gehele voorbeeldbedrijf

De LH_2 terminal is beschreven voor drie verschillende varianten: klein, middel, groot. De capaciteiten zijn voorgesteld door het Havenbedrijf Rotterdam (HbR) en zijn respectievelijk:

- **100 kton** LH_2 per jaar voor de kleine variant;
- **200 kton** LH_2 per jaar voor de middelgrote variant;
- **500 kton** LH_2 per jaar voor de grote variant.

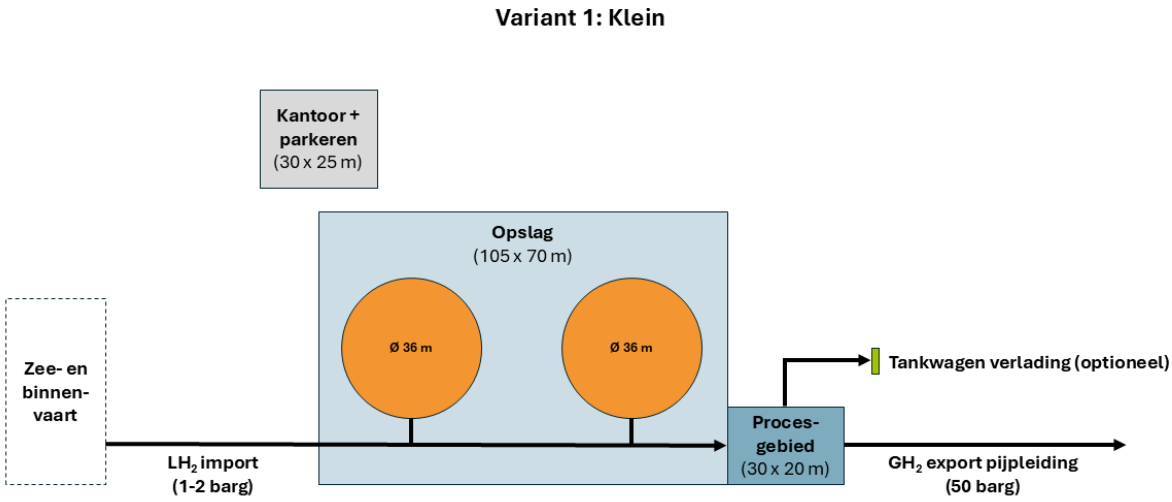
De varianten zijn ingevuld met de procesgegevens van bovenstaande sectie en de volgende uitgangspunten:

- **Aanvoer van LH_2.** Aangenomen wordt dat de LH_2 via zeeschepen binnenkomt, waarbij de LH_2 wordt aangevoerd bij een temperatuur rond -253°C en 1-2 barg.
- **Opslag en koeling van LH_2.** Voor het voorbeeldbedrijf is een opslaggebied ingetekend, waarin de LH_2 wordt opgeslagen. De LH_2 wordt opgeslagen in ‘full containment’ tanks (grootte en aantal tanks afhankelijk van de variant, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank). In het procesgebied is geen koelsysteem voorzien, omdat r wordt uitgegaan van een continue afname van GH_2 en de stroom direct kan worden geëxporteerd.
- **Verdamping en afvoer van LH_2**. Na opslag wordt LH_2 via een pompstation in vloeibare vorm tot een druk van 50 barg gemaakt. Daarna wordt de LH_2 middels warmtewisselaars verdampt en verwarmd tot boven 0°C. Het ingetekende procesgebied is voorzien van het pompstation en de warmtewisselaars. De grootte hiervan is afhankelijk van de doorvoer capaciteit en is ingeschat op basis van soortgelijke installaties. Na verdamping wordt de GH_2 ingevoed in een transportleiding. Daarnaast is er een optie voor vrachtwagenverlading opgenomen, hoewel deze in de huidige varianten niet verder is uitgewerkt. Andere verladingopties, zoals per spoor of binnenvaart, kunnen ook worden gerealiseerd, afhankelijk van de vraag.
- **Kantoorgebouw en parkeerruimte**. Een eerste indicatie voor het kantoorgebouw en parkeerruimte is gegeven op basis van een inschatting van circa 10% van de totale oppervlakte van het opslag- en procesgebied. Een nadere inschatting dient gedaan te worden in relatie tot het veilig inpassen van deze activiteiten.

Een aantal aspecten is niet, of niet op schaal, in de figuur opgenomen, maar zullen ook op een veilige manier een plek moeten krijgen. Het gaat om de aanlegplaatsen voor zee- en binnenvaart, transformatoren voor elektriciteitsvoorziening, noodstroomvoorziening en het kantoorgebouw.

6.3.3 Variant 1: klein (100 kton LH_2 per jaar)

In variant 1 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 100 kton LH_2. In Figuur 29 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 1 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 8.000 m², waarvan circa 600 m² procesgebied en circa 7.400 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'full containment' tanks (Ø36m, hoogte 20m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



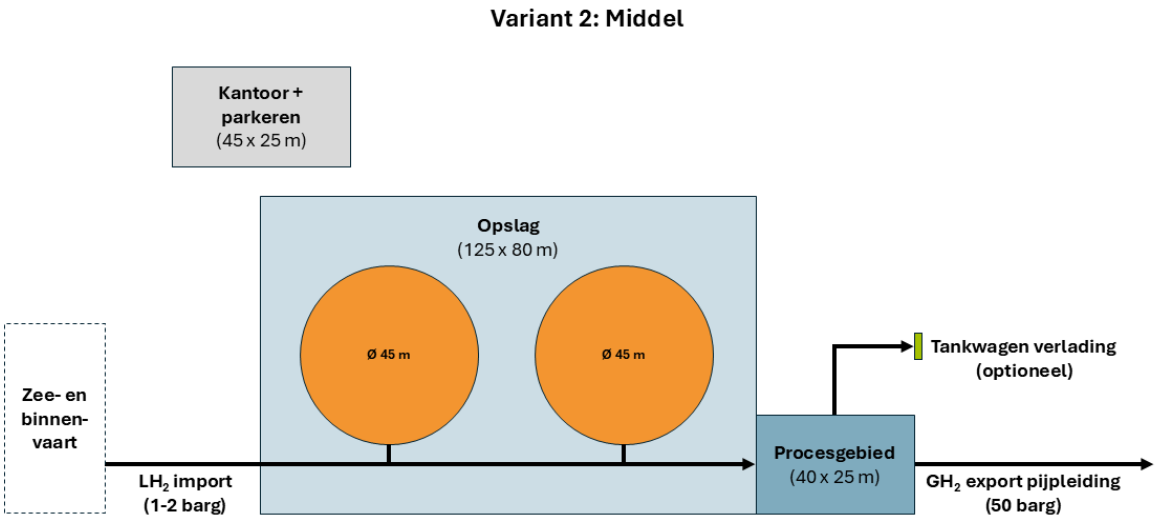
Figuur 29: Schematische weergave terrein LH_2 terminal (variant 1: klein)

Tabel 16: Factsheet LH_2 terminal (klein)

Parameter	Waarde
LH_2 doorvoer	100 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø36m, 20m hoog)
Bruto opslagvolume	40.000 m³ / 3 kton LH_2
Oppervlakte procesgebied	Circa 600 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 7.400 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 800 m²

6.3.4 Variant 2: middel (200 kton LH_2 per jaar)

In variant 2 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 200 kton LH_2. In Figuur 30 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 2 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 11.000 m², waarvan circa 1.000 m² procesgebied en circa 10.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'full containment' tanks (Ø45m, hoogte 25m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



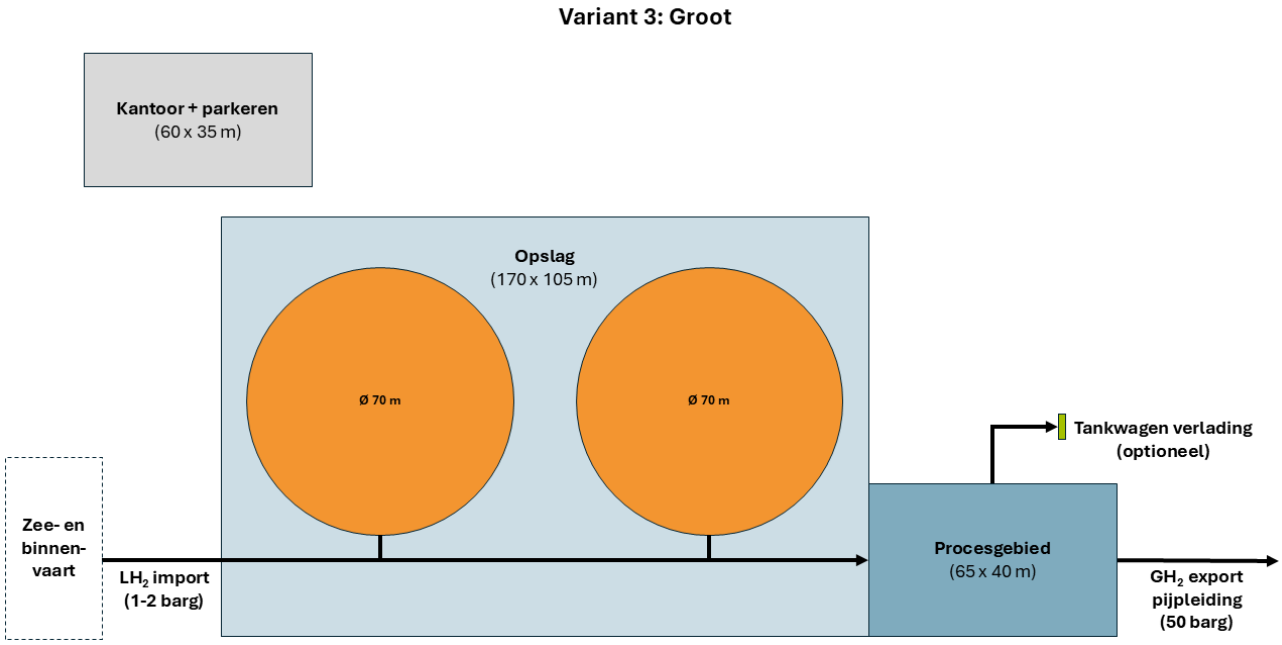
Figuur 30: Schematische weergave terrein LH_2 terminal (variant 2: middel)

Tabel 17: Factsheet LH_2 terminal (variant 2: middel)

Parameter	Waarde
LH_2 doorvoer	200 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø45m, 25m hoog)
Bruto opslagvolume	80.000 m³ / 6 kton LH_2
Oppervlakte procesgebied	Circa 1.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 10.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 1.100 m²

6.3.5 Variant 3: groot (500 kton LH_2 per jaar)

In variant 3 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 500 kton LH_2. In Figuur 31 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 3 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 20.500 m², waarvan circa 2.500 m² procesgebied en circa 18.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'full containment' tanks (Ø70m, hoogte 25m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



Figuur 31: Schematische weergave terrein LH_2 terminal (variant 3: groot)

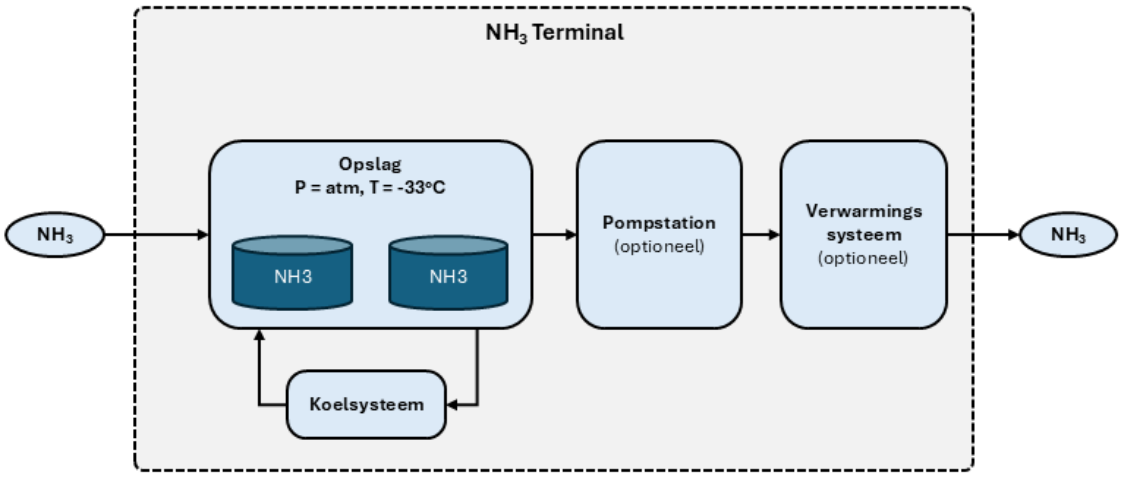
Tabel 18: Factsheet LH_2 terminal (variant 3: groot)

Parameter	Waarde
LH_2 doorvoer	500 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø70m, 25m hoog)
Bruto opslagvolume	190.000 m³ / 13 kton LH_2
Oppervlakte procesgebied	Circa 2.500 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 18.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 2.100 m²

6.4 Ammoniakterminal (overslag en opslag)

6.4.1 Techniek

Een NH_3-importterminal is bedoeld om NH_3 aan te voeren tijdelijk op te slaan en vervolgens door te voeren. De terminal ontvangt NH_3 via zeeschepen, waarna deze in opslagtanks wordt bewaard. Grootschalig opslaan van NH_3 gebeurt in vloeibare vorm op lage temperatuur. Met een koelsysteem wordt het opgeslagen NH_3 koud gehouden. Vervolgens wordt de NH_3 vanuit de opslag vervoerd voor verder transport. Dit transport kan zowel via buisleiding, tank- of ketelwagens en (binnenvaart)schepen gebeuren. Wanneer de druk of temperatuur moet worden opgevoerd voor een bepaalde transportmethode, kan een pompstation en/of verwarmingssysteem worden gebruikt. In Figuur 32 is een schematische weergave gegeven van de NH_3 import terminal. Daarna zijn de belangrijkste stappen kort toegelicht.



Figuur 32: Schematische weergave NH_3 terminal

Import en opslag. De terminal ontvangt NH_3 via zeeschepen, welke de NH_3 in koude vloeibare vorm aanvoeren. Na het lossen wordt de NH_3 in tanks opgeslagen op de terminal.

Opslag en koelen. Grootschalig opslaan van NH_3 gebeurt in vloeibare vorm op lage temperatuur nabij het kookpunt (-33°C). Door een warmere omgeving ontstaat altijd “boil-off” gas (BOG). Als gevolg van de dampontwikkeling van dit gas, stijgen druk en temperatuur in de tank. Het ontstane BOG wordt afgezogen door compressoren, wat de temperatuur in de tank constant houdt. D.m.v. compressie en koeling wordt dit gas weer vloeibaar gemaakt en teruggevoerd naar de opslagtank.

Druk- en temperatuurverhoging en afvoer van NH_3. Eén of meerdere pompen verhogen de druk van de NH_3 uit de opslag tot de gewenste druk voor het beoogde type export (bijv. buis, spoor, weg of binnenvaart). Indien de temperatuur verhoogd moet worden, bijvoorbeeld voor het beladen van spoorketelwagons of vrachtwagens, wordt de NH_3 verwarmd. Voor het transport naar een buisleiding of binnenvaartschip kan het eveneens nodig zijn om de NH_3 op te warmen. Het opwarmen van NH_3 kan gebeuren met behulp van een warmtewisselaar, eventueel met een drukopslagtank als tussenopslag. In de drukopslagtank kan de temperatuur tot omgevingstemperatuur (bijv. 20°C) worden gebracht, met de bijbehorende druk (20°C = 7,5 barg).

6.4.2 Uitgangspunten voor het gehele voorbeeldbedrijf

De NH_3 terminal is beschreven voor drie verschillende varianten: klein, middel, groot. De capaciteiten zijn voorgesteld door het Havenbedrijf Rotterdam (HbR) en zijn respectievelijk:

- **500 kton** NH_3 per jaar voor de kleine variant;
- **2.000 kton** NH_3 per jaar voor de middelgrote variant;
- **5.000 kton** NH_3 per jaar voor de grote variant.

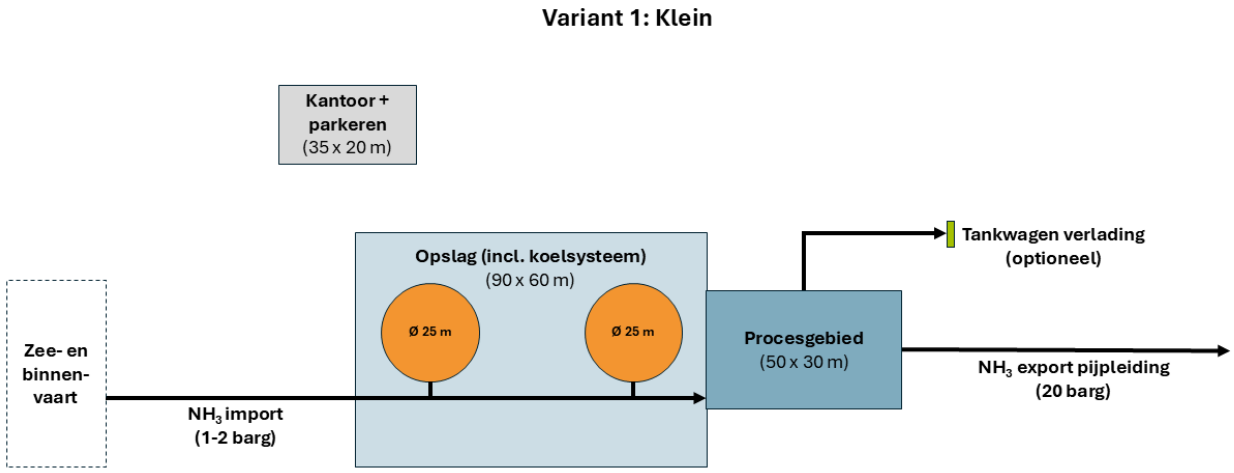
De varianten zijn ingevuld met de procesgegevens van bovenstaande sectie en de volgende uitgangspunten:

- **Aanvoer van NH_3.** Aangenomen wordt dat de NH_3 via zeeschepen binnenkomt, waarbij de NH_3 in koude vloeibare vorm wordt aangevoerd bij een temperatuur rond -33°C onder nagenoeg atmosferische druk. Vanuit het schip wordt de NH_3 verpompt door een laadarm en buisleiding naar de opslagtanks.
- **Opslag en koeling van NH_3.** Voor het voorbeeldbedrijf is een opslaggebied ingetekend, waarin de NH_3 wordt opgeslagen. De NH_3 wordt opgeslagen in reguliere ‘full containment tanks’ (grootte en aantal tanks afhankelijk van de variant, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank). In het procesgebied is ook een koelsysteem voorzien om de BOG te koelen en terug te voeren naar de opslagtanks.
- **Afvoer van NH_3**. Na opslag wordt NH_3 verwarmt en verpompt in warme vloeibare vorm bij een druk van 20 barg en saturatietemperatuur in een transportleiding gepompt. Het ingetekende procesgebied is voorzien van het pompstation en verwarmingssysteem. Daarnaast is er een optie voor vrachtwagenverlading opgenomen, hoewel deze in de huidige varianten niet verder is uitgewerkt. Andere verladingopties, zoals per spoor of binnenvaart, kunnen ook worden gerealiseerd, afhankelijk van de vraag.
- **Kantoorgebouw en parkeerruimte**. Een eerste indicatie voor het kantoorgebouw en parkeerruimte is gegeven op basis van een inschatting van circa 10% van de totale oppervlakte van het opslag- en procesgebied. Een nadere inschatting dient gedaan te worden in relatie tot veiligheidscontouren.

Een aantal aspecten is niet,of niet op schaal in de figuur opgenomen, maar zullen ook op een veilige manier een plek moeten krijgen. Het gaat om de aanlegplaatsen voor zee- en binnenvaart, transformatoren voor elektriciteitsvoorziening, noodstroomvoorziening en het kantoorgebouw (in relatie tot veiligheidscontouren).

6.4.3 Variant 1: klein (500 kton NH_3 per jaar)

In variant 1 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 500 kton NH_3. In Figuur 33 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 1 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 7.000 m², waarvan circa 1.500 m² procesgebied en circa 5.500 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'full containment' tanks (Ø25m, hoogte 30m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



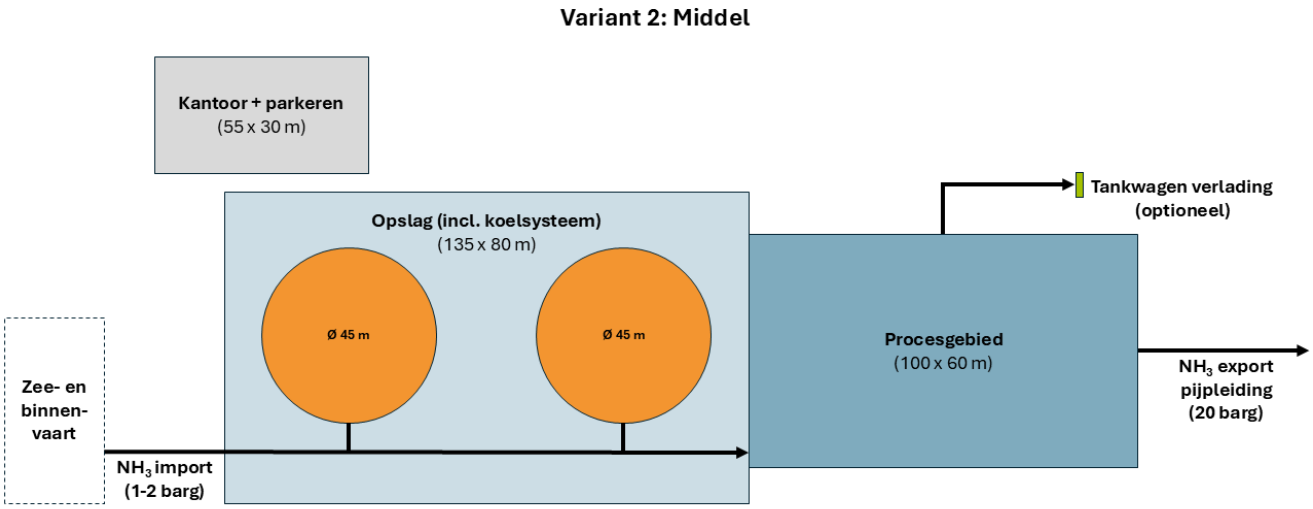
Figuur 33: Schematische weergave terrein NH_3 terminal (variant 1: klein)

Tabel 19: Factsheet NH_3 terminal (klein)

Parameter	Waarde
NH_3 doorvoer	500 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø25m, 30m hoog)
Bruto opslagvolume	20.000 m³ / 14 kton NH_3
Oppervlakte procesgebied	Circa 1.500 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 5.500 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 700 m²

6.5.1 Variant 2: middel (2.000 kton NH_3 per jaar)

In variant 2 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 2.000 kton NH_3. In Figuur 34 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 2 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 17.000 m², waarvan circa 6.000 m² procesgebied en circa 11.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'full containment' tanks (Ø45m, hoogte 30m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



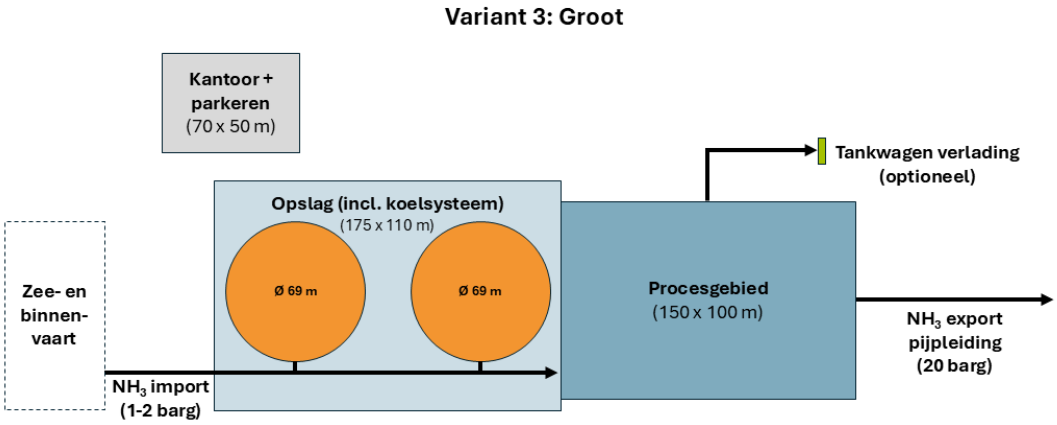
Figuur 34: Schematische weergave terrein NH_3 terminal (variant 2: middel)

Tabel 20: Factsheet NH_3 terminal (variant 2: middel)

Parameter	Waarde
NH_3 doorvoer	2.000 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø45m, 30m hoog)
Bruto opslagvolume	80.000 m³ / 55 kton NH_3
Oppervlakte procesgebied	Circa 6.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 11.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 1.700 m²

6.5.2 Variant 3: groot (5.000 kton NH_3 per jaar)

In variant 3 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 5.000 kton NH_3. In Figuur 35 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 3 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 34.000 m², waarvan circa 15.000 m² procesgebied en circa 19.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'full containment' tanks (Ø69m, hoogte 30m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



Figuur 35: Schematische weergave terrein NH_3 terminal (variant 3: groot)

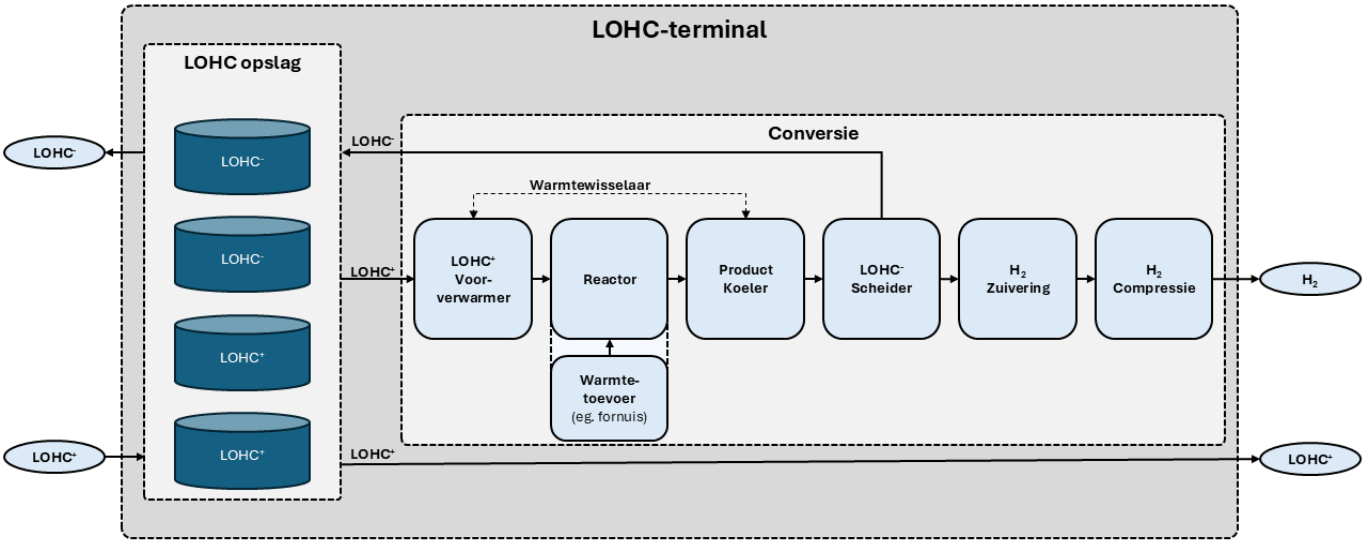
Tabel 21: Factsheet NH_3 terminal (variant 3: groot)

Parameter	Waarde
NH_3 doorvoer	5.000 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø69m, 30m hoog)
Bruto opslagvolume	200.000 m³ / 136 kton NH_3
Oppervlakte procesgebied	Circa 15.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 19.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 3.500 m²

6.6 LOHC-terminal (inclusief conversie)

6.6.1 Techniek

Een LOHC-importterminal is bedoeld om gehydrogeneerde LOHC's ($LOHC^+$) aan te voeren, te dehydrogeneren en uiteindelijk waterstof en/of $LOHC^+$ door te voeren. De terminal ontvangt $LOHC^+$ via zeeschepen, waarna deze in opslagtanks wordt bewaard. Het grootste deel van de $LOHC^+$ wordt ter plaatse gekraakt, terwijl een kleiner deel naar andere locaties wordt getransporteerd voor verdere verwerking. De geproduceerde waterstof wordt via buisleidingen geëxporteerd. De gedehydrogeneerde LOHC ($LOHC^-$) wordt vervolgens weer via dezelfde zeeschepen teruggestuurd naar de oorspronkelijke locatie om opnieuw te worden gehydrogeneerd. In Figuur 36 is een schematische weergave gegeven van de LOHC import terminal. Daarna zijn de belangrijkste stappen kort toegelicht.



Figuur 36: Schematische weergave LOHC terminal

Import en opslag. De terminal ontvangt $LOHC^+$ via zeeschepen. Na import wordt de $LOHC^+$ opgeslagen. LOHC's kunnen bij omgevingsomstandigheden (temperatuur en druk) worden opgeslagen en zijn daarom geschikt voor traditionele olie- of brandstoftankers en opslagtanks. Bij de opslag van methylcyclohexaan (MCH) is er een verhoogd brandrisico, wat vereist dat er meer brandblussystemen worden geplaatst, vergelijkbaar met de opslag van andere brandbare stoffen die veel in de haven worden toegepast. Na opslag kan de $LOHC^+$ naar het achterland worden getransporteerd of worden gekraakt tot waterstof en $LOHC^-$. $LOHC^-$ kan na het kraken weer via zeeschepen worden getransporteerd naar een locatie voor hydrogenatie. De terminal biedt daarom opslag voor zowel $LOHC^+$ en $LOHC^-$.

Conversie. De apparatuur bestaat uit een reactor en een warmtebron. De reactor is verantwoordelijk voor de afbraak van LOHC+ in waterstof en $LOHC^-$ bij hoge temperaturen (circa 200 – 450°C voor de meest gangbare LOHCs). In de reactor wordt een katalysator gebruikt om het proces te bevorderen. Door consumptie en degradatie moeten de katalysatoren af en toe worden vervangen. Hiervoor wordt langdurige opslag wordt vermeden. De katalysatoren worden op tijd besteld bij de leverancier en vervangen tijdens fabrieksonderhoud. De warmtebron kan bestaan uit een elektrische warmtebron, hoogwaardige restwarmte of uit een fornuis. Bij verbranding in een fornuis kunnen CO_2 en (di)stikstofoxiden (NO_x, N_2O) ontstaan, mede afhankelijk van het type brandstof en de verbrandingscondities. Het kan daardoor nodig zijn dat de afgassen van het fornuis worden behandeld in een deNOx installatie.

Voorverwarmen en koeling. De apparatuur bestaat uit een warmtewisselaar. Deze verwarmt de productstromen en wint warmte terug uit de reactieproducten. De overtollige warmte wordt gebruikt om de grondstoffen voor te verwarmen voordat ze de reactor ingaan.

LOHC-scheider en H_2-zuivering. De apparatuur bestaat uit zuiveringskolommen, inclusief adsorptie-eenheden (pressure swing adsorption) en een recirculatiepomp. Deze systemen zorgen ervoor dat de waterstof, $LOHC^-$ van elkaar worden gescheiden. Voor de adsorptiestappen zijn adsorptiemiddelen nodig, die essentieel zijn voor het scheiden van de verschillende gassen. Vanwege de consumptie en degradatie van deze middelen is een kleinschalige opslag vereist; dit is beoogd in het procesgebied. $LOHC^-$ wordt getransporteerd naar het opslaggebied in de terminal, waarna het via zeeschepen weer afgevoerd kan worden. De waterstof gaat door naar de compressor.

Compressie en afvoer van H_2. De apparatuur bestaat uit een compressor. Die comprimeert de geproduceerde waterstof op de gewenste druk voor verdere verwerking, opslag of export.

6.6.2 Uitgangspunten voor het gehele voorbeeldbedrijf

De LOHC terminal is beschreven voor drie verschillende varianten: klein, middel, groot. De capaciteiten zijn voorgesteld door het Havenbedrijf Rotterdam (HbR, en zijn respectievelijk:

- **400 kton** LOHC per jaar voor de kleine variant;
  - Gebaseerd op 25 kton H_2 equivalent;
- **1.600 kton** LOHC per jaar voor de middelgrote variant;
  - Gebaseerd op 100 kton H_2 equivalent;
- **6.500 kton** LOHC per jaar voor de grote variant;
  - Gebaseerd op 400 kton H_2 equivalent.

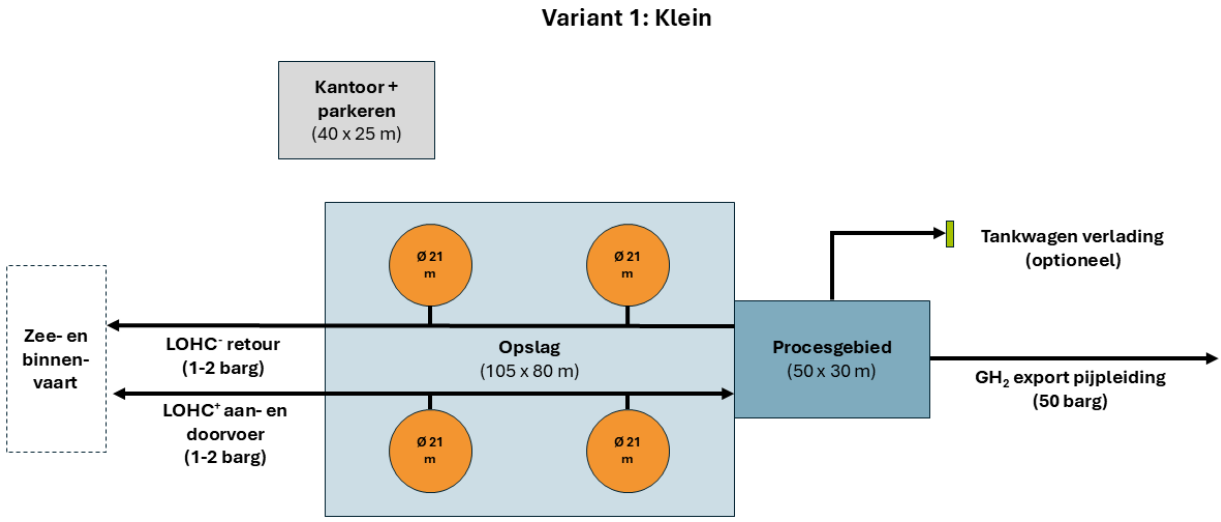
De varianten zijn ingevuld met de procesgegevens van bovenstaande sectie en de volgende uitgangspunten:

- **Type LOHC.** In de uitwerking van dit voorbeeldbedrijf is aangenomen dat behandelde type LOHC benzyltolueen (BT) is.
- **Aanvoer van LOHC.** Aangenomen wordt dat de $LOHC^+$ via zeeschepen binnenkomt, waarbij de LOHC in vloeibare vorm wordt aangevoerd bij atmosferische druk en omgevingstemperatuur. Vanuit het schip wordt de LOHC verpompt door een laadarm en buisleiding naar de opslagtanks.
- **Opslag van LOHC.** Voor het voorbeeldbedrijf is een opslaggebied ingetekend, waarin zowel de geimporteerde $LOHC^+$ als de gedehydrogeneerde $LOHC^-$ wordt opgeslagen. De LOHC wordt opgeslagen in reguliere ‘single containment tanks’ voorzien van een stikstofdeken (grootte en aantal tanks afhankelijk van de variant, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank).
- **Conversie**. Het ingetekende procesgebied is voorzien van de LOHC dehydrogenatieinstallatie zoals hierboven beschreven. De grootte hiervan is afhankelijk van de doorvoer capaciteit en is ingeschat op basis van soortgelijke installaties.
- **Afvoer van waterstof**. De geproduceerde gasvormige waterstof wordt op een druk van 30 barg ingevoed in een waterstofleiding voor verder transport. Daarnaast zou er een installatie voor tankwagenverlading aanwezig kunnen zijn.
- **Afvoer gedehydrogeneerde LOHC**. Nadat de LOHC gedehydrogeneerd is, wordt deze op de terminal weer opgeslagen en daarna afgevoerd via zeeschepen. Dit gebeurt via dezelfde aanlegplaats als voor de import.
- **Kantoorgebouw en parkeerruimte**. Een eerste indicatie voor het kantoorgebouw en parkeerruimte is gegeven op basis van een inschatting van circa 10% van de totale oppervlakte van het opslag- en procesgebied. Een nadere inschatting dient gedaan te worden in relatie tot veiligheidscontouren.

Een aantal aspecten is niet, of niet op schaal in de figuur opgenomen, maar zullen ook op een veilige manier een plek moeten krijgen. Het gaat om de aanlegplaatsen voor zee- en binnenvaart, transformatoren voor elektriciteitsvoorziening, noodstroomvoorziening en het kantoorgebouw.

6.6.3 Variant 1: klein (400 kton LOHC per jaar)

In variant 1 heeft de terminal een jaarlijkse doorzet van 400 kton LOHC. De bijbehorende jaarlijkse output van waterstof bedraagt 25 kton H_2. In Figuur 37 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 1 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 10.000 m², waarvan circa 1.500 m² procesgebied en circa 8.500 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit vier 'single containment' tanks (Ø21m, hoogte 30m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



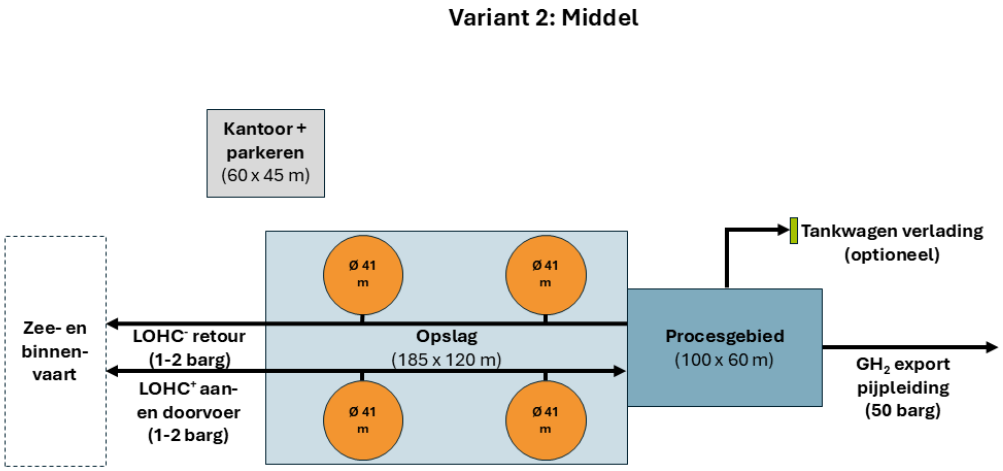
Figuur 37: Schematische weergave terrein LOHC terminal (variant 1: klein)

Tabel 22: Factsheet LOHC terminal (klein)

Parameter	Waarde
LOHC import	400 kton/jaar
Waterstofoutput	25 kton/jaar
Aantal opslagtanks (LOHC)	4 tanks (Ø21m, 30m hoog)
Bruto opslagvolume	40.000 m³ / 40 kton LOHC
Oppervlakte procesgebied	Circa 1.500 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 8.500 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 1.000 m²

6.6.4 Variant 2: middel (1.600 kton LOHC per jaar)

In variant 2 heeft de terminal een jaarlijkse doorzet van 1.600 kton LOHC. De bijbehorende jaarlijkse output van waterstof bedraagt 100 kton H_2. In Figuur 38 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 1 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 28.000 m², waarvan circa 6.000 m² procesgebied en circa 22.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit vier 'single containment' tanks (Ø41m, hoogte 30m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



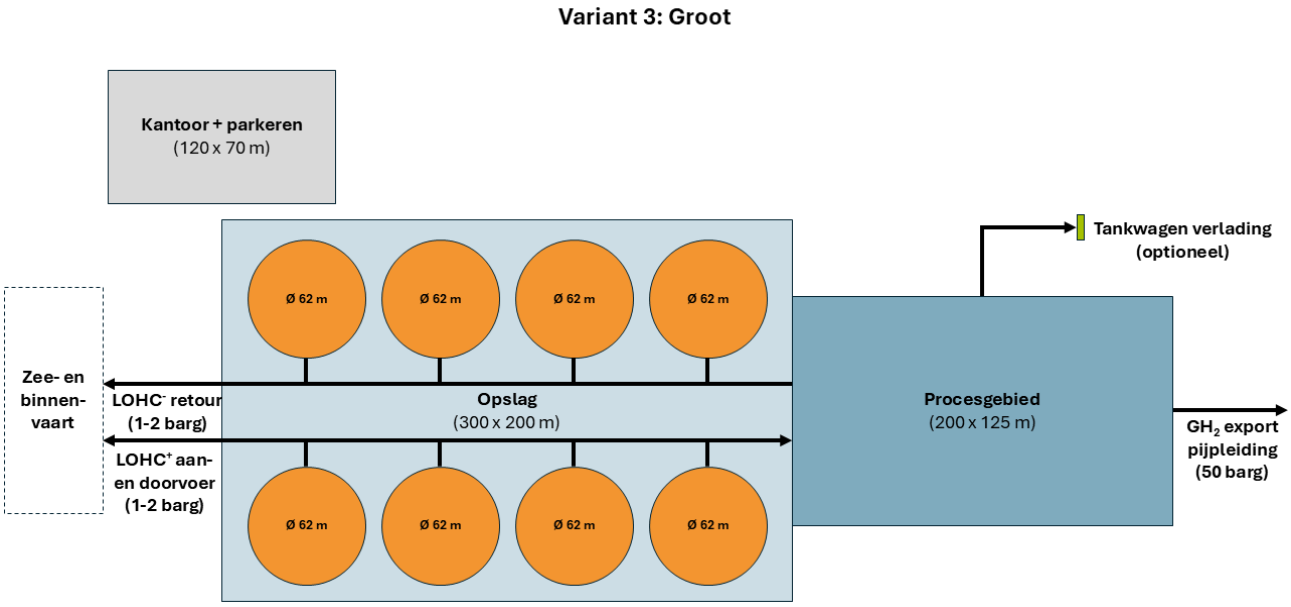
Figuur 38: Schematische weergave terrein LOHC terminal (variant 2: middel)

Tabel 23: Factsheet LOHC terminal (variant 2: middel)

Parameter	Waarde
LOHC import	1.600 kton/jaar
Waterstofoutput	100 kton/jaar
Aantal opslagtanks (LOHC)	4 tanks (Ø41m, 30m hoog)
Bruto opslagvolume	180.000 m³ / 179 kton LOHC
Oppervlakte procesgebied	Circa 6.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 22.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 2.800 m²

6.6.5 Variant 3: groot (6.500 kton LOHC per jaar)

In variant 3 heeft de terminal een jaarlijkse doorzet van 6.500 kton LOHC. De bijbehorende jaarlijkse output van waterstof bedraagt 400 kton H_2. In Figuur 39 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 1 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 85.000 m², waarvan circa 25.000 m² procesgebied en circa 60.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit acht 'single containment' tanks (Ø62m, hoogte 30m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



Figuur 39: Schematische weergave terrein LOHC terminal (variant 3: groot)

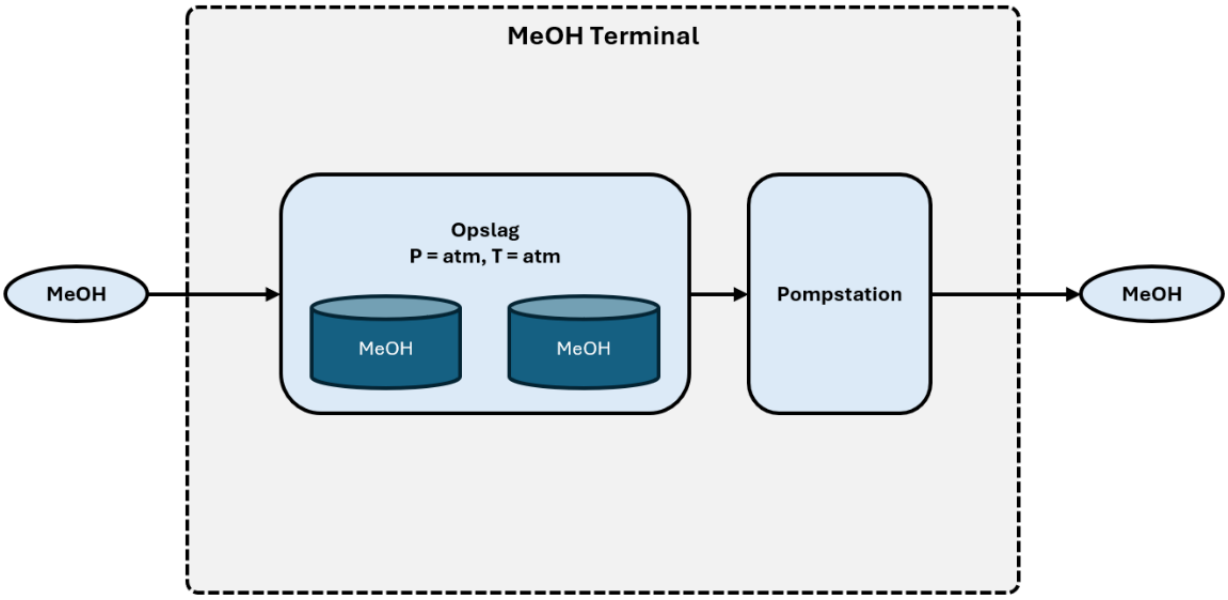
Tabel 24: Factsheet LOHC terminal (variant 3: groot)

Parameter	Waarde
LOHC import	6.500 kton/jaar
Waterstofoutput	400 kton/jaar
Aantal opslagtanks (LOHC)	8 tanks (Ø62m, 30m hoog)
Bruto opslagvolume	710.000 m³ / 706 kton LOHC
Oppervlakte procesgebied	Circa 25.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 60.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 8.500 m²

6.7 Methanolterminal

6.7.1 Techniek

Een MeOH importterminal is bedoeld om MeOH aan te voeren., tijdelijk op te slaan en vervolgens door te voeren. De terminal ontvangt MeOH via zeeschepen, waarna deze in opslagtanks wordt bewaard. Vervolgens wordt de MeOH via een pompstation verder gevoerd voor verder transport. Dit transport kan zowel via buisleiding, tank- of ketelwagens en (binnenvaart)schepen gebeuren. In Figuur 40 is een schematische weergave gegeven van de MeOH import terminal. Daarna zijn de belangrijkste stappen kort toegelicht.



Figuur 40: Schematische weergave MeOH terminal

Import en opslag. De terminal ontvangt MeOH via zeeschepen, welke de MeOH in vloeibare vorm aanvoeren. Na het lossen wordt de MeOH in tanks opgeslagen op de terminal.

Opslag. Grootschalig opslaan van MeOH gebeurt doorgaans in vloeibare vorm bij omgevingsomstandigheden (temperatuur en druk) en is daarom geschikt voor traditionele olie- of brandstoftankers en opslagtanks.

Drukverhoging en afvoer van MeOH. Eén é of meerdere pompen verhogen de druk van de uit de opslag afkomstige MeOH tot de gewenste druk voor het type beoogde export (bijv. buis, spoor, weg of binnenvaart).

6.7.2 Uitgangspunten voor het gehele voorbeeldbedrijf

De MeOH terminal is beschreven voor drie verschillende varianten: klein, middel, groot. De capaciteiten zijn voorgesteld door het Havenbedrijf Rotterdam (HbR) en zijn respectievelijk:

- **400 kton** MeOH per jaar voor de kleine variant;
  - Gebaseerd op 50 kton H_2 equivalent;
- **2.300 kton** MeOH per jaar voor de middelgrote variant;
  - Gebaseerd op 300 kton H_2 equivalent;
- **5.000 kton** MeOH per jaar voor de grote variant;
  - Gebaseerd op 650 kton H_2 equivalent).

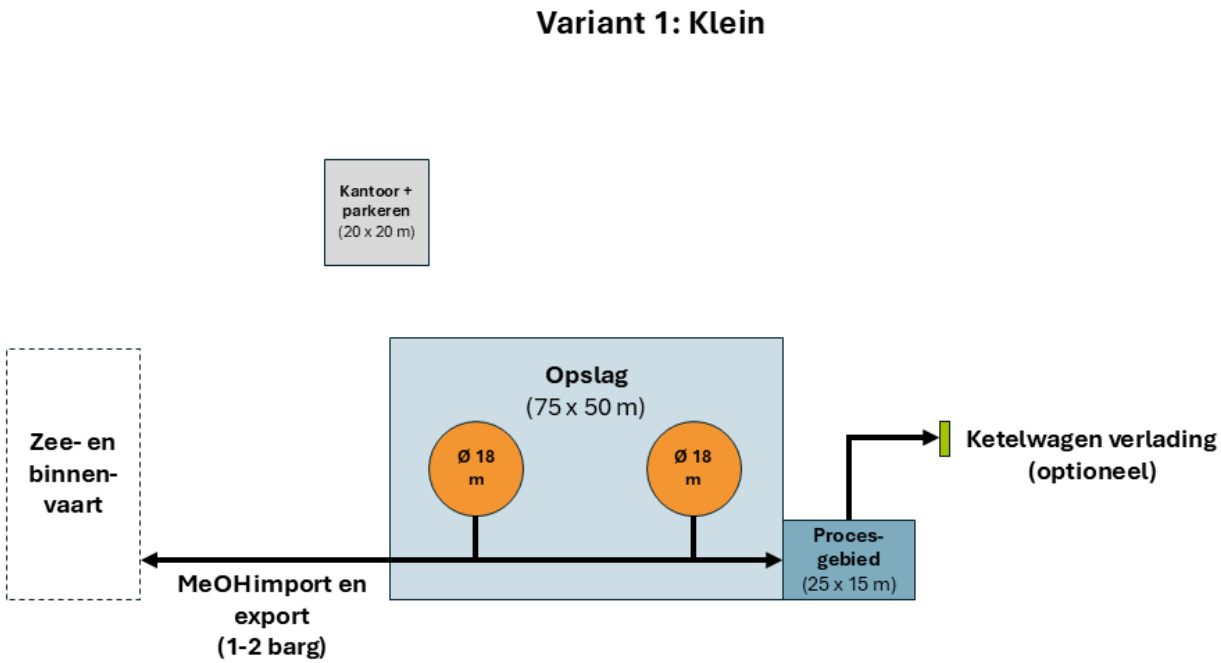
De varianten zijn ingevuld met de procesgegevens van bovenstaande sectie en de volgende uitgangspunten:

- **Aanvoer van MeOH.** Aangenomen wordt dat de MeOH via zeeschepen binnenkomt, waarbij de MeOH in vloeibare vorm wordt aangevoerd bij omgevingstemperatuur en onder nagenoeg atmosferische druk. Vanuit het schip wordt de MeOH verpompt door een laadarm en buisleiding naar de opslagtanks.
- **Opslag van MeOH.** Voor het voorbeeldbedrijf is een opslaggebied ingetekend, waarin de MeOH wordt opgeslagen. De MeOH wordt opgeslagen in reguliere ‘single containment tanks’ (grootte en aantal tanks afhankelijk van de variant, inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank).
- **Afvoer van MeOH**. Na opslag wordt MeOH via een pompstation op lichte overdruk (1-2 barg) naar binnenvaartschepen gepompt. Het ingetekende procesgebied is voorzien van het pompstation. Daarnaast is er een optie voor ketelwagens (spoor) opgenomen, hoewel deze in de huidige varianten niet verder is uitgewerkt. Andere verladingopties, zoals per buisleiding of weg, kunnen ook worden gerealiseerd, afhankelijk van de vraag.
- **Kantoorgebouw en parkeerruimte**. Een eerste indicatie voor het kantoorgebouw en parkeerruimte is gegeven op basis van een inschatting van circa 10% van de totale oppervlakte van het opslag- en procesgebied. Een nadere inschatting dient gedaan te worden in relatie tot veiligheidscontouren.

Een aantal aspecten is niet, of niet op schaal, in de figuur opgenomen, maar zullen ook op een veilige manier een plek moeten krijgen. Het gaat om de aanlegplaatsen voor zee- en binnenvaart, locatie van het spoor, transformatoren voor elektriciteitsvoorziening, noodstroomvoorziening en het kantoorgebouw.

6.7.3 Variant 1: klein (400 kton MeOH per jaar)

In variant 1 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 400 kton MeOH. In Figuur 41 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 1 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 4.200 m², waarvan circa 400 m² procesgebied en circa 3.800 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'single containment' tanks (Ø18m, hoogte 20m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



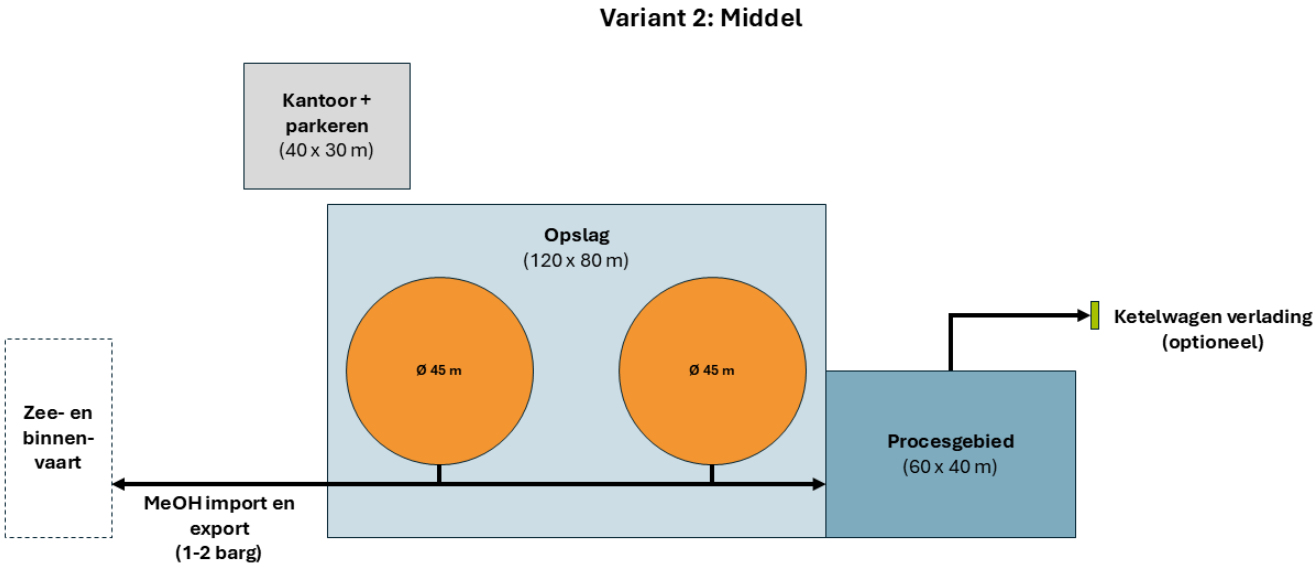
Figuur 41: Schematische weergave terrein MeOH terminal (variant 1: klein)

Tabel 25: Factsheet MeOH terminal (klein)

Parameter	Waarde
MeOH doorvoer	400 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø18m, 20m hoog)
Bruto opslagvolume	10.000 m³ / 8 kton MeOH
Oppervlakte procesgebied	Circa 400 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 3.800 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 400 m²

6.7.4 Variant 2: middel (2.300 kton MeOH per jaar)

In variant 2 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 2.300 kton MeOH. In Figuur 42 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 2 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 12.000 m², waarvan circa 2.400 m² procesgebied en circa 9.600 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'single containment' tanks (Ø45m, hoogte 25m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



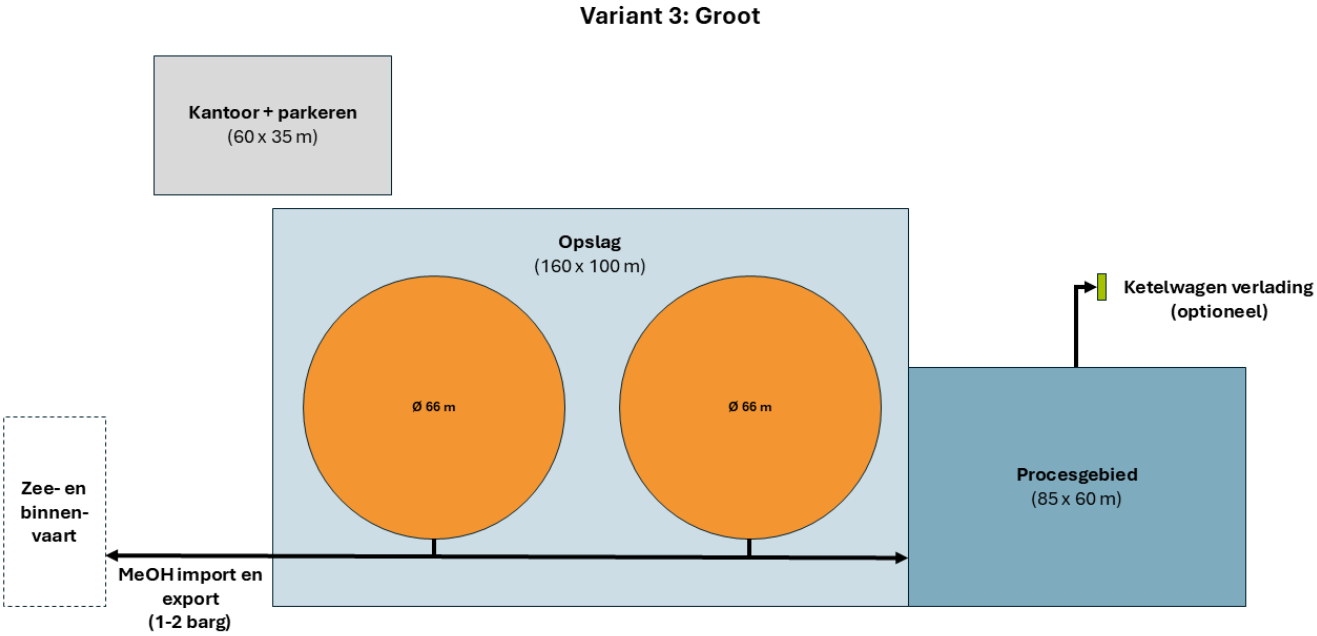
Figuur 42: Schematische weergave terrein MeOH terminal (variant 2: middel)

Tabel 26: Factsheet MeOH terminal (variant 2: middel)

Parameter	Waarde
MeOH doorvoer	2.300 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø45m, 25m hoog)
Bruto opslagvolume	80.000 m³ / 63 kton MeOH
Oppervlakte procesgebied	Circa 2.400 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 9.600 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 1.200 m²

6.7.5 Variant 3: groot (5.000 kton MeOH per jaar)

In variant 3 heeft de terminal een jaarlijkse doorvoer van 5.000 kton MeOH. In Figuur 43 is een schematische weergave van het terrein van de terminal voor variant 3 te zien. Hierbij is een inschatting gemaakt van de benodigde oppervlakte voor de installaties. De totale beoogde oppervlakte voor het opslag- en procesgebied is geschat op circa 21.000 m², waarvan circa 5.000 m² procesgebied en circa 16.000 m² voor het opslaggebied. Het opslaggebied bestaat uit twee 'single containment' tanks (Ø66m, hoogte 25m), inclusief 25 meter onderhouds- en veiligheidsruimte per tank en ruimte voor het koelsysteem. Het totale bedrijfsterrein moet minimaal bovengenoemde oppervlakte bevatten, samen met ruimte voor kantoren, parkeren en eventuele verlading.



Figuur 43: Schematische weergave terrein MeOH terminal (variant 3: groot)

Tabel 27: Factsheet MeOH terminal (variant 3: groot)

Parameter	Waarde
MeOH doorvoer	5.000 kton/jaar
Aantal opslagtanks	2 tanks (Ø66m, 25m hoog)
Bruto opslagvolume	170.000 m³ / 134 kton MeOH
Oppervlakte procesgebied	Circa 5.000 m²
Oppervlakte opslaggebied	Circa 16.000 m²
Oppervlakte kantoor + parkeren	Circa 2.100 m²

7 Conclusies

Tot besluit combineren we in dit hoofdstuk de bandbreedtes van de waterstofketen uit Hoofdstuk 4 met de bedrijven die in Hoofdstuk 6 zijn voorgesteld, om een beeld te schetsen van de potentiële bedrijvigheid binnen het HIC. Dit hoofdstuk geeft inzicht in het type bedrijven, de aantallen en het ruimtegebruik van deze bedrijven binnen de gehele waterstofwaardeketen.

We hebben de minimale en maximale waarden van de waterstofvolumes in 2050 uit Hoofdstuk 4 gecombineerd met de voorgestelde bedrijven uit Hoofdstuk 6. Uit deze twee samen is af te leiden hoeveel van dergelijke bedrijven in het HIC nodig zijn om de volumes te realiseren. Omdat de voorbeeldbedrijven steeds in drie varianten van productievolumes zijn gepresenteerd, is hier het volgende procedé aangehouden: eerst is gekeken hoeveel grote bedrijven binnen het betreffende volume passen, daarna hoeveel middelgrote binnen het resterende volume passen, en tot slot hoeveel kleine nodig zijn voor het restvolume. Tot slot is bij de resulterende opstellingen het ruimtebeslag berekend. Hierbij is het belangrijk op te merken dat het ruimtegebruik alleen betrekking heeft op opslag- en procesgebieden; ruimte voor kantoren, parkeergelegenheden en eventuele verladingsplekken is niet inbegrepen.

In Tabel 28 is een overzicht gegeven van de indicaties van ruimtegebruik per type bedrijf en variant. De uitkomsten van de combinatie met de bandbreedtes voor waterstofvolumes in 2050 zijn weergegeven in Tabel 29. De aantallen bedrijven zijn afhankelijk van de hier gekozen groottes voor de voorbeeldbedrijven en kunnen ook alternatief worden ingevuld. Wat wel een redelijke indicatie geeft, is het ruimtebeslag, omdat dit is gerelateerd aan de bandbreedtes van de waterstofvolumes in de keten. Ook hier zijn echter significante onzekerheden, bijvoorbeeld over te behalen schaalvoordelen bij grotere bedrijven.

Tabel 28 Indicatie van ruimtegebruik voor opslag- en procesgebied per type bedrijf en variant

	NH3 kraker	Elektrolyser	LH2 terminal	NH3 terminal	MeOH terminal	LOHC terminal	
Variant							
Klein	0,8	2,3	0,8	0,7	0,4	1	hectare
Middel	2,7	4,2	1,1	1,7	1,2	2,8	hectare
Groot	6,4	12,5	2	3,4	2,1	8,5	hectare

Tabel 29 Vergelijking ruimtegebruik en aantal bedrijven bij bandbreedtes waterstofketens 2050

	NH3 kraker		Elektrolyser		LH2 terminal		NH3 terminal		MeOH terminal		LOHC terminal		
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Aantal bedrijven													
Klein	-	-	-	-	-	-	-	3	2	-	-	-	
Middel	-	-	--	1	1	1	1	1	-	-	-	2	
Groot	2	6	8	22	4	14	2	8	-	4	-	2	
Ruimtegebruik													
Opslag- en procesgebied	13	39	100	280	10	30	9	31	1	8	0	30	hectare

Tot slot willen we benadrukken dat deze studie afhankelijk is van toekomstige ontwikkelingen en beleidsbeslissingen. Gebaseerd op de huidige inzichten, geeft de studie de bandbreedte weer van toekomstige ontwikkelingen. De geschetste scenario's en bedrijfssituaties dienen als uitgangspunt voor verdere discussie en verfijning. Daarnaast wordt deze rapportage gebruikt als input om de milieu-impact te onderzoeken, wat nodig is om tijdig beleid te ontwikkelen. Het is essentieel om de ontwikkelingen in technologie, regelgeving en markttrends nauwlettend te volgen om de waterstofketen in de haven van Rotterdam optimaal te benutten.

Bijlagen

A1 Scenario bandbreedtes 2030, 2040, 2050

Tabel 30 Bandbreedtes in 2030 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa H2 equivalent).

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2030						
Productie	0,5 tot 0,9	-	-	-	-	Mtpa H_2-eq
Overslag	-	0,1 tot 0,2	0,6 tot 1,3	0,1 tot 0,3	0 tot 0,1	Mtpa H_2-eq
Opslag	-	-	0,2 tot 0,3	0 tot 0,1	0 tot 0,03	Mt H_2-eq
Conversie	0,4 tot 1,1 (output)	0 tot 0,1 (input)	0,5 tot 1,2 (input)	-	0 tot 0,1 (input)	Mtpa H_2-eq
Doorvoer zee	-	0 tot 0,1	0 tot 0,1	-	-	Mtpa H_2-eq
Doorvoer achterland	0,5 tot 1,2	-	0 tot 0,7	-	-	Mtpa H_2-eq
Eindgebruik haven	0,5 tot 0,8	-	-	0,1 tot 0,2	-	Mtpa H_2-eq

Tabel 31 Bandbreedtes in 2040 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa H2 equivalent).

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2040						
Productie	0,5 tot 1,4 (boven 1,0 Mtpa offshore)	-	-	-	-	Mtpa H_2-eq
Overslag	-	0,9 tot 2	1,8 tot 5,9	0,1 tot 1,2	0 tot 1	Mtpa H_2-eq
Opslag	-	-	0,5 tot 1,5	0 tot 0,3	0 tot 0,3	Mt H_2-eq
Conversie	2,1 tot 6,8 (output)	0,4 tot 1,8 (input)	1,7 tot 5,1 (input)	-	0 tot 1 (input)	Mtpa H_2-eq
Doorvoer zee	-	0 tot 0,2	0 tot 0,5	-	0 tot 0,1	Mtpa H_2-eq
Doorvoer achterland	2,2 tot 6,1	-	0 tot 1,4	0 tot 0,7	-	Mtpa H_2-eq
Eindgebruik haven	0,5 tot 2	-	0 tot 0,4	0,1 tot 0,6	-	Mtpa H_2-eq

Tabel 32 Bandbreedtes in 2050 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa H2 equivalent).

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2050						
Productie	0,7 tot 2,0 (boven 1,0 Mtpa offshore)	-	-	-	-	Mtpa H_2-eq
Overslag	-	2,2 tot 7,2	1,9 tot 6,9	0,1 tot 2,6	0 tot 1,3	Mtpa H_2-eq
Opslag	-	-	0,5 tot 1,7	0 tot 0,7	0 tot 0,3	Mt H_2-eq
Conversie	3,7 tot 11,5 (output)	1,9 tot 6,6 (input)	1,5 tot 4,7 (input)	-	0 tot 1,1 (input)	Mtpa H_2-eq
Doorvoer zee	-	0 tot 0,6	0 tot 0,7	-	0 tot 0,1	Mtpa H_2-eq
Doorvoer achterland	3,7 tot 8,8	-	0 tot 2,2	0 tot 1,8	-	Mtpa H_2-eq
Eindgebruik haven	0,4 tot 4,7	-	0,2 tot 1,5	0,1 tot 0,8	-	Mtpa H_2-eq

Tabel 33 Bandbreedtes in 2030 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa drager).

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2030 gewicht drager						
Productie	0,5 tot 0,9	-	-	-	-	Mtpa
Overslag	-	0,1 tot 0,2	3,9 tot 8,4	0,6 tot 1,8	0 tot 1,6	Mtpa
Opslag	-	-	1 tot 2,1	0 tot 0,5	0 tot 0,4	Mt
Conversie	0,4 tot 1,1 (output)	0 tot 0,1 (input)	3 tot 7,6 (input)	-	0 tot 1,6 (input)	Mtpa
Doorvoer zee	-	0 tot 0,1	0 tot 0,6	-	-	Mtpa
Doorvoer achterland	0,5 tot 1,2	-	0 tot 4,5	-	-	Mtpa
Eindgebruik haven	0,5 tot 0,8	-	-	0,6 tot 1,2	-	Mtpa

Tabel 34 Bandbreedtes in 2040 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa drager).

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2040 gewicht drager						
Productie	0,5 tot 1,4 (boven 1,0 Mtpa offshore)	-	-	-	-	Mtpa
Overslag	-	0,9 tot 2	11,7 tot 38,1	0,6 tot 7,2	0 tot 16,2	Mtpa
Opslag	-	-	2,9 tot 9,5	0 tot 1,8	0 tot 4,1	Mt
Conversie	2,1 tot 6,8 (output)	0,4 tot 1,8 (input)	10,3 tot 32,3 (input)	-	0 tot 16,2 (input)	Mtpa
Doorvoer zee	-	0 tot 0,2	0 tot 3,2	-	0 tot 1,6	Mtpa
Doorvoer achterland	2,2 tot 6,1	-	0 tot 9	0 tot 4,2	-	Mtpa
Eindgebruik haven	0,5 tot 2	-	0 tot 2,6	0,6 tot 3,6	-	Mtpa

Tabel 35 Bandbreedtes in 2050 van waterstofvolumes per waterstofdrager en -keten (in Mtpa drager).

	GH2	LH2	NH3	MeOH	LOHC	
Bandbreedtes 2050 gewicht drager						
Productie	0,7 tot 2,0 (boven 1,0 Mtpa offshore)	-	-	-	-	Mtpa
Overslag	-	2,2 tot 7,2	12,3 tot 44,5	0,6 tot 15,5	0 tot 21,1	Mtpa
Opslag	-	-	3,2 tot 11,0	0 tot 4,2	0 tot 4,9	Mt
Conversie	3,7 tot 11,5 (output)	1,9 tot 6,6 (input)	9,7 tot 30,3 (input)	-	0 tot 17,8 (input)	Mtpa
Doorvoer zee	-	0 tot 0,6	0 tot 4,5	-	0 tot 1,6	Mtpa
Doorvoer achterland	3,7 tot 8,8	-	0 tot 14,2	0 tot 10,7	-	Mtpa
Eindgebruik haven	0,7 tot 2,0 (boven 1,0 Mtpa offshore)	-	-	-	-	Mtpa