

Vergelijking waterstofdragers

*Multicriteria-analyse van
leveringsketens in Nederland*

EINDVERSIE

Stratelligence en Dwarsverband
Leiden, september 2024
Opgesteld in opdracht van het
Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Colofon:

Foto voorblad: adobe stockfoto (bewerkt)

Voor meer informatie over de inhoud:

Gigi van Rhee

Stratelligence

Rijnsburgerweg 161

2334 BP Leiden

Nederland

+31 71 573 08 20

info@stratelligence.nl

Kamer van Koophandel Leiden no. 28112271

VOORWOORD

Het onderzoek *Vergelijking waterstofdragers, Multicriteria-analyse van leveringsketens in Nederland* is in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat – inmiddels het ministerie van Klimaat en Groene Groei – uitgevoerd door Gigi van Rhee (Stratelligence) en Remco Hoogma (Dwarsverband) met bijdragen van Ekinetix.

Het doel van de opdracht is een feitenbasis te verzamelen voor een op te stellen visie op waterstofdragers. Bronnen zijn vooral reeds beschikbare studies. Uitdaging was dat niet voor alle relevante indicatoren en alle potentiële waterstofdragers de beschikbare data compleet of objectief/feitelijk beschikbaar waren. Niet overal is al onderzoek naar gedaan of over gepubliceerd en over de toekomst kunnen sowieso geen feiten verzameld worden, alleen verwachtingen. De feiten zijn daarom aangevuld met *expert judgement* op basis van de best beschikbare informatie binnen dit onderzoek. Om bij het gebruik van dit rapport de resultaten goed op waarde te kunnen schatten, vermelden wij op basis van welke objectieve bronnen en methoden en met welke aannames de resultaten bepaald zijn en welke ‘bijsluiter’ daardoor van toepassing is.

Wij hebben dankbaar gebruikt gemaakt van eerder en lopend onderzoek door Berenschot en Arcadis (MKBV), TNO (inventarisatie waterstofdragers), EU Joint Research Centre (kostenstudie en LCA-studie van import waterstofdragers). Wij danken ook de deelnemers aan de Delphi-bijeenkomst en aan de expertsessies over omgevingsveiligheid, cyberveiligheid en security, betrouwbaarheid van waterstofketens en adaptiviteit, en individuele bedrijven die informatie hebben aangeleverd. In enkele gevallen is gebruik gemaakt van vertrouwelijk verkregen data. Deze informatie is niet herleidbaar verwerkt. Hierbij is wel telkens vergeleken met openbaar beschikbare data om in te schatten of de geleverde waarden plausibel zijn.

De doorlooptijd bedroeg initieel een half jaar, van november 2023 tot eind mei 2024. Tijdens het onderzoek is bijna wekelijks overlegd met de opdrachtgeversgroep (KGG, IenW) en minder frequent met een bredere interdepartementale begeleidingsgroep. De aanpak van het onderzoek en de resultaten zijn gepresenteerd in twee stakeholderbijeenkomsten die de ministeries van KGG en IenW hebben georganiseerd over de visie waterstofdragers (24 januari en 24 april). Feedback van de tweede bijeenkomst is meegenomen in dit rapport en heeft geleid tot een aanpassing van enkele aannames in de basissituatie (gebruik van CO₂ uit een industriële puntbron in plaats van uit *direct air capture* in 2030 en gebruik van DeNO_x-installaties in Nederland). Ook is een aantal extra gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

De uitkomsten van de studie zijn rangschikkingen van waterstofleveringsketens. Deze rangschikkingen moeten echter niet gezien worden als eindoordelen van goede en slechte ketens, van winnaars en verliezers. De onzekerheden in de aannames en data zijn groot, het betreft immers verwachtingen in de toekomst over technieken en ketens die zich veelal nog niet op grote schaal bewezen hebben en die afhankelijk zijn van ontwikkelingen op het gebied van macro-economie, politiek, innovatie, industriebeleid enzovoorts. De uitkomsten laten wel het beeld zien hoe op dit

moment wordt gekeken naar de publieke belangen en naar de waterstofdragers vanuit het perspectief van die publieke belangen. De waarde van de studie is niet zozeer de uitkomst (de rangschikking) maar het gezamenlijk doorlopen van het denkproces om de leveringsketens van waterstofdragers te onderzoeken en doorgronden vanuit het perspectief van meerdere publieke belangen en het wegen daarvan. Het bepalen van een weging tussen uiteenlopende belangen is normaliter de taak van de politiek. De uit de *Modified Delphi*-aanpak resulterende weging en de alternatieve wegingen in gevoeligheidsanalyses vormen een onderzoeksresultaat en geen concreet advies aan de opdrachtgever.

De wereld blijft veranderen, en dat betekent dat de informatie mee-verandert. Daarom adviseren wij om deze analyse over drie tot vier jaar te herhalen. Omwille van de vergelijkbaarheid en het vaststellen van trends en verschillen kan daarvoor desgewenst weer gebruik worden gemaakt van de voor dit onderzoek ontwikkelde methodiek.

Gigi van Rhee, Stratelligence

Remco Hoogma, Dwarsverband

Leiden, september 2024

MANAGEMENT SAMENVATTING

HET ONDERZOEK

In de Kamerbrief van 17 maart 2023 bij de studie *Omgevingsveiligheid toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers* is een visie op waterstofdragers aangekondigd. Het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) heeft als bouwsteen voor deze op te stellen visie dit onderzoek laten uitvoeren: een vergelijking tussen uiteenlopende waterstofdragers voor specifieke ketens in en door Nederland. De vergelijking is gebaseerd op de publieke belangen die een rol spelen in de energie- en grondstoffentransitie, zoals beschreven in het Nationaal Plan Energiesysteem.

Het onderzoek *Vergelijking waterstofdragers* bestaat uit een uitgebreide multicriteria-analyse van verschillende importketens van waterstofdragers op 10 publieke belangen. Dit betreft de publieke belangen: Betaalbaar, Economisch krachtig, Betrouwbaar, Veilig, Duurzaam, Rechtvaardig, Participatief (in deze studie uitgewerkt als Toegankelijk), Ruimte en Milieu; hieraan is Adaptief toegevoegd. Doel van deze analyse is om de feitenbasis voor de op te stellen visie op orde te brengen en zo KGG en andere ministeries te ondersteunen bij het maken van beleidskeuzes. Dit betreft beleid met betrekking tot fysieke stromen van waterstofdragers in en door Nederland, en met betrekking tot de mate waarin, de wijze waarop, en de voorwaarden waaronder het kabinet deze stromen in en door Nederland wil faciliteren en eventueel stimuleren. Het gaat om import en fysieke stromen voor eindgebruik in zowel Nederland als het Europese achterland (in het bijzonder Duitsland).

De studie vergelijkt zeven waterstofdragers (in het vervolg: dragers). Elk van deze dragers kan worden toegepast om in de vraag van eindgebruikers naar waterstof te voorzien (eindgebruik is waterstof, linkerkolom tabel). Vier dragers kunnen ook rechtstreeks gebruikt worden als grondstof of brandstof (eindgebruik is waterstofdrager, rechterkolom tabel).

Eindgebruik is waterstof	Eindgebruik is waterstofdrager
1. Vloeibare waterstof,	1. Vloeibare waterstof,
2. Ammoniak,	2. Ammoniak,
3. Methanol,	3. Methanol,
4. Vloeibaar synthetisch methaan (LSM),	4. (Vloeibaar) synthetisch methaan (LSM).
5. Methylcyclohexaan ¹ (MCH – een LOHC),	
6. (Perhydro)Dibenzyltolueen ² (DBT – een LOHC),	
7. Natriumboorhydride.	[LOHC = <i>Liquid organic hydrogen carrier</i>]

In deze studie is voor elk publiek belang een individuele score bepaald voor leveringsketens van dragers. Elke leveringsketen bestaat uit de schakels: import van de drager naar Nederland (over zee), opslag en overslag in de importhaven, eventuele conversie naar gasvormig waterstof in de importhaven, transport van de drager of van de waterstof na de conversie (over de weg, het spoor,

¹ Het paar toluen (waterstofarm) - methylcyclohexaan (waterstofrijk).

² Het paar dibenzyltolueen (waterstofarm) - perhydrodibenzyltolueen (waterstofrijk).

per binnenvaartschip of buisleiding, over een representatief tracé van 200 km), decentrale opslag van de waterstofdrager bij de eindgebruiker, eventuele decentrale conversie van de drager naar waterstofgas, of synthese met waterstofgas uit het landelijke waterstoftransportnetwerk (hierna waterstofnet) naar een waterstofdrager. De ketens lopen tot aan de poort van de eindgebruiker, of tot aan het tankstation of bunkerstation. De ketens kunnen dus verschillen als het gaat om de drager, het eindgebruik (van waterstof of waterstofdrager), het aantal conversies, de locatie van conversie (in haven of bij de eindgebruiker) en de transportmodaliteit.

De scores van de leveringsketens op de afzonderlijke publieke belangen zijn bepaald op basis van literatuur en in sommige gevallen aangevuld met expertise van marktpartijen en publieke organisaties. De weegfactoren zijn in een Delphi-proces met stakeholders bepaald.³ De 10 individuele scores per publiek belang zijn samengevoegd tot een eindscore per leveringsketen door combinatie met deze weegfactoren. De eindscores geven de wenselijkheid van de ketens uit oogpunt van publieke belangen aan.

In deze studie is geen rekening gehouden met de vraag of de noodzakelijke volumes en infrastructuur tijdig gerealiseerd kunnen en mogen worden. Voor succesvolle inpassing van de leveringsketens kan het nodig zijn knelpunten op te lossen, bijvoorbeeld op het gebied van wetgeving, ruimtebeslag, netcongestie en beschikbare transportcapaciteit.

DE RESULTATEN

Wegfactoren

Figuur 1 geeft de resultaten van de weging van de publieke belangen door de Delphi-groep, die was samengesteld uit vertegenwoordigers van verschillende overheden, ketenpartijen (waaronder havenbedrijven en brancheorganisaties), NGO's en kennis- en adviespartijen. Veilig en Duurzaam worden verreweg het zwaarst gewogen. Daarna volgen op enige afstand Milieu en Betaalbaar. De overige belangen krijgen samen het laatste kwart van de punten.



Figuur 1: Resulterende weging van publieke belangen voor dragers op basis van Delphi-scores

³ Voor meer informatie over methodiek, zie het hoofdrapport en bijlagen.

Eindscores

Er zijn eindscores⁴ bepaald voor vier situaties, elk gebaseerd op de in het Delphi-proces bepaalde weegfactoren en import van dragers per schip uit Marokko (3000 km zeetransport); eerst de basissituatie en vervolgens drie varianten hierop. Het gaat tweemaal om een andere locatie en één keer om een ander zichtjaar.

- *Basissituatie*: Dit betreft de situatie voor eindgebruikersgroepen in het binnenland, op 200 km afstand van de importhaven (de lengte van het representatieve tracé).
- *Importhaven*: De eerste variant op de basissituatie met een andere locatie is de situatie voor eindgebruikers die de waterstof(drager) in de importhaven gebruiken. In dit geval vervalt het binnenlands transport en de decentrale opslag.
- *Doorvoer en export*: De tweede variant is de situatie waarin de waterstof(drager) wordt doorgevoerd door Nederland voor gebruik van de waterstof(drager) in Duitsland of België. In dit geval vervallen de ketenonderdelen decentrale opslag, conversie en synthese.
- *2050*: De laatste variant gaat om een doorkijk naar 2050. Voor een deel van de publieke belangen zullen de scores veranderen door de veranderende omstandigheden ten opzichte van 2030.

Ook zijn enkele gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

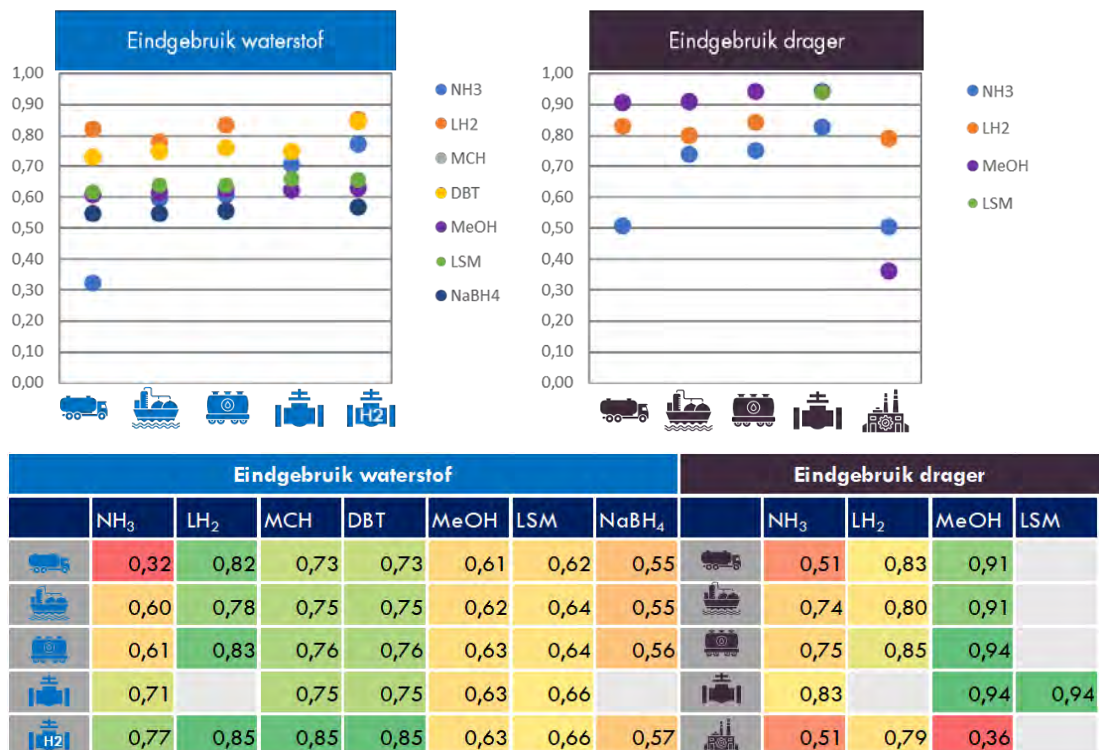
Figuur 2 toont de eindscores (hoe hoger, hoe beter) voor alle onderzochte leveringsketens, verdeeld over eindgebruik van waterstof (links) en leveringsketens met eindgebruik van de waterstofdrager (rechts) voor de *basissituatie 2030*.⁵ De icoontjes van links naar rechts geven de transportmodaliteit van de waterstofdrager aan: over de weg, per binnenvaartschip, spoor of buisleiding, waarna conversie naar waterstofgas of direct gebruik plaatsvindt. Het meest rechtse icoontje in de linkergrafiek betreft ketens met centrale conversie van de waterstofdrager in de importhaven, waarna het waterstofgas via het landelijke waterstofnet wordt getransporteerd. Het meest rechtse icoontje in de rechtergrafiek betreft ketens waarbij decentrale synthese van de waterstofdrager plaatsvindt bij de eindgebruiker met waterstof die na centrale conversie van de drager in de importhaven wordt vervoerd via het waterstofnet.

Eindgebruik waterstof: Als de eindgebruiker waterstof gebruikt (links in Figuur 2) zijn de hoogste eindscores voor alle leveringsketens met vloeibare waterstof (oranje bolletje) en voor de leveringsketens met centrale conversie van beide LOHC's: MCH (grijs) en DBT (geel). De allerhoogste scores krijgen de leveringsketens met centrale conversie in de importhaven en daarna invoeding in het waterstofnet (linkergrafiek, meest rechtse kolom). Daarna volgen decentrale conversie van ammoniak (lichtblauw) mits de ammoniak wordt vervoerd per buisleiding, en de leveringsketens voor LSM (groen) en methanol (paars). De overige ammoniakketens en natriumboorhydride (donkerblauw) sluiten de rij.

⁴ Voor informatie over individuele scores op publieke belangen, zie hoofdstuk 6 van het hoofdrapport.

⁵ Voor eindscores van de varianten, zie hoofdstuk 7 van het hoofdrapport.

Eindgebruik waterstofdrager: Als de waterstofdrager zelf wordt gebruikt, hebben de ketens met transport van methanol (paars) en methaangas uit LSM (groen) per (aardgas)buisleiding de hoogste scores (grafiek rechts).⁶ Gebruik van vloeibare waterstof (oranje) volgt daarna en ten slotte ammoniak (lichtblauw). Leveringsketens op basis van decentrale synthese met waterstof uit het waterstofnet krijgen de laagste eindscores, behalve in het geval van vloeibare waterstof. De lage eindscore komt door de kosten en externaliteiten van de extra ketenstap synthese; in het geval van vloeibare waterstof zijn die beperkt.



Figuur 2: Eindscores leveringsketens basissituatie 2030; waterstof eindgebruik (links) en eindgebruik drager (rechts) in grafiek (boven) en tabelvorm (onder).

CONCLUSIES

De resultaten laten zien dat er meerdere leveringsketens zijn met een goede eindscore. Verschillen zijn vaak klein (honderdsten op de schaal van 0 tot 1) en worden beïnvloed door de weging van de publieke belangen, de aannames voor de modellering en de, ondanks diepgaande analyse van de literatuur, aangetroffen onzekerheden in de datasets. Op termijn kunnen de eindscores en de rangordes door o.a. innovaties veranderen. Welk alternatief de hoogste score krijgt, hangt ook af van het soort eindgebruik dat wordt beoogd en van de locatie van de eindgebruiker. Als zich een brede waterstofmarkt ontwikkelt, lijkt er daarom ruimte te zijn voor verschillende soorten dragers en verschillende leveringsketens.

⁶ De mogelijke emissies van de dragers methanol en LSM die na de poort van de eindgebruiker optreden zijn buiten scope. De variatie aan eindgebruik-apparatuur is te groot om mee te kunnen nemen in de MCA-vergelijking.

Conclusies voor gebruik waterstofgas of direct gebruik drager

Direct eindgebruik van de waterstofdrager krijgt over het algemeen een hogere score dan gebruik van waterstof na conversie van de drager. Dit geldt met name voor methanol en LSM omdat bij eindgebruik als drager geen uitstoot van broeikasgassen bij *steam reforming* plaatsvindt.⁷ NB Bij het buiten scope van dit onderzoek geplaatste eindgebruik kunnen alsnog broeikasgassen vrijkomen. Direct gebruik van een waterstofdrager waarvoor decentrale synthese bij de eindgebruiker plaatsvindt met waterstof uit het landelijke net heeft een lagere score dan de andere leveringsketens voor direct eindgebruik.

Conclusies voor locatie conversie

Centrale conversie in de importhaven heeft een voordeel boven decentrale conversie in het binnenland. Centrale conversie voorkomt kosten, energieverlies en emissies tijdens transport, en de omgevingsrisico's van het transport. Centrale conversie van dragers naar waterstof in de importhaven en transport via het waterstofnet levert daarom een hogere score op dan leveringsketens met decentrale conversie in het binnenland.

Conclusies voor locatie eindgebruik

Uit de vergelijking van de basissituatie met de variant importhaven, de variant doorvoer en export en de gevoeligheidsanalyse opslag en conversie buitengaats blijkt dat de locatie van eindgebruik invloed heeft op de hoogte van de score en op de rangorde. Zowel bij eindgebruik in de haven als bij eindgebruik in het buitenland liggen de scores hoger dan bij gebruik in Nederland op 200 km afstand van de importhaven (de basissituatie). Dit komt doordat de nadelige effecten van de leveringsketen (het transport en decentrale conversie) deels wegvallen. Bij opslag en conversie buitengaats zijn de scores van enkele ammoniakketens hoger dan in de basissituatie doordat de blootstelling aan veiligheidsrisico's vermindert.

De rangorde van de verschillende dragers blijft min of meer gelijk ongeacht of de eindgebruiker in de haven, op 200 km afstand of in de buurlanden zit. De dragers met de hoogste scores blijven vloeibare waterstof en de twee LOHC's voor eindgebruik van waterstofgas, en methanol en LSM voor eindgebruik van de drager.

Importhaven

Eindgebruik in de haven heeft de hoogste scores door het (vrijwel) wegvallen van kosten en externaliteiten van binnenlands transport. De distributie in de haven naar eindgebruikers verloopt immers over zeer korte afstanden zodat dit minimale effecten (in het rekenmodel op nul afgerond) heeft op de scores.

De scores van de verschillende dragers worden beperkt beïnvloed door de modaliteit. Hierdoor leidt het wegvallen van de effecten van binnenlands transport bij eindgebruik in de haven niet tot een grote verschuiving. Hierop zijn twee uitzonderingen.

- Het binnenlands transport is sterk bepalend voor de score op Veilig. De ammoniakketens met binnenlandse transport van ammoniak krijgen daarom een lagere score door het

⁷ *Steam reforming* is de naam voor het conversieproces waarbij de koolstofhoudende dragers methaan of methanol met behulp van stoom worden omgezet naar waterstof en CO₂. In dit rapport soms ook afgekort tot *reforming*.

risico op een incident met een gifwolk. Als deze ketenstap wegvalt, verbetert de score voor ammoniak meer dan voor andere dragers.

- De tweede uitzondering betreft de twee LOHC's. Door het grotere aantal transportbewegingen vanwege het lage waterstofgehalte voor conversie en de noodzaak voor een dubbele set buisleidingen vanwege de retourstroom is de invloed van het binnenlands transport voor deze dragers groter. Het wegvallen hiervan zorgt voor een relatief grote verbetering voor het transport per buis, spoor, weg en water.

Doorvoer en export naar Duitsland

Bij eindgebruik in buurlanden na doorvoer en export vallen de effecten van de ketenstappen decentrale opslag bij de eindgebruiker en conversie in Nederland weg (indien van toepassing). Hierdoor krijgen verschillende leveringsketens een iets hogere score. Dit heeft het grootste effect voor de ammoniakketens en de LOHC's. De score voor ammoniak wordt gunstiger omdat het veiligheidsrisico, de milieu-emissies en het ruimtebeslag afnemen (voor de decentrale opslag en conversie komen deze in het buitenland terecht).

De scores voor leveringsketens waarbij geen sprake is van decentrale conversie en opslag verschillen in principe niet van de basissituatie. Dit is bij eindgebruik van waterstof het geval voor de leveringsketens met centrale conversie en bij direct eindgebruik van de drager voor transport via buisleiding.

Opslag en conversie buitengaats

Als opslag en conversie buitengaats plaatsvinden op een olie- of gasplatform, energie-eiland of drijvende installatie op de Noordzee verbetert de eindscore voor de ammoniakketens. De keten met buitengaats conversie krijgt een bijna even hoge score als de ketens van vloeibare waterstof en de LOHC's met centrale conversie. Dit komt doordat er minder impact is in geval van incidenten (omgevings- en cyberveiligheid en terrorisme), en minder impact van milieu-emissies. Er is geen noemenswaardig netto effect op de resultaten voor de andere dragers: de effecten op die scores zijn hiervoor te klein. De conclusie is dat buitengaats opslag en conversie zinvol kan zijn voor dragers met een hoog veiligheidsrisico.

Conclusies voor gebruik modaliteit

De resultaten tonen een voordeel voor leveringsketens die gebruik maken van het waterstofnet na conversie in de importhaven. De volgorde van modaliteiten is per waterstofdrager over het algemeen dat ketens via het waterstofnet de hoogste scores hebben, gevolgd door ketens met buistransport van de drager. Daarna komen doorgaans ketens met vervoer per spoor of schip, en tenslotte wegtransport. Deze volgorde geldt ook voor ketens met eindgebruik van de drager.

De keuze voor de modaliteit heeft een beperkte impact op de uitkomsten, behalve voor de publieke belangen Veilig, Betrouwbaar en Toegankelijk. Daarom is er voor ammoniak wel een sterk voordeel voor transport met een buisleiding (eindgebruik als drager) of het waterstofnet (eindgebruik als waterstof). Voor het publieke belang Betrouwbaar heeft transport over water een lagere score door het risico op verstoringen als gevolg van hoog- of laagwater. Op het belang Toegankelijk krijgt transport van methaangas uit LSM via het aardgasnet een hogere score dan transport van dragers via andere buisleidingen of het waterstofnet vanwege het fijnmazige netwerk en de lage transportkosten van het aardgasnet.

Conclusies voor typen eindgebruikers

Per type eindgebruiker worden alleen de van toepassing zijnde leveringsketens vergeleken.

Industrieclusters

Bedrijven in de vier industrieclusters in de importhavens, Chemelot in het binnenland en in industrieclusters in Duitsland krijgen in de komende jaren toegang tot het waterstofnet. Daarmee worden alle ketens waarin het waterstofnet een rol speelt toepasbaar. Als het gaat om de herkomst van de waterstof in het netwerk, dan is de voorkeursvolgorde uit oogpunt van gewogen publieke belangen als de waterstof uit het waterstofnet komt: vloeibare waterstof, de LOHC's, ammoniak, LSM, methanol en natriumboorhydride.

Voor een industriecluster in het binnenland of Duitsland dat langs een buisleiding voor dragers ligt is *decentrale* conversie naar waterstof ook een optie. Dit leidt in het geval van methanol- en LSM-import tot een vergelijkbare score als voor conversie in de importhaven en transport via het waterstofnet. Echter de scores zijn voor LSM en methanol beduidend lager dan voor centrale conversie van vloeibare waterstof en de LOHC's en transport via het waterstofnet. Dit komt vooral door de broeikasgasemissies in de methanol- en LSM-ketens. Oplossing van het probleem van de CO₂-uitstoot door toepassing van *direct air capture* (DAC, CO₂-afvang uit de atmosfeer) of *carbon capture and storage* (CCS, CO₂-afvang en opslag) kan dit veranderen. Voor ammoniak en de LOHC's is de score voor decentrale conversie na buisleidingvervoer lager dan voor de leveringsketens via het waterstofnet.

Direct eindgebruik van dragers kan nodig zijn vanwege proceseisen van de eindgebruiker (bijv. als grondstof of om bepaalde vlameigenschappen te bereiken). De mate waarin eindgebruikers flexibel zijn bij een keuze tussen meerdere dragers, verschilt per eindgebruiker. Als het gaat om gebruik als brandstof hebben gebruikers wel enige flexibiliteit om te kiezen tussen methaan, ammoniak en eventueel zelfs methanol.

Cluster-6-industrie

In tegenstelling tot de industrieclusters zullen de cluster-6-bedrijven veelal niet op korte termijn aan het waterstofnet aansluiten. Deze bedrijven zullen via weg, water, spoor of buisleiding van dragers moeten worden voorzien.

Als cluster-6-bedrijven de keuze hebben, heeft centrale conversie en transport via het waterstofnet in vrijwel alle gevallen een hogere score. Geen toegang hebben tot het waterstofnet is dus uit oogpunt van de gewogen publiek belangen een nadeel. Als gunstigste opties voor cluster-6-bedrijven zonder aansluiting op het waterstofnet komen vloeibare waterstof en de LOHC's uit de bus, op enige afstand gevolgd door LSM en methanol, ammoniak en natriumboorhydride. De modaliteit met de hoogste scores na het waterstofnet is de (meestal evenmin beschikbare) buisleiding, gevolgd door transport via spoor, water en weg.

Voor direct eindgebruik van de drager is de vergelijking met andere dragers niet relevant in geval van gebruik als grondstof omdat de rol van de drager in het productieproces doorslaggevend is voor de keuze, zie bij industrieclusters.

Kunstmestindustrie

Voor de kunstmestindustrie die ammoniak nodig heeft, krijgen direct gebruik in de haven, aanvoer van ammoniak met een buisleiding en aanvoer per binnenvaart (zonder conversie voordat de

grondstof de fabriek bereikt) een hogere score op de gewogen publieke belangen dan ammoniak-synthese uit het waterstofnet (met zowel conversie als decentrale synthese in Nederland). De conversies verhogen de kosten, het energieverlies, de emissies, het ruimtegebruik en de omgevingsrisico's van de betreffende leveringsketen. Ammoniak-synthese met waterstof uit *steam reforming* van methaangas uit LSM zal (hoewel als samengestelde keten niet expliciet onderzocht) waarschijnlijk ook een lagere score krijgen omdat sprake is van meerdere conversiestappen.

Elektriciteitscentrales

Voor CO₂-vrije flexibele elektriciteitsopwekking heeft direct gebruik van methaangas uit LSM – met transport via het aardgasnet – in een elektriciteitscentrale de hoogste score op de gewogen publieke belangen, gevolgd door gebruik van waterstof via het waterstofnet afkomstig uit vloeibare waterstof en de twee LOHC's.

Direct gebruik in een elektriciteitscentrale van ammoniak na buisleidingvervoer heeft een hogere score dan gebruik van waterstof uit ammoniak na centraal kraken, maar een lagere score dan van waterstof uit centraal verdampte vloeibare waterstof en de twee LOHC's. De aanvoer van ammoniak per binnenvaartschip heeft een lagere score dan gebruik van waterstof uit ammoniak na centrale conversie. Hierbij gaan we uit van een vergelijkbaar energierendement bij verbranding van waterstof, methaan en ammoniak. Decentraal eindgebruik van ammoniak na transport via weg, water of spoor levert aanmerkelijk lagere scores op dan direct gebruik na buisleidingtransport, met name door de lagere score van deze modaliteiten op het publieke belang Veilig (vanwege het risico op een gifwolk en het risico van verkeersongevallen).

Wegtankstations

Voor levering aan wegtankstations is vloeibare waterstof met tankauto's meestal het alternatief met de hoogste score, voor klanten van zowel vloeibare als gecombineerde waterstof. De route via het waterstofnet, als we rekening houden met een extra zuiveringsstap, is alleen gunstiger dan vloeibare waterstof via de weg als de waterstof in het netwerk afkomstig is van vloeibare waterstof of de LOHC's. Op veel plekken in Nederland zal het waterstofnet te ver weg liggen om tankstations hierop aan te sluiten. Waar de afstand klein is, zullen de kosten van aansluiting vaak prohibitief zijn. In de meeste gevallen is levering in de vorm van vloeibare waterstof daarom een beter alternatief.

Bunkerstations

Voor bunkeren van de scheepvaart is de conclusie dat levering van methanol en vloeibare waterstof met tankwagens of bunkerschepen (eventueel aan vaste bunkerstations) een hogere score heeft op de gewogen publieke belangen dan soortgelijke levering van ammoniak.

Conclusies voor verschillen zichtjaren

In de variant 2050 profiteren LSM en methanol sterk van de vermindering van CO₂-uitstoot door het gebruik van DAC in plaats van een industriële puntbron als bron voor CO₂ bij de synthese. Hierdoor verandert de rangorde in 2050 ten opzichte van de basissituatie in 2030. Methanolketens krijgen ook bij eindgebruik van waterstof de hoogste scores en LSM-ketens krijgen aan de LOHC's vergelijkbare scores. Over de hele linie vallen de scores iets hoger uit. Dit komt door de verwachte procesverbeteringen (energie-efficiëntie, kostenniveau) en doorontwikkeling van de

technology readiness levels. De aanname van *net-zero*-emissietransport⁸ voor de zeevaart verbetert de positie van alle ketens en vooral die met veel transportvolume zoals voor de LOHC's. Ketens van natriumboorhydride krijgen een hogere score door lagere energiekosten dan in de basissituatie.

De verwachte toename van het (import)volumen leidt niet tot een verandering in rangordes, maar is wel relevant in de fysieke leefomgeving in verband met grenzen aan de capaciteit van weg, spoor en binnenvaart en beschikbare ruimte.

Conclusies voor dominante factoren eindscores

Dominante factoren voor de eindscores zijn de stoffeïenschappen, de importkosten van de drager, de weegfactoren, en voor LSM en methanol het toepassen van CCS of DAC. De modaliteitskeuze en de kosten van de ketenstappen in Nederland hebben een kleinere invloed op de totale score, net als de transportafstand over zee en het gebruik van progressievere aannames voor de ontwikkeling van de energie-efficiëntie van conversie- en syntheseprocessen.

Effect van stoffeïenschappen

Voor de eindscores sterk bepalende kenmerken van de dragers zijn hoe groot de veiligheidsrisico's (publiek belang Veilig) zijn, of er broeikasgas- (Duurzaam) en overige emissies (Milieu) optreden, hoe energie-intensief (Duurzaam) de conversie is en hoe in de daarbij benodigde energie wordt voorzien (elektrisch, gebruik van de drager, restwarmte). Soortelijk gewicht en waterstofgehalte van de dragers voor conversie zijn medebepalend voor het importvolume, en dat is een grootheid die doorwerkt op (bijna) alle publieke belangen.

- *Veilig en Milieu*: Ammoniak komt lager in de rangorde vanwege de door de Delphi-groep zwaar gewogen lage score op de publieke belangen Veilig en Milieu en de door de groep licht gewogen lage score op Rechtvaardig. De hoogste score voor een ammoniakketen is in het geval van direct eindgebruik na buistransport en in geval van gebruik van waterstofgas na centrale conversie en transport via het waterstofnet. De experts schatten ketens met transport van ammoniak door buisleidingen als veiligste in. Als waterstofgas nodig is dan is het veiliger om de waterstof via het waterstofnet te transporteren na centrale conversie van ammoniak. Transport over de weg van ammoniak krijgt juist een zeer lage score.
- *Duurzaam (broeikasgas)*: De koolstofhoudende dragers methanol en LSM krijgen bij eindgebruik van waterstof een lagere score doordat er bij *steam reforming* CO₂-uitstoot is.⁹
- *Duurzaam (energieverlies en materiaalgebruik)*: Natriumboorhydride ondervindt een sterk nadeel op het publieke belang Duurzaam vanwege het hoge energieverlies bij de productie en terugwinning van het dragermateriaal (in het exportland) en het hoge materiaalgebruik.

⁸ *Net-zero* verwijst naar een situatie waarin de uitstoot van broeikasgassen in evenwicht is met de emissiereducties. Er kunnen nog steeds CO₂-emissies worden uitgestoten bij transport, maar er wordt evenveel CO₂ uit de atmosfeer verwijderd als erin wordt uitgestoten.

⁹ Als het eindgebruik van methanol of methaan verbranding betreft komt er alsnog CO₂ in de atmosfeer. Als de methanol en methaan gebruikt worden als grondstof wordt de koolstof langer vastgelegd, afhankelijk van het product.

Effect importkosten

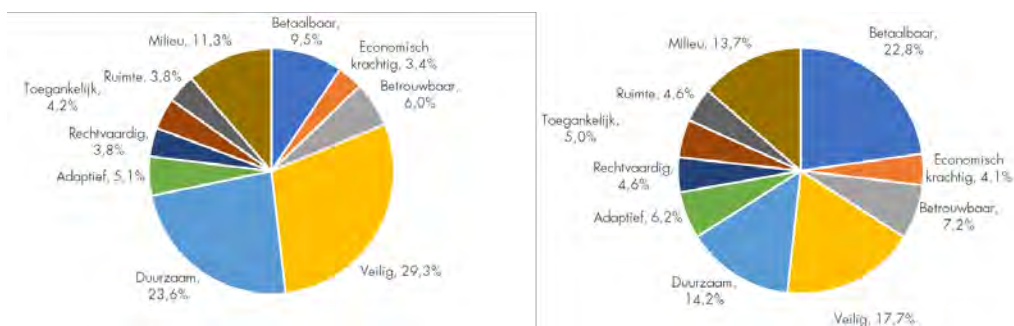
Importkosten zijn sterk bepalend voor de totaalkosten en de score op het publieke belang Betaalbaar. Ketenstappen in Nederland hebben een veel kleinere impact op kosten. Ammoniak en methanol profiteren hiervan omdat deze de laagste importkosten hebben volgens de gekozen brondata (HyDelta). Het voordeel van deze lage importkosten is groter dan het nadeel dat een deel van deze dragers in het conversieproces wordt ingezet voor proceswarmte. De ketens met natriumboorhydride ervaren juist een nadeel door hoge importkosten.

In de literatuur verschillen de kosten aanzienlijk. Er is daarom een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met een andere bron voor de kostendata. Het gebruik van de JRC-kostendata (hoge scenario) zorgt voor kleine verschuivingen in de scores. Ketens met ammoniak en methanol (beide duurder in JRC dan in HyDelta) krijgen een iets lagere score en met vloeibare waterstof (duurder in HyDelta dan in JRC) een iets hogere score. De ketens met de hoogste scores voor eindgebruik van waterstofgas en van de waterstofdrager blijven dezelfde maar de onderlinge volgorde verandert; ketens met vloeibare waterstof (eindgebruik waterstof) en LSM (eindgebruik drager) staan hoger, en met de LOHC's (eindgebruik waterstof) en methanol (eindgebruik drager) iets lager.

Effect weegfactoren

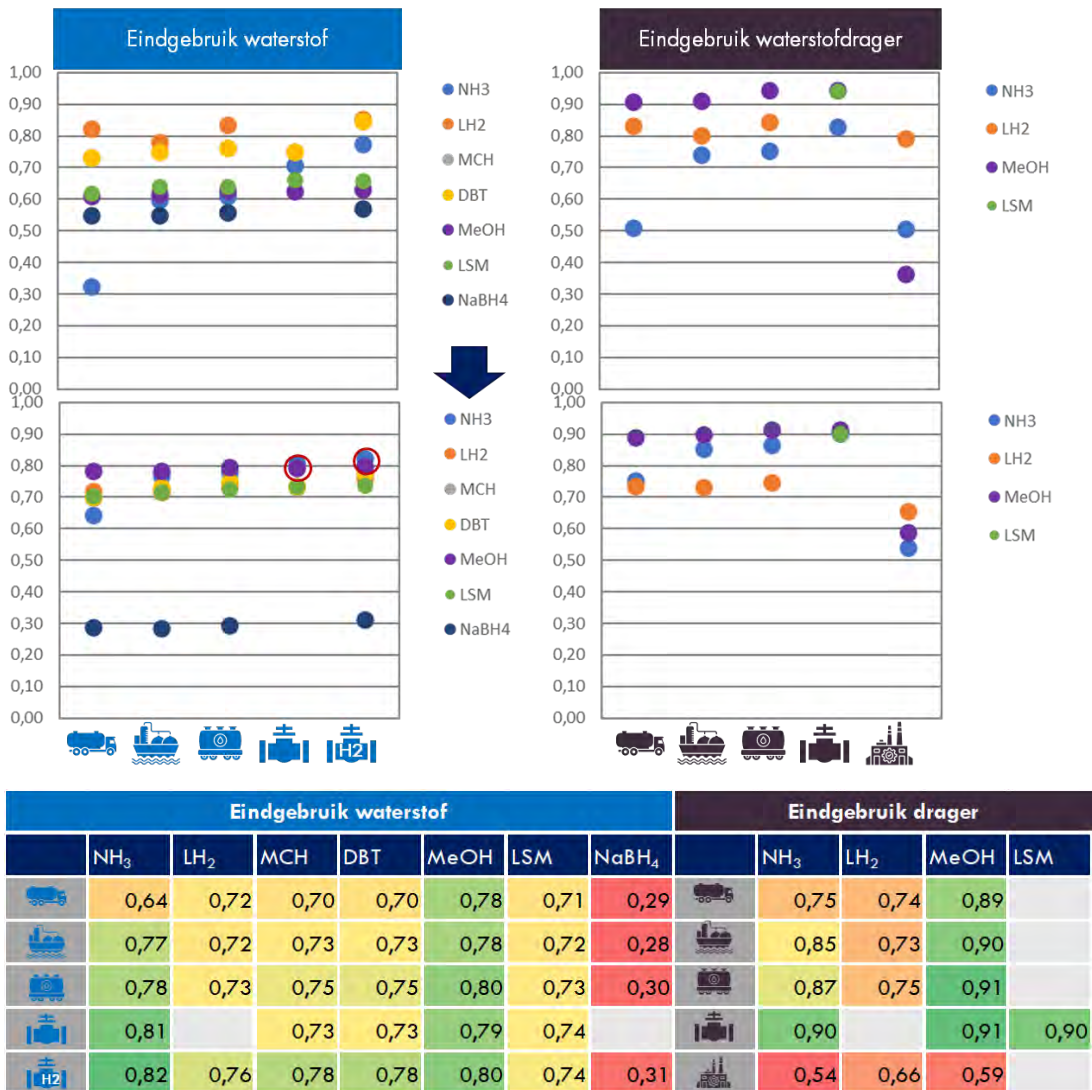
De weging van de publieke belangen heeft grote invloed op de eindscores. Deze impact van de weging blijkt uit drie gevoeligheidsanalyses die hiervoor zijn uitgevoerd met variaties op de Delphi-weging.

Ter illustratie van het belang van weegfactoren toont het rechterdiagram in Figuur 3 de resultaten als het publieke belang Betaalbaar voorop wordt gesteld.¹⁰ Verdubbeling van het gewicht van het publieke belang Betaalbaar en halvering van de publieke belangen Veilig en Duurzaam ten opzichte van de weegfactoren uit het Delphi-proces, leiden ertoe dat ammoniak dicht bij de alternatieven met de hoogste scores komt. Ammoniak centraal of na buistransport decentraal gekraakt krijgt zelfs de hoogste score voor eindgebruik van waterstof.



Figuur 3: Visualisatie van de verandering in weging; links Delphi-weging van basissituatie, rechts weegfactoren bij aangepaste weging

¹⁰ Voor meer gevoeligheidsanalyses met betrekking tot wegingsfactoren, zie het hoofdrapport.



Figuur 4: Gevoeligheidsanalyse aangepaste weging met Betaalbaar voorop; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Effect CO₂-afvang en opslag (CCS)

De eindscores voor koolstofhoudende dragers zijn sterk gevoelig voor het al dan niet toepassen van CCS. Het afvangen en opslaan van CO₂ bij conversie naar waterstof is per saldo zeer gunstig voor methanol en LSM. Levering via het waterstofnet van waterstof afkomstig van methanol krijgt een even hoge score als levering via het waterstofnet van waterstof afkomstig van vloeibare waterstof en een hogere score dan na decentrale conversie van vloeibare waterstof bij transport over de weg, het spoor of water. Met CCS behaalt ook LSM een hoge score. Eenzelfde effect is zichtbaar op termijn als wordt uitgegaan van DAC bij de synthese van deze dragers.

De conclusie is dat import van methanol en LSM voor eindgebruik als waterstof uit oogpunt van publieke belangen pas interessant wordt als CCS toegepast wordt in de keten of als DAC een reële optie is (in 2050). Dat geldt waarschijnlijk ook voor afvang van de CO₂ voor benutting bijvoorbeeld als chemiegrondstof (CCU), maar dat valt buiten scope van dit onderzoek.

Effect transportafstand

Als dragers van verder weg ingevoerd worden (bijvoorbeeld uit Argentinië in plaats van Marokko) is er weinig effect op de eindscores. De meeste scores dalen iets door de hogere kosten en emissies van het langere scheepstransport. Op de verhoudingen tussen de verschillende ketens hebben de aanpassingen weinig effect. De conclusie is dat een langere transportafstand nauwelijks invloed heeft op de scores en ranking.

Progressieve aannames 2050

Progressievere aannames voor de afname van het energieverlies voor de conversieprocessen hebben weinig invloed op de onderlinge verhouding van de ketens. Hoewel de scores wel iets hoger uitvallen wanneer de drager gebruikt wordt als brandstof in conversieprocessen (in het geval van ammoniak, methanol en LSM), heeft dit geen effect op de ranking. De conclusie is dat de progressievere aannames weinig impact hebben op de eindscores.

Conclusies voor afzonderlijke dragers

Aanvullend op de eerder getrokken conclusies kunnen we op basis van de multicriteria-analyse ook specifieke conclusies over de verschillende dragers trekken.

Vloeibare waterstof

Vloeibare waterstof heeft in verschillende situaties de hoogste of in ieder geval een hoge score, en komt dus goed tegemoet aan de verschillende publieke belangen. Vloeibare waterstof moet er echter wel in voldoende mate zijn. Op dit moment is het *technology readiness level* van de verschillende ketenstappen nog een uitdaging. Zolang er nog onvoldoende import- en distributiemogelijkheden zijn, zal er daarom naar alternatieven moeten worden gekeken.

LOHC's

De LOHC's hebben net als vloeibare waterstof hoge scores en zijn makkelijk in te passen in bestaande en vrijkomende infrastructuur. Wel is sprake van een retourstroom van de waterstof-arme variant en een laag waterstofgehalte voor conversie per massa-eenheid. Hierdoor is er tweemaal zoveel opslag nodig en is het transport minder efficiënt. Dit heeft vooral bij buisleidingstransport een grote impact, omdat de standaard diameter voor bestaande buisleidingen die voor de LOHC's geschikt zouden kunnen zijn kleiner is dan voor andere dragers. Ook is er een retourbuisleiding nodig. De LOHC's krijgen daarom een veel hogere score bij centrale conversie in de importhaven dan bij transport van de drager.

Methanol

Methanol heeft in de basissituatie een score in de middenmoot bij conversie naar waterstof maar bij direct gebruik van de drager, bij gebruik van CCS en in variant 2050 (met DAC) juist de hoogste score. De conclusie is dat import van methanol voor *eindgebruik als waterstof* uit oogpunt van publieke belangen pas interessant wordt als CCS toegepast wordt in de keten of de CO₂ via DAC wordt verkregen.

Bij direct eindgebruik van methanol krijgt transport via buisleiding of spoor de hoogste score. Dit komt door de iets lagere transportrisico's (Veilig) en de iets lagere kosten per ton voor het achterland (Betaalbaar en Toegankelijk). Transport per binnenvaartschip heeft een nadeel als gevolg van de laag- en hoogwatersituaties (Betrouwbaar). Methanol als waterstofdrager kan al op korte termijn worden ingepast.

LSM

LSM heeft net als methanol in de basissituatie bij conversie naar waterstof een score in de middenmoot maar bij direct gebruik van de drager, bij gebruik van CCS en in variant 2050 een veel hogere score. De conclusie is dat import van LSM voor eindgebruik als waterstof interessant wordt als het CO₂-probleem wordt opgelost. In dat geval is LSM een optie die al op korte termijn kan worden ingezet (mits CCS beschikbaar is) en die dan een hoge score heeft op het gebied van Betrouwbaar (weinig risico's door de bestaande fossiele keten), en Toegankelijk (beperkte meerkosten achterland).

Ammoniak

Groene ammoniak komt op korte termijn al beschikbaar, ingepast in de voor grijze ammoniak ontwikkelde infrastructuur. Het heeft een lage score op Veilig, een publiek belang dat in de Delphi-weging zwaar wordt gewogen. Hierdoor valt de eindscore ondanks hoge scores op andere belangen laag uit. Vanwege de lage score op Veilig is er een duidelijke voorkeur voor centrale conversie, mogelijk buitengaats, en transport via het waterstofnet bij eindgebruik van waterstof. Bij direct gebruik van ammoniak is de optie waterstofnet gevolgd door decentrale synthese bij de eindgebruiker vanuit de publieke belangen minder wenselijk. Gebruik van ammoniak in de importhaven en daarna binnenlands transport per buisleiding hebben dan de voorkeur om de risico's van een mogelijke gifwolk zoveel mogelijk te beperken. Als er (nog) geen ammoniakbuisleiding is, zijn de leveringsketens met de hoogste scores voor direct eindgebruik die met transport per spoor of binnenvaartschip.

Natriumboorhydride

Natriumboorhydride heeft hoge scores op Milieu (nauwelijks milieuemissies), Veilig (kleine risico's omdat het explosiegevaar laag is bij droge opslag) en Rechtvaardigheid (omdat de externe kosten een fractie van de kostprijs vormen). Desalniettemin heeft het een lage eindscore vanwege de hoge kosten en het hoge energieverlies en materiaalgebruik. De specifieke eigenschappen van natriumboorhydride, waaronder de vaste vorm die het geschikt maakt voor langdurige opslag van energie, maken de drager in potentie goed bruikbaar voor nichetoepassingen. Zolang de energie in het buitenland niet gratis is en boor een kritieke grondstof is, blijft natriumboorhydride echter een relatief lage score houden.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	iii
Management samenvatting	v
Het onderzoek	v
De resultaten.....	vi
Conclusies.....	viii
Afkortingen en begrippen	xxi
HOOFDSTUK 1 Inleiding	1
1.1 Visie waterstofdragers	1
1.2 Import van waterstofdragers	1
1.3 Verantwoording	2
1.4 Leeswijzer.....	3
Vergelijking waterstofdragers Deel A: Methodiek.....	4
HOOFDSTUK 2 Onderzochte ketens en eindgebruikers	5
2.1 Selectie waterstofdragers	5
2.2 Selectie van ketens	8
2.3 Combinaties van ketens en waterstofdragers	11
2.4 Relevantie van ketens voor typen eindgebruikers	14
2.5 Varianten	17
2.6 Volumeverschillen TUSSEN ketens	17
HOOFDSTUK 3 Publieke belangen: concretisering.....	19
3.1 Betaalbaar	21
3.2 Economisch krachtig.....	21
3.3 Betrouwbaar.....	22
3.4 Veilig	23
3.5 Duurzaam	24
3.6 Adaptief	25
3.7 Rechtvaardig	26
3.8 Toegankelijk	27
3.9 Ruimte.....	27
3.10 Milieu	28
HOOFDSTUK 4 Methodiek multicriteria-analyse	30
4.1 Bepalen van de scores op de publieke belangen	30
4.2 Normalisatie van de scores op de publieke belangen	31
4.3 Weging van de publieke belangen.....	32
4.4 Rangschikking van de alternatieven	33

4.5	Gevoeligheidsanalyse	34
	Vergelijking waterstofdragers Deel B: Uitkomst Delphi-sessie	35
	HOOFDSTUK 5 Resultaten weging.....	36
5.1	Weegfactoren publieke belangen	36
5.2	Weegfactoren indicatoren	37
5.3	Vergelijking met 100-puntenweging	40
5.4	Argumenten gebruikt bij Delphi-weging	41
	Vergelijking waterstofdragers Deel C: Resultaten.....	46
	HOOFDSTUK 6 Scores op publieke belangen	47
6.1	Wijze van presentatie resultaten	47
6.2	Scores op publieke belang Betaalbaar	48
6.3	Scores op publieke belang Economisch krachtig.....	52
6.4	Scores op publieke belang Betrouwbaar.....	56
6.5	Scores op publieke belang Veilig	60
6.6	Scores op publieke belang Duurzaam	66
6.7	Scores op publieke belang Adaptief	73
6.8	Scores op publieke belang Rechtvaardig.....	77
6.9	Scores op publieke belang Toegankelijk	83
6.10	Scores op publieke belang Ruimte.....	88
6.11	Scores op publieke belang Milieu	92
	HOOFDSTUK 7 Eindscores	97
7.1	Eindscores basissituatie	97
7.2	Eindscores per eindgebruiker 2030	100
7.3	Eindgebruik in importhavens 2030.....	105
7.4	Doorvoer en export naar buitenland 2030	106
7.5	Situatie in 2050	107
7.6	Gevoeligheidsanalyses weegfactoren	109
7.7	Overige gevoeligheidsanalyses	115
	Vergelijking waterstofdragers Deel D: Conclusies en aanbevelingen.....	124
	HOOFDSTUK 8 Conclusies en aanbevelingen.....	125
8.1	Conclusies	125
8.2	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek.....	134
	Literatuurlijst	136
	Bijlage A: Bronnen en uitgangspunten modellering	142
	Bronnen	142
	Uitgangspunten modellering	144
	Bijlage B: Volume	147
	Bijlage C: Onderbouwing en toelichting	153
1.	Betaalbaar	153

2.	Economisch krachtig	162
3.	Betrouwbaar	165
4.	Veilig	173
5.	Duurzaam	181
6.	Adaptief	192
7.	Rechtvaardig	203
8.	Toegankelijk	204
9.	Ruimte	206
10.	Milieu	209
Bijlage D: Gewijzigde aannames voor 2050		213
Bijlage E: Toelichting normalisatie		216
Bijlage F: Toelichting Delphi en AHP		218
	Modified Delphi-aanpak	218
	Analytical Hierarchy Process (AHP)	219
Bijlage G: Toelichting VIKOR-methodiek		222
	Methode	222
	Voorbeeld	223
Bijlage H: Verschillen tussen LOHC's		225

AFKORTINGEN EN BEGRIPPEN

AHP	Analytical Hierarchy Process
BZK	Ministerie van Binnenlandse Zaken
CAPEX	Capital expenditures
CC(U)S	Carbon Capture, (Utilization) and Storage
CH ₄	Methaan (gasvormig)
CO ₂	Kool(stof)dioxide
DAC	Direct Air Capture
DBT	Dibenzyltolueen, dat samen met perhydrodibenzyltolueen een reversibel LOHC-paar vormt (waterstofarm respectievelijk waterstofrijk)
DME	Dimethylether
DRC	Delta-Rijn-Corridor
FPSO	Floating production storage and offloading
H ₂	Waterstof (diwaterstof wordt in het normale spraakgebruik waterstof genoemd)
IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
JenV	Ministerie van Justitie en Veiligheid
KEV	Klimaat- en Energieverkenning
KGK	Ministerie van Klimaat en Groene Groei
LCA	Life cycle analysis, levenscyclusanalyse
LH ₂	Vloeibare (liquid) waterstof
LNG	Liquid natural gas, vloeibaar aardgas
LOHC	Liquid organic hydrogen carrier, vloeibare organische waterstofdrager
LSM	Liquid synthetic methane, vloeibaar synthetisch methaan
MCA	Multicriteria-analyse
MCH	Methylcyclohexaan, dat samen met toluen een reversibel LOHC-paar vormt (waterstofrijk respectievelijk waterstofarm)
MeOH	Methanol
MKBV	Maatschappelijke kosten-batenvergelijking: studie vergelijking waterstofdragers ammoniak en LOHC in opdracht van ministerie van IenW
N ₂ O	Distikstofmonoxide ('lachgas')
NGO	Non-gouvernementele organisatie
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stikstofoxiden
NPE	Nationaal Plan Energiesysteem
OPEX	Operational expenses
S(N)CR	Selective (Non)-Catalytic Reduction
TRL	Technology Readiness Level
VIKOR	Ranking methode multicriteria-analyse, in het Servisch: VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
ZZS	Zeer zorgwekkende stoffen

1.1 VISIE WATERSTOFDRAGERS

In de [Kamerbrief](#) van 17 maart 2023 bij de studie [Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers](#) (Arcadis, Berenschot en TNO) is een visie op waterstofdragers aangekondigd door de ministeries van Klimaat en Groene Groei (KGG) en Infrastructuur en Waterstaat (IenW). Het ministerie van KGG vraagt als bouwsteen voor deze op te stellen visie om een vergelijking tussen uiteenlopende waterstofdragers voor specifieke ketens in en door Nederland. De vergelijking wordt gebaseerd op de publieke belangen die een rol spelen in de energie- en grondstoffentransitie, zoals beschreven in het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE).

Het onderzoek *Vergelijking waterstofdragers* bestaat uit een uitgebreide multicriteria-analyse (MCA) van verschillende ketens van waterstofdragers op de volgende 10 publieke belangen:

- Betaalbaar en Economisch krachtig
- Betrouwbaar en Veilig
- Duurzaam en Adaptief
- Rechtvaardig en Participatief¹¹
- Ruimte en Milieu

Het publieke belang Adaptief maakt geen onderdeel uit van de publieke belangen in het NPE, maar is in overleg met de opdrachtgever hieraan toegevoegd.

Doel van het onderzoek is om de feitenbasis voor deze op te stellen visie op orde te brengen en zo KGG en andere ministeries te ondersteunen bij het maken van beleidskeuzes. Dit betreft beleid met betrekking tot fysieke stromen van waterstofdragers in en door Nederland, en de mate waarin, de wijze waarop, en de voorwaarden waaronder het kabinet deze stromen in en door Nederland wil faciliteren en eventueel stimuleren. Het gaat daarbij om import en transport voor eindgebruik in zowel Nederland als naar het Europese achterland (in het bijzonder Duitsland).

Er is gekeken naar (infrastructuur voor) invoer, op- en overslag, conversie en transport binnen Nederland, met aandacht voor de verschillende transportmodaliteiten (via weg, spoor, water en buisleidingen). Voor zover waterstofdragers in Nederland worden geproduceerd, wordt dat deel van de keten voor waterstofdragers ook meegenomen.

1.2 IMPORT VAN WATERSTOFDRAGERS

In de afgelopen jaren is een groot aantal studies gedaan op het terrein van waterstof en waterstofdragers. Deze studies hebben inzicht gegeven in de technieken, de deelsystemen en de kosten van duurzame alternatieven, maar nog beperkt in de – vaak complexe en moeilijk kwantificeerbare –

¹¹ Het publieke belang Participatief dat wij concretiseren als de mogelijkheid voor bedrijven om de importwaterstof te benutten, wordt om verwarring te voorkomen met participatieprocessen in dit rapport Toegankelijk genoemd.

publieke belangen en de beste omgang met onzekerheden in de ontwikkeling en transitie naar een nieuw duurzaam energiesysteem.

Import van waterstofdragers is sinds enkele jaren een belangrijk onderwerp, zowel voor gebruik in Nederland als voor doorvoer naar buurlanden, met name Duitsland. Het Rijk, de havenbedrijven en industrie spannen zich in om importovereenkomsten te sluiten met herkomstlanden, om ontvangstterminals te bouwen in de importhavens en om transportinfrastructuur aan te leggen (in het bijzonder het landelijke waterstofnet).¹²

Er zijn grote importvolumes voorzien, zoals de hierboven aangehaalde studie van Arcadis, Berenschot en TNO ook aangeeft. Deze onderzoeksbureaus hebben al een vergelijking van waterstofdragers opgeleverd, die zich richt op het aspect omgevingsveiligheid (externe veiligheid).¹³ Er zijn echter meer publieke belangen. Een deel is in de recent afgeronde [maatschappelijke kosten-baten-vergelijking \(MKBV\) waterstofdragers](#) van Arcadis en Berenschot betrokken, maar ook deze MKBV neemt niet alle genoemde belangen uit het NPE mee. Ook is de selectie van waterstofdragers in deze studies smaller dan de selectie die in de MCA met elkaar wordt vergeleken.

1.3 VERANTWOORDING

Uitgangspunt voor deze studie was het gebruik van bestaande literatuur ten aanzien van de technologie-, kosten- en marktontwikkeling voor waterstofdragers. Wij hebben hierbij o.a. gebruik gemaakt van onderzoek door Berenschot en Arcadis (MKBV)¹⁴, TNO (inventarisatie waterstofdragers)¹⁵, Joint Research Centre (kostenstudie¹⁶ en LCA-studie van import waterstofdragers¹⁷) en HyDelta¹⁸ (kosten importketens). De combinatie van deze en andere bronnen heeft tot nieuwe inzichten geleid, maar ook witte vlekken en inconsistenties zichtbaar gemaakt. Geen enkele studie neemt de complete voor dit onderzoek gekozen set waterstofdragers onder de loep, en ook niet vanuit het oogpunt van alle onderscheiden publieke belangen.

Hierdoor was ook eigen verzameling en analyse van basisdata nodig, enerzijds om verschillen tussen getallen in de aangereikte literatuur te kunnen verklaren, anderzijds om witte vlekken in te vullen door middel van expertsessies en aanvullende marktinformatie. Er zijn expertsessies gehouden over omgevingsveiligheid, cyberveiligheid en terrorisme, betrouwbaarheid van waterstofketens en adaptiviteit. Ook individuele bedrijven hebben informatie aangeleverd. In enkele gevallen is gebruik gemaakt van vertrouwelijk verkregen data. Deze informatie is niet herleidbaar verwerkt. Hierbij is wel telkens vergeleken met openbaar beschikbare data om in te schatten of de geleverde waarden plausibel zijn.

¹² [Kamerbrief Energiediplomatie en import van waterstof, 2 juni 2023](#)

¹³ Arcadis, Berenschot, Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers, 4 oktober 2021. De studie uit 2023: TNO, Arcadis, Berenschot, Omgevingskwaliteit van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers, focus op de te verwachten volumes per keten en de belasting van het Basisnet.

¹⁴ Berenschot, Arcadis (2024), MKBV waterstofdragers.

¹⁵ P. Wammes en M. Weeda (2024), Eigenschappen van waterstofdragers. Een overzicht voor visievorming over import van waterstof, TNO 2024 M10863.

¹⁶ JRC1: JRC, *Assessment of Hydrogen Delivery Options Feasibility of Transport of Green Hydrogen within Europe*, 2022.

¹⁷ JRC2: European Commission, Joint Research Centre, Arrigoni, A. et al (2024), *Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg

¹⁸ HyDelta (2022), WP7B Technical analysis, D7B.3 – *Cost analysis and comparison of different hydrogen carrier import chains and expected cost development*, 31 March 2022.

In de literatuur is relatief veel te vinden over de technische en marktontwikkeling van waterstof en -ketens, maar nog weinig over verschillende publieke belangen van eindgebruikers, omwonenden, de rest van de maatschappij en natuur zoals genoemd in het NPE. Om waterstofdragers op die publieke belangen te kunnen beoordelen is een concretisering van elk publiek belang nodig. Dit is in het NPE beperkt gedaan. We hebben daarom eigen inzichten, kennis en methodieken ontwikkeld om bruikbare indicatoren voor deze studie te vinden. De eigen methoden zijn gevoed met beschikbare basisdata en kentallen. Dit onderzoek is daardoor innovatief qua aanpak. De weegfactoren die wij hanteren bij het bepalen van de eindscores hebben we vastgesteld via een Delphi-aanpak met 21 deelnemers van verschillende achtergronden (overheid, ketenpartijen, kennisinstellingen en NGO's).

Tijdens het onderzoek is bijna wekelijks overlegd met de opdrachtgeversgroep (KGG, IenW) en minder frequent met een bredere interdepartementale begeleidingsgroep. De aanpak van het onderzoek en de resultaten zijn gepresenteerd in twee stakeholderbijeenkomsten die de ministeries van KGG en IenW hebben georganiseerd over de visie waterstofdragers (24 januari en 24 april 2024). Feedback uit de overleggen en bijeenkomsten is verwerkt in dit rapport.

1.4 LEESWIJZER

Dit rapport is opgedeeld in vier delen en bevat een aantal bijlagen met meer achtergrondinformatie.

Deel A methodiek, gaat in op de gebruikte methodiek.

- Hoofdstuk 2 geeft de onderzochte alternatieven, dat wil zeggen de gekozen leveringsketens van waterstofdragers en de relatie met de verschillende eindgebruikers.
- Hoofdstuk 3 licht de publieke belangen toe en beschrijft hoe we deze geconcretiseerd hebben.
- Hoofdstuk 4 presenteert de gevolgde methodiek van de multicriteria-analyse.

Deel B uitkomst Delphi-sessie, beschrijft in Hoofdstuk 5 de uitkomst van de Delphi-aanpak, namelijk de weegfactoren.

Deel C resultaten, beschrijft de verschillende resultaten: de scores op de publieke belangen, en de eindscores en gevoeligheidsanalyses.

- Hoofdstuk 6 presenteert per publiek belang de genormaliseerde scores voor de leveringsketens van de waterstofdragers voor verschillende eindgebruikers.
- Hoofdstuk 7 toont de uitkomsten van de combinatie van de scores op de indicatoren en de weegfactoren. Voor meerdere gebruikslocaties, zichtjaren en eindgebruikers wordt een rangschikking gepresenteerd. Ook zijn hier de resultaten van de gevoeligheidsanalyses vermeld.

Deel D bevat in Hoofdstuk 8 de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

In de bijlagen wordt per publiek belang een toelichting gegeven op de gebruikte data uit literatuurbronnen, en in enkele gevallen resultaten van expertsessies die zijn gehouden over meer kwalitatieve indicatoren waarover in de literatuur minder informatie te vinden is. Ook is hier achtergrondinformatie te vinden, o.a. over de gebruikte bronnen en uitgangspunten, de wijze van normalisatie en de VIKOR-methodiek.

VERGELIJKING WATERSTOFDRAGERS

DEEL A: METHODIEK

Voor dit onderzoek is het de uitdaging om een voldoende brede set waterstofdragers en ketens met verschillende eindgebruikers en locaties mee te nemen en tegelijk het onderzoek uitvoerbaar te houden. Samen met de opdrachtgever hebben we hierover keuzes gemaakt die uitmondten in 48 verschillende ketens. De resultaten en overwegingen zijn hieronder toegelicht.

2.1 SELECTIE WATERSTOFDRAGERS

De selectie van de te beschouwen waterstofdragers (in deze studie meestal afgekort tot ‘dragers’) is gemaakt op grond van de volgende criteria:

1. Is er in de aangereikte en zelf verzamelde literatuur voldoende keteninformatie om de waterstofdrager, zoveel mogelijk kwantitatief, te beoordelen op de publieke belangen?
2. Is er voor de waterstofdrager beleid en/of zijn er beleidsvragen te beantwoorden?
3. Zijn er initiatieven om de waterstofdrager te importeren in Nederland? Dit in het besef dat het een momentopname is en de situatie in de zichtjaren 2030 en 2050 anders kan zijn.

In onderstaande tabel staan in de linkerkolom de waterstofdragers die in de voorselectie zijn opgenomen. Er zijn nog veel meer potentiële waterstofdragers: TNO heeft een rapportage opgesteld met overzichten van alle thans bekende waterstofdragers en -derivaten en toepassingen van de verschillende waterstofderivaten.¹⁹ In de overige kolommen wordt ingegaan op de drie criteria.

¹⁹ P. Wammes en M. Weeda (2024), Eigenschappen van waterstofdragers. Een overzicht voor visievorming over import van waterstof, TNO 2024 M10863.

Tabel 1: Overzicht verschillende waterstofdragers

Waterstofdragers (voorselectie)	Keteninformatie literatuur	Is er beleid, zijn er nieuwe vragen?	Bekende importinitiatieven
H₂ vloeibaar	Meerdere studies, kosten, technologie, energie, omgevingsveiligheid	Geen beleid, nieuwe ontwikkeling	Amsterdam: Sunoco (voorheen Zenith) e.a. Rotterdam: Shell, ENGIE, Vopak e.a. (stilgelegd)
Ammoniak	Veel studies, kosten, technologie, energie, omgevingsveiligheid	Staan beleid, wordt herijkt voor binnenlands vervoer NH ₃	Terminals Rotterdam, Vlissingen, Chemelot (nu grijze, potentieel groene NH ₃)
LOHC ('liquid organic hydrogen carrier' reversibele paren): 1. Benzeen-Cyclohexaan (CHE) 2. Tolueen-Methylcyclohexaan (MCH) 3. Dibenzyltolueen perhydrodibenzyltolueen (DBT) 4. N-ethylcarbazol - perhydro-N-ethylcarbazol (NEC) 5. 1,2-Dihydro-1,2-azaborine (AB) – 1,2-BN Cyclohexaan (BNC) 6. Naftaleen-Decaline (DEC)	Meerdere studies met name over MCH en DBT, kosten, technologie, energie, externe veiligheid. Andere LOHC's met name chemisch-technische evaluaties, geen keteninformatie	Geen beleid, nieuwe ontwikkeling	Rotterdam: Chiyoda MCH Amsterdam: Hydrogenious (D)BT Pilot Hymove bij steenfabriek met NEC van Hynertec
Methanol*	Meerdere studies, zowel voor H ₂ -transport als voor direct eindgebruik	Staan beleid, geen beleidsvragen	Terminals Rotterdam en Amsterdam (nu grijze, potentieel e-methanol)
Vloeibaar synthetisch methaan (liquid synthetic methane, LSM)	Enkele studies over gebruik als H ₂ -drager, veel over LNG-keten	Staan beleid voor LNG, beleidsvragen eventueel i.r.t. CO ₂ -afvang en opslag of (her)gebruik	Niet bekend, maar potentieel via GATE en Eemshaven
Mierenzuur*	Weinig studies, wel over productie (Topsector Energie)	Geen beleid, nieuwe ontwikkeling	Geen bekende importinitiatieven, wel ambitie voor productie in Nederland (Coval/Twence)
Poeders (Na- of K-boorhydride, metaalhydrides)	Weinig studies in aange-reikte literatuur, in academische literatuur is wel (enige) informatie te vinden	Geen beleid, nieuwe ontwikkeling	Geen bekende importinitiatieven, wel ambities voor productie of levering in Nederland (Electriq, H2Fuel)

*) Deze worden soms ook als LOHC bestempeld, nl. LOHC met CO₂ als waterstofarme drager (o.a. RIVM 2022).

In de literatuur komen verder nog voor: de LOHC ethyleenglycol/ester, Fischer-Tropsch-producten (synthetische benzine, diesel of kerosine), dimethylether (DME), indirect transport via (gereduceerd) ijzerpoeder, oxymethyleenether, hydrazine, silanen (hydrosil), 'metal organic frameworks' (MOF), en gashydraten. Deze dragers zijn niet in de voorselectie opgenomen omdat ze op één of meer van de drie criteria ongunstig scoren. Het gaat veelal om nieuwe opties waar nog weinig keteninformatie over is, of om waterstofderivaten die overwegend in bestaande infrastructuur worden bijgemengd voor direct eindgebruik en thans niet in beeld zijn voor conversie naar waterstof (e-benzine, e-diesel, e-kerosine, DME, ...), of om stoffen die geen waterstof meedragen

maar in een oxidatiereactie zuurstof onttrekken aan water waarbij waterstof vrijkomt (zoals ijzerpoeder in een 'steam iron' proces).²⁰

Besloten is om mierenzuur niet in de studie mee te nemen. Voor mierenzuur is de keteninformatie beperkt, er zijn geen importplannen voor en ook geen bekende exportambities in waterstof-producerende landen. Dat laatste geldt ook voor boorhydride, maar omdat het een vaste stof is, met de belofte van lage risico's bij opslag en transport, is deze interessanter bevonden voor de vergelijking dan nog een vloeistof. Indien over een aantal jaar van meer dragers voldoende keteninformatie beschikbaar is, kunnen deze stoffen mogelijk wel onderzocht worden.

De uitkomst van de overwegingen is dat de MCA-studie is uitgevoerd met de volgende zeven waterstofdragers:

- Vloeibare waterstof (LH₂): door diepe koeling vloeibaar gemaakt waterstofgas;
- Ammoniak (NH₃): onder druk vloeibaar ('warme ammoniak') of gekoeld vloeibaar ('koude ammoniak') gemaakt gas;²¹
- Twee reversibele LOHC-paren (waterstofarm resp. waterstofrijk), namelijk Tolueen - methylcyclohexaan (TOL-MCH, kortweg: MCH) en Dibenzyltolueen - perhydrodibenzyltolueen (H0-DBT - H18-DBT, kortweg: DBT). Het betreft vloeistoffen die waterstof kunnen opslaan en weer loslaten.
- Methanol (MeOH): onder normale omstandigheden een vloeistof;
- Vloeibaar synthetisch²² methaan (LSM): door diepe koeling vloeibaar gemaakt methaangas (CH₄);
- Natriumboorhydride (NaBH₄): een poedervormige vaste stof die waterstof kan opslaan en in contact met water waterstof loslaat.

Uitgangspunt is dat deze waterstofdragers uitsluitend met hernieuwbare energie geproduceerd of, in het geval van LOHC-systemen, worden opgeladen.

Deze waterstofdragers kunnen in twee groepen verdeeld worden (zie Figuur 5):

1. De waterstofdrager fungeert alleen als drager. Het gaat om drie dragers: methylcyclohexaan (MCH), (perhydro)dibenzyltolueen (DBT) en natriumboorhydride.
2. De waterstofdrager kan gebruikt worden als drager én als grondstof of brandstof. Dit betreft vier dragers: vloeibare waterstof, ammoniak, methanol en vloeibaar synthetisch methaan.

²⁰ Het idee achter 'metal fuels' is dat ijzerpoeder wordt ingevoerd en wordt verbrand (oxidatie met zuurstof waarbij waterstof vrijkomt), waarna in een land met goedkope duurzame waterstof of een andere reductor terugwinning van het ijzeroxide ('roest') plaatsvindt. Ijzerpoeder en ijzeroxide zijn eenvoudig te transporteren. De technologie zit in de pilot-/demonstratiefase (o.a. project in Noord-Brabant).

²¹ Internationaal zeetransport van ammoniak gebeurt in gekoeld vloeibare vorm. Binnenlands transport van gekoeld vloeibare ammoniak is verboden voor weg en spoor, in de binnenvaart is transport in de praktijk ook in onder druk vloeibare vorm (mag wel gekoeld vloeibaar). Zie tabel 1.1 in [IFV-rapport](#). Bij opslag komen beide voor.

²² Het gaat om synthetisch methaan ter vervanging van fossiel methaan.



Figuur 5: Verdeling waterstofdragers in 2 groepen

2.2 SELECTIE VAN KETENS

Hoofdonderwerp van deze studie is de keten vanaf het moment van import tot het begin van het gebruik van waterstof of de drager bij de eindgebruiker. De te onderzoeken ketens zijn opgebouwd uit de volgende schakels (zie Figuur 6):

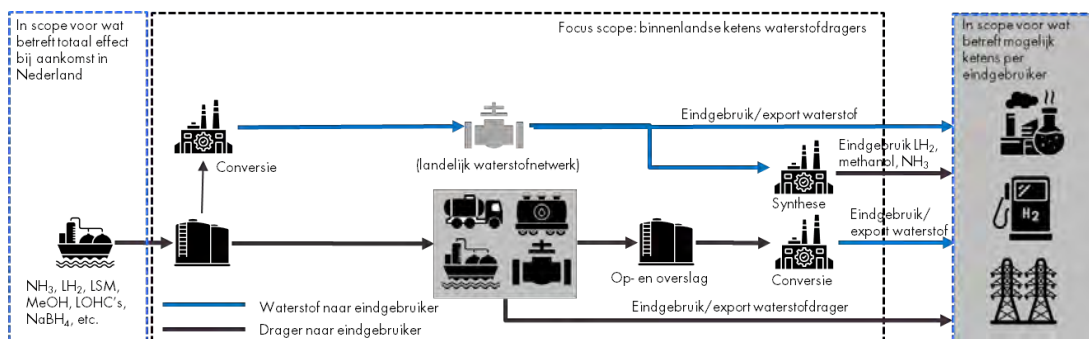
- Import van de waterstofdrager naar Nederland. Dit valt alleen binnen de scope voor wat betreft keteneffecten die relevant zijn voor de beoordeling van de ketens in Nederland, zoals de totale kosten, de energie-efficiëntie, de emissies, en de importleveringszekerheid, zonder opsplitsing naar de bijdrage van grondstoffen, productie (van waterstof en synthese van waterstofdrager in het exportland) en transport. Keteneffecten zoals op het gebied van omgevingsveiligheid en ruimtebeslag zijn alleen meegenomen voor het deel van de keten dat zich in Nederland bevindt. Waterstofgas uit binnenlandse productie (op land of zee) is buiten scope.
- Opslag en overslag van de waterstofdrager in de importhaven.
- Een eventuele conversie van de waterstofdrager naar gasvormig waterstof in de importhaven. We gebruiken de term conversie voor het ontbinden van de waterstofdrager om waterstofgas vrij te maken: dit heeft betrekking op verdampen, reformen, kraken en dehydrogeneren. We gebruiken de term synthese voor het binden van waterstofgas aan of tot een waterstofdrager. Hoewel liquefactie (door diepe koeling vloeibaar maken) en hydrogenering van LOHC's strikt genomen geen synthese zijn, scharen we deze processen toch hieronder.
- Transport van de waterstofdrager of van het waterstofgas na de conversiestap. Dit transport kan plaatsvinden over de weg, over het spoor, per binnenvaartschip of met een buisleiding. Gasvormig waterstof wordt alleen via het waterstofnet vervoerd en niet over weg, water of spoor (in deze studie, in de praktijk gebeurt dit wel op kleine schaal). Voor de vergelijking gebruiken we een representatief tracé door Nederland van 200 km, net als in de MKBV-studie²³ van Berenschot en Arcadis. Dit representatieve tracé bevat zowel een stedelijke situatie als een buiten stedelijke situatie. Door representatieve vervoertracés te gebruiken vervallen verschillen tussen importhavens en verschillen in afstand tot verschillende eindgebruikerslocaties.
- Decentrale opslag van de waterstofdrager bij de eindgebruiker.

²³ Berenschot, Arcadis (2024), MKBV waterstofdragers.

- Een mogelijke decentrale conversie van de waterstofdrager naar waterstofgas of decentrale synthese van een waterstofdrager met waterstofgas uit het nationale waterstofnet.²⁴
- Eindgebruik in industrie, energie- of vervoersector zijn buiten scope: de ketens lopen tot aan de poort van de eindgebruiker, of tot aan het tankstation of bunkerstation.²⁵

Voor een nog vollediger beeld zou het nodig zijn om ook de uiteenlopende toepassingen achter de poort te beschouwen (grondstof in diverse processen, brandstof in diverse apparatuur). Dat valt niet binnen de scope van deze studie omdat het beleid voor waterstofdragers gericht is op de leveringsketen en zich niet begeeft op het vlak van de verduurzaming van eindgebruikers.

Vooruitlopend op de presentatie van de onderzochte publieke belangen in het volgende hoofdstuk, vermelden we hier al dat voor de publieke belangen Betaalbaar en Duurzaam de kosten, broeikasgasemissies en energieverlies in de importketen en in Nederland worden meegeteld tot aan levering bij de poort van de eindgebruiker of op een tankstation. Voor overige publieke belangen (bijv. Veilig, Ruimte, Milieu) wordt alleen de impact in Nederland bepaald, ook tot aan levering bij de poort. De milieu-impact in het exportland wordt wel meegewogen in het publieke belang Rechtvaardig.



Figuur 6: Scope van de MCA-studie

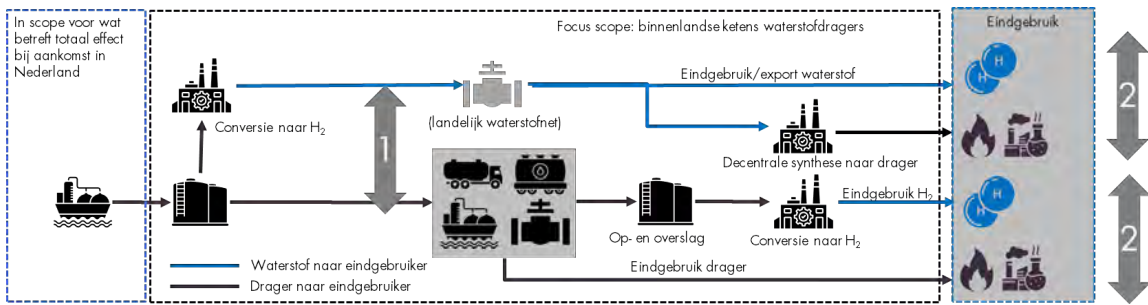
Voor het analyseren en presenteren van de resultaten verdelen we alle mogelijke ketens in 10 groepen of typen.

Het eerste onderscheid maken we tussen 1) ketens waarbij de geïmporteerde waterstofdrager in de imphaven wordt *geconverteerd naar gasvormig waterstof* en via het landelijke waterstofnet wordt getransporteerd, en 2) ketens waarbij de geïmporteerde waterstofdrager als *waterstofdrager wordt getransporteerd* door Nederland, zie pijl met nr. 1 in Figuur 7.

Het tweede onderscheid bestaat uit 1) ketens die uitmonden in levering van *waterstofgas* bij de eindgebruiker en 2) ketens die een *waterstofdrager* als grondstof of brandstof leveren aan de eindgebruiker, zie pijl met nr. 2 in Figuur 7. In combinatie met het eerste onderscheid levert dit vier groepen of hoofdroutes op.

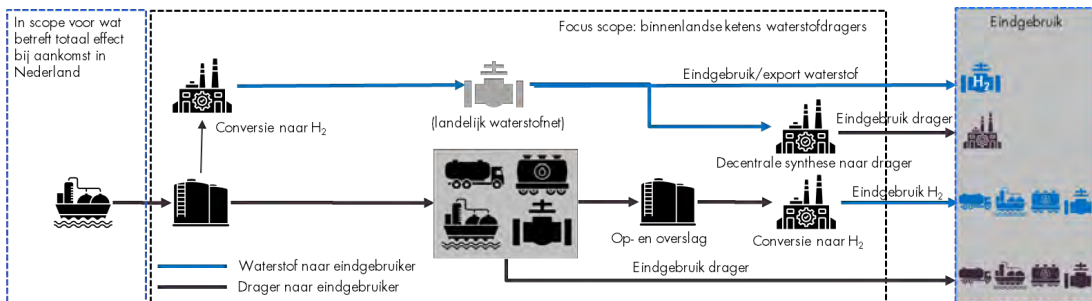
²⁴ Hierbij gaat het bijvoorbeeld om de synthese van ammoniak met waterstof uit het waterstofnet, of om het vloeibaar maken van waterstof na kraken van geïmporteerde ammoniak.

²⁵ Eindgebruik in de gebouwde omgeving en landbouw behoort ook tot de mogelijkheden, met naar verwachting geringe volumes.



Figuur 7: Vier hoofdroutes; binnenlands transport als waterstof of waterstofdrager en eindgebruik van waterstof of waterstofdrager

Ten slotte zijn er verschillende modaliteiten die kunnen worden gebruikt om de waterstofdragers als drager te transporteren, namelijk vervoer over de weg, per spoor, per binnenvaartschip en per buisleiding. Voor transport als waterstofgas onder druk beschouwen we alleen transport via het landelijke waterstofnet. Dit levert in totaal 10 groepen ketens op: 2 x 4 modaliteiten voor transport van de drager plus 2 x het landelijk waterstofnet voor het transport van gasvorming waterstof.



Figuur 8: Verschillende modaliteiten per keten; 10 typen ketens

Tabel 2: Tien typen ketens

Type	Toelichting
Type 1	Transport over de weg en conversie naar waterstof bij eindgebruiker
Type 2	Transport over water en conversie naar waterstof bij eindgebruiker
Type 3	Transport per spoor en conversie naar waterstof bij eindgebruiker
Type 4	Transport van drager per buisleiding en conversie naar waterstof bij eindgebruiker
Type 5	Conversie naar waterstofgas in importhaven en transport via waterstofnet naar eindgebruiker
Type 6	Transport van drager over de weg naar eindgebruiker (zonder conversie)
Type 7	Transport van drager over water naar eindgebruiker (zonder conversie)
Type 8	Transport van drager per spoor naar eindgebruiker (zonder conversie)
Type 9	Transport van drager per buisleiding naar eindgebruiker (zonder conversie)
Type 10	Conversie naar waterstof in importhaven, transport via waterstofnet en decentrale synthese van (dezelfde of een andere) drager bij eindgebruiker.

2.3 COMBINATIES VAN KETENS EN WATERSTOFDRAGERS

Het aantal mogelijke ketens, uitgaand van alle geselecteerde waterstofdragers en typen leveringsketens, is zeer groot. Om het aantal mogelijkheden enigszins te beperken, zijn aanvullende keuzes gemaakt.

- Er is alleen sprake van direct eindgebruik van gasvormig en vloeibare waterstof, ammoniak en methanol, en niet van de LOHC's of natriumboorhydride. Direct gebruik van LSM bijvoorbeeld voor de vervoerssector is ook buiten scope geplaatst. Alleen gebruik van synthetisch methaangas uit LSM geleverd via het aardgasnet wordt beoordeeld.
- Voor transport over de weg nemen we aan dat dit in principe voor alle eindgebruikers mogelijk is, ook voor eindgebruikers in de industrieclusters die de optie hebben om van buisleidingen, scheepvaart of railvervoer gebruik te maken. Dit is waarschijnlijk alleen het geval in de opbouwperiode van het waterstofnet, maar het kan ook een bewuste keuze van bedrijven zijn bijvoorbeeld als hun volumevraag klein is.
- Bedrijven in het 'zesde' cluster (verspreid in Nederland gelegen buiten de vijf grote industrieclusters) kunnen in principe met verschillende modaliteiten beleverd worden. De opties zijn in de praktijk afhankelijk van hun eventuele ligging aan water, aan een spoorlijn, aan het waterstofnet of (uitzonderlijk) direct aan een buisleiding.
- Voor decentrale conversie naar waterstofgas is de aanname dat er op tankstations of bunkerstations onvoldoende ruimte is. De uitzondering is verdampen van vloeibare waterstof op een wegtankstation, waarvoor de ruimtevraag beperkt is.
- Voor eindgebruik in de scheepvaart gaan we alleen uit van toepassing van over het water of de weg aangevoerd ammoniak, methanol en vloeibare waterstof.
- De eventuele decentrale synthese van waterstofdrager in Nederland met waterstof uit het landelijke net wordt alleen onderzocht voor ammoniak, methanol en vloeibare waterstof, niet voor methaan. De synthese wordt gemodelleerd met de aanname dat de conversie gebeurt met waterstof die afkomstig is van een eerdere conversie van *dezelfde* stof.²⁶

Omdat bovendien niet alle combinaties van transportmodaliteit en drager mogelijk zijn, leveren deze keuzes 48 leveringsketens van waterstofdragers op die zijn onderzocht (Tabel 3). De toelichting op het rechterdeel van de tabel (typen eindgebruikers) volgt in paragraaf 2.4.

Alle in de tabel genoemde combinaties zijn beoordeeld, ongeacht de huidige (korte-termijn) marktontwikkelingen of (uiteenlopende) inschattingen van het realisme van sommige alternatieven vanuit marktperspectief. Het ontbreken van regelgeving (bijvoorbeeld voor vervoer van vloeibare waterstof met binnenvaart) of van kracht zijn van beperkende regelgeving (verbod op bulktransport van natriumboorhydride) is ten behoeve van dit rapport niet als argument opgevat om

²⁶ Het modelleren van ketens met een gemiddelde samenstelling van waterstof in het transportnetwerk bleek niet haalbaar. Wanneer het uit oogpunt van publieke belangen gunstiger is als de synthese plaatsvindt op basis van waterstof afkomstig van eerdere conversie van een andere dan dezelfde stof, dan vermelden we dat.

een keten niet te beoordelen.²⁷ Regelgeving kan (op termijn) worden aangepast als daar een goede reden voor is.

Tabel 3: Onderzochte leveringsketens voor waterstofdragers

	Drager import	Conversie in import- haven	Transportmiddel	Drager transport	Conversie, synthese	Drager eindgebruik	Kunstmestindustrie	Elektriteitscentrale	Overige industrie- grote clusters	Cluster-0-industrie	Wegtankstation	Bunkerstation
Type 1: transport over de weg en conversie naar waterstof bij eindgebruiker												
1	NH ₃	-	weg	NH ₃	kraken	H ₂						
2	LH ₂	-	weg	LH ₂	verdam- ping	H ₂						
3	MCH	-	weg	MCH	dehydro- genering	H ₂						
4	DBT	-	weg	DBT	dehydro- genering	H ₂						
5	MeOH	-	weg	MeOH	reforming	H ₂						
6	LSM	-	weg	LSM	reforming	H ₂						
7	NaBH ₄	-	weg	NaBH ₄	dehydro- genering	H ₂						
Type 2: transport over water en conversie naar waterstof bij eindgebruiker												
8	NH ₃	-	Schip	NH ₃	kraken	H ₂				*		
9	LH ₂	-	Schip	LH ₂	verdam- ping	H ₂				*		
10	MCH	-	schip	MCH	dehydro- genering	H ₂				*		
11	DBT	-	schip	DBT	dehydro- genering	H ₂				*		
12	MeOH	-	schip	MeOH	reforming	H ₂				*		
13	LSM	-	schip	LSM	reforming	H ₂				*		
14	NaBH ₄	-	schip	NaBH ₄	dehydro- genering	H ₂				*		
Type 3: transport per spoor en conversie naar waterstof bij eindgebruiker												
15	NH ₃	-	trein	NH ₃	kraken	H ₂				*		
16	LH ₂	-	trein	LH ₂	verdam- ping	H ₂				*		
17	MCH	-	trein	MCH	dehydro- genering	H ₂				*		

²⁷ Als gevolg van het verbod op bulktransport veronderstellen we dat natriumboorhydride waterdicht verpakt (vanwege de reactiviteit met vocht) in big bags in containers wordt vervoerd. Dit betekent mogelijk dat er meer handelingen in de logistieke keten nodig zijn om deze kleinere verpakkingen te vervoeren. Dit zal een effect hebben op monetaire en externe kosten van transport van natriumboorhydride, maar omdat niet bekend is hoe groot dit effect is, zijn de scores hier niet voor aangepast.

	Drager import	Conversie in import- havens	Transportmiddel	Drager transport	Conversie, synthese	Drager eindgebruik	Kunstmesindustrie	Elektriteitscentrale	Overige industrie- grote clusters	Cluster-6-industrie	Wegtankstation	Bunkerstation
18	DBT	-	trein	DBT	dehydro- genering	H ₂				*		
19	MeOH	-	trein	MeOH	reforming	H ₂				*		
20	LSM	-	trein	LSM	reforming	H ₂				*		
21	NaBH ₄	-	trein	NaBH ₄	dehydro- genering	H ₂				*		
Type 4: transport van drager per buisleiding en conversie naar waterstof bij eindgebruiker												
22	NH ₃	-	buis	NH ₃	kraken	H ₂				*		
23	MCH	-	buis	MCH	dehydro- genering	H ₂				*		
24	DBT	-	buis	DBT	dehydro- genering	H ₂				*		
25	MeOH	-	buis	MeOH	reforming	H ₂				*		
26	LSM	verdam- ping	aardgas- net	CH ₄	reforming	H ₂				*		
Type 5: conversie naar waterstof in importhaven en transport via het H ₂ -net naar eindgebruiker												
27	NH ₃	kraken	H ₂ -net	H ₂	-	H ₂				*	*	
28	LH ₂	verdam- ping	H ₂ -net	H ₂	-	H ₂				*	*	
29	MCH	dehydro- genering	H ₂ -net	H ₂	-	H ₂				*	*	
30	DBT	dehydro- genering	H ₂ -net	H ₂	-	H ₂				*	*	
31	MeOH	reforming	H ₂ -net	H ₂	-	H ₂				*	*	
32	LSM	reforming	H ₂ -net	H ₂	-	H ₂				*	*	
33	NaBH ₄	dehydro- genering	H ₂ -net	H ₂	-	H ₂				*	*	
Type 6: transport over de weg naar eindgebruiker (zonder conversie)												
34	NH ₃	-	weg	NH ₃	-	NH ₃						
35	LH ₂	-	weg	LH ₂	-	LH ₂				28		
36	MeOH	-	weg	MeOH	-	MeOH						
Type 7: transport over water naar eindgebruiker (zonder conversie)												
37	NH ₃	-	schip	NH ₃	-	NH ₃				*28		
38	LH ₂	-	schip	LH ₂	-	LH ₂				*		

²⁸ Bijv. [electronica](#)- en [halfgeleiderindustrie](#). Vloeibare waterstof wordt veel gebruikt bij de productie van LED's, displays en halfgeleiders. Het waterstofmolecuul heeft gunstige eigenschappen zoals een superieure warmteoverdrachtsvermogen en geschiktheid als etsmiddel.

	Drager import	Conversie in import-haven	Transportmiddel	Drager transport	Conversie, synthese	Drager eindgebruik	Kunstmestindustrie	Elektriciteitscentrale	Overige industrie-grote clusters	Cluster-6-industrie	Wegtankstation	Bunkerstation
39	MeOH	-	schip	MeOH	-	MeOH				*		
Type 8: transport per spoor naar eindgebruiker (zonder conversie)												
40	NH ₃	-	trein	NH ₃	-	NH ₃				*		
41	LH ₂	-	trein	LH ₂	-	LH ₂				*28		
42	MeOH	-	trein	MeOH	-	MeOH				*		
Type 9: transport van drager per buisleiding naar eindgebruiker (zonder conversie)												
43	NH ₃	-	buis	NH ₃	-	NH ₃				*		*
44	MeOH	-	buis	MeOH	-	MeOH				*		*
45	LSM	verdamping	aardgas-net	CH ₄	-	CH ₄						
Type 10: conversie naar waterstof in importhaven, transport via het H ₂ -net en decentrale synthese van drager bij eindgebruiker												
46	NH ₃	kraken	H ₂ -net	H ₂	synthese	NH ₃				*		
47	LH ₂	verdamping	H ₂ -net	H ₂	synthese	LH ₂				*28		
48	MeOH	reforming	H ₂ -net	H ₂	synthese	MeOH				*		

* slechts voor een deel van de cluster-6-bedrijven, tankstations of bunkerstations een mogelijkheid.

2.4 RELEVANTIE VAN KETENS VOOR TYPEN EINDGEBRUIKERS

Niet elke leveringsketen in Tabel 3 is relevant voor elk type eindgebruiker. We onderscheiden in deze studie zes typen eindgebruikers:

- Kunstmestindustrie
- Elektriciteitscentrale
- Overige toepassingen industrie in één van de vijf industrieclusters
- Cluster-6-industrie
- Wegtankstation
- Bunkerstation voor scheepvaart

De aanname is dat vanuit de importhavens omvangrijke transportstromen van waterstof(dragers) lopen naar de industrieclusters voor kunstmestproductie (ammoniak of waterstof als grondstof), elektriciteitscentrales (waterstof, methaan of ammoniak als brandstof) of overige industrie (raffinerijen, staalindustrie en chemie met waterstof als brand-/grondstof). Kleinere volumes lopen vanuit de importhavens naar industrie buiten de clusters (cluster 6: keramische, metaalindustrie, afval/recycling) en naar wegtankstations en bunkerstations. De mogelijkheid om van beschikbare modaliteiten gebruik te maken, bepaalt naast het type eindgebruik uit welke ketens de eindgebruiker kan kiezen. Veel industriële grootverbruikers zijn gelegen aan het landelijke waterstofnet in 2030, tankstations veelal niet. De blauwe cellen in Tabel 3 geven aan of de betreffende keten een waarschijnlijke optie voor het type eindgebruiker is.

Kunstmestindustrie

Een belangrijk halffabricaat voor de productie van kunstmest is ammoniak. Het gangbare proces voor ammoniakproductie is synthese met stikstof uit de lucht en waterstof uit *steam methane reforming*. De Nederlandse kunstmestfabrieken liggen in de industrieclusters. Zij kunnen kiezen uit drie alternatieven: import van ammoniak, decentrale synthese van ammoniak uit waterstof uit het waterstofnet, of synthese van ammoniak met waterstof uit *steam reforming* van methaangas uit LSM dat zij via het aardgasnet ontvangen.

Elektriciteitscentrales

Voor de momenten dat wind en zon onvoldoende elektriciteit leveren, is er behoefte aan regelbaar vermogen in het elektriciteitsnet. Nu wordt dergelijk vermogen geleverd door aardgascentrales. Om CO₂-vrij flexibel vermogen op te bouwen zijn er verschillende oplossingen. Binnen de scope van deze studie beperken we ons tot drie opties: gebruik van synthetisch methaan uit LSM in de centrales, gebruik van waterstof in aangepaste centrales, en gebruik van ammoniak in aangepaste elektriciteitscentrales.

Gezien de hoeveelheden die nodig zullen zijn en de eis aan leveringszekerheid is een aansluiting op het aardgasnet, het waterstofnet of een ammoniakbuisleiding essentieel, al kan voor ammoniak ook levering per schip en grootschalige opslag bij de centrale nog een optie zijn.

Het verbranden van waterstof, methaan of ammoniak leidt tot NO_x-emissies. Hoewel emissies als gevolg van eindgebruik buiten scope van deze studie vallen, gaan we er hier toch kort op in. TNO²⁹ concludeert dat het goed mogelijk is om bij verbranding van waterstof of ammoniak tot vergelijkbare NO_x-emissies als met aardgasverbranding te komen door toepassing van technieken als rookgasrecirculatie en (non)-katalytische reductie van NO_x (SCR/SNCR³⁰). Als ammoniak direct als brandstof wordt ingezet is meer nodig om NO_x-emissies te beperken, aangezien ammoniak van zichzelf al stikstof bevat. Toepasbare technieken bij ammoniakverbranding zijn SCR en tweestapsverbranding, eerst zuurstofarm en dan met zuurstofovermaat. Oxy-fuel-verbranding (verbranding met zuurstof in plaats van lucht bij zeer hoge temperaturen) van waterstof en aardgas levert zeer lage NO_x-emissies op, maar zorgt bij ammoniak juist voor hoge NO_x-emissie.

Overige toepassingen industrie in één van de vijf industrieclusters

Het landelijke waterstofnet zal in eerste instantie de vijf grote industrieclusters in Nederland verbinden: Noord-Nederland, Noordzeekanaalgebied, Rotterdam/Moerdijk, Zeeland/West-Brabant en Chemelot in Limburg. Bedrijven in deze clusters met een waterstofvraag kunnen aansluiten op het waterstofnet.

We gaan ervan uit dat leveringen over de weg, het spoor of met de binnenvaart naar de industrieclusters weinig zullen plaatsvinden, behalve in de opbouwfase van het net en in situaties waar de afstand naar het waterstofnet te groot is of om andere redenen niet mogelijk is. Dan zijn de betreffende bedrijven te beschouwen als cluster-6-bedrijven, zie verder.

²⁹ Pieter Kroon, Waterstofverbranding en stikstofemissies, TNO-rapport R10343 14 april 2023.

³⁰ Selective (Non)-Catalytic Reduction

Behalve eindgebruik van waterstof kan in de industrieclusters ook vraag zijn naar direct eindgebruik van specifieke dragers, als grondstof of als brandstof om aan specifieke proceseisen te voldoen (bijvoorbeeld in de keramische industrie³¹). Dan is de vergelijking met alle andere dragers niet relevant omdat de rol van de drager in het productieproces doorslaggevend is voor de keuze.

Cluster-6-industrie

Een groot deel van de Nederlandse energie-intensieve industrie bevindt zich verspreid door het land buiten de vijf industrieclusters en wordt wel het zesde cluster genoemd. De cluster-6-bedrijven die in de buurt van het waterstofnet liggen kunnen hierop aansluiten, en dan is de bij industrieclusters beschreven vergelijking van toepassing. De andere cluster-6-bedrijven zullen via weg, water, spoor of buisleiding van waterstofdragers moeten worden voorzien. De locatie van het bedrijf bepaalt welke modaliteiten mogelijk zijn.

Wegtankstations

Waterstof is in beeld als een energiedrager voor met name zware wegvoertuigen, als alternatief voor of aanvulling op batterij-elektrische mobiliteit of biobrandstoffen. Tankstations kunnen op verschillende manieren bevoorrad worden. Binnen scope van deze studie zijn levering van vloeibare waterstof aan het tankstation met tankwagens over de weg en de aansluiting van het tankstation op het waterstofnet (dit vergt een extra zuiveringsstap). Op het station kan vloeibare waterstof direct aan voertuigen worden geleverd of eerst door verdamping naar gecomprimeerde toestand wordt gebracht (350-700 bar). Beide varianten kunnen op een tankstation samengaan. In principe kan op tankstations ook decentrale conversie van andere waterstofdragers dan vloeibare waterstof naar waterstof plaatsvinden. We nemen deze optie niet mee in de vergelijking omdat dit veel ruimte vraagt, zowel fysieke als veiligheidsruimte. Een extra zuiveringsstap vraagt minder ruimte en nemen we daarom wel mee.

Bunkerstations scheepvaart

De scheepvaartsector verkent verschillende duurzame alternatieven voor de huidige brandstoffen, zoals vloeibare waterstof, methanol, ammoniak, LSM en natriumboorhydride. Voor deze dragers zijn er marktinitiatieven om het gebruik in scheepvaart te bevorderen. LNG ('fossiel LSM') en methanol worden al op enige schaal gebruikt in o.a. containerschepen, cruiseschepen en veerboten, hiervoor zijn bunkerschepen actief in Rotterdam. LSM, vloeibare waterstof en ammoniak worden in eerste pilotprojecten toegepast (buiten Nederland). Natriumboorhydride wordt op kleine schaal getest door het havenbedrijf Amsterdam. Levering van deze energiedragers aan schepen kan plaatsvinden vanuit tankwagens, bunkerschepen of vaste bunkerstations.

³¹ Naast waterstof is ook LSM hier een optie. De industrie weet niet welke kant het op gaat met gaskwaliteit, en met beschikbaarheid en prijs van waterstof, daarom hecht men belang aan flexibiliteit. "Waterstof is voor de keramische industrie een brandstofvervanger, maar vereist in tegenstelling tot groen gas wel een paar aanpassingen in het productieproces. De toepasbaarheid van waterstof hangt af van het ontwerp van de stookoven en vereist ook investeringen in aangepaste branders. Stoken met waterstof resulteert in hogere temperaturen, wat leidt tot een toename van de NO_x-uitstoot. Dit, en de mogelijke negatieve effecten van de brandstofomschakeling op de productkwaliteit, vereisen verder onderzoek voordat waterstof als volledig toepasbaar kan worden beschouwd als brandstofvervanging." "Het is momenteel onduidelijk welke aanpassingen aan de brander nodig zijn (verder onderzoek wordt voorgesteld), hoe het gebruik van waterstof bij het stoken de kwaliteit van de keramische producten zal beïnvloeden, en wat de overeenkomstige techno-economische kenmerken (CAPEX en OPEX) van de waterstofbranders zouden zijn voor de keramische industrie." Besier, Jorick, Marc Marsidi (2020), Decarbonisation options for the Dutch ceramic industry, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO, 21 December.

De ketens voor eindgebruik van gasvormig waterstof laten we hier buiten beschouwing. De dichtheid van gasvormig waterstof wordt veelal onvoldoende bevonden voor schepen.³² Tenslotte is het in theorie mogelijk om LOHC te bunkeren en aan boord van een schip (of bij het bunkerstation) te dehydrogeneren om de waterstof te gebruiken voor de aandrijving. Er zijn geen initiatieven bekend om dit te ontwikkelen.³³ Net als bij wegtankstations is er bij bunkerstations doorgaans onvoldoende (fysieke of veiligheids-) ruimte voor een conversie-installatie naar waterstof.

2.5 VARIANTEN

Per keten kijken we in deze studie naar verschillende situaties oftewel varianten. De basissituatie heeft betrekking op het zichtjaar 2030 van gebruik van de waterstof(drager) in het binnenland. We noemen 2030 als zichtjaar, maar in feite gaat het om een zichtperiode: 2030-2035.

Varianten hiervan zijn:

- *Andere locatie:* De situatie voor eindgebruikers die de waterstof(drager) in de importhaven gebruiken. In dit geval vervalt het binnenlands transport en de decentrale opslag. De decentrale conversie valt samen met de centrale conversie.
- *Andere locatie:* De situatie waarin de waterstof(drager) wordt doorgevoerd door Nederland voor gebruik van de waterstof(drager) in Duitsland of België. In dit geval vervallen de ketenonderdelen decentrale opslag, conversie en synthese.
- *Ander zichtjaar:* Een doorkijk naar 2050. Voor een deel van de publieke belangen zullen de scores veranderen door de veranderende omstandigheden ten opzichte van 2030. Als we 2050 noemen, gaat het ook om een periode (dus 'omstreeks 2050'), net als bij 2030.

Per eindgebruikersgroep is er geen aparte variant nodig. De ketens en scores per keten verschillen niet. Wel verschilt de flexibiliteit die een eindgebruiker heeft om te kiezen voor een specifieke keten. Zo is het voor een tankstation dat niet aan het waterstofnet ligt niet mogelijk om gebruik te maken van ketens die de waterstof via het waterstofnet transporteren, en ook het kraken van ammoniak bij een tankstation ligt niet voor hand. Hierdoor is het aantal opties kleiner dan voor een industrieel complex dat wel aan het waterstofnet ligt en bovendien mogelijkheden heeft om zelf de waterstofdragers om te zetten naar waterstof.

2.6 VOLUMEVERSCILLEN TUSSEN KETENS











Voor elke leveringsketen gebruiken we hetzelfde volume waterstofequivalenten dat aan de eindgebruikers geleverd wordt. Afhankelijk van de waterstofdrager en de veronderstelde keten ontstaan er ketenverliezen. De te importeren volumes van dragers verschillen hierdoor, terwijl de hoeveelheid waterstofequivalenten die geleverd wordt aan de eindgebruikers wel gelijk is. Rekening houdend met verschillen in soortelijk gewicht zijn de volumeverschillen doorvertaald naar de benodigde hoeveelheden opslag en vervoersbewegingen. Volumeverschillen werken door in de meeste publieke belangen doordat er bij een hoger volume meer externe effecten zijn (impact op

³² Een uitzondering is de toepassing in de containerbinnenvaart van verwisselbare zeecontainers gevuld met waterstofgascilinders. De cilinders worden gevuld bij elektrolyzers, deze leveringsketen is buiten scope van deze studie. Vullen van de containers zou ook kunnen bij een vulstation dat is verbonden met het H₂-net, dan zou deze optie binnen scope komen, maar dit hebben we niet uitgewerkt.

³³ In HyDelta is dit wel aangenomen voor zeetransport. Dit hebben we niet overgenomen.

Veilig, Duurzaam en Milieu en Rechtvaardig), de kosten hoger liggen (impact op Betaalbaar, Economisch Krachtig, Rechtvaardig, Toegankelijk) of meer en grotere faciliteiten nodig zijn (impact op Adaptief, Ruimte).

Deze verliezen ontstaan vooral tijdens de conversiestappen van waterstofdragers naar waterstofgas waarbij de drager ook als brandstof wordt gebruikt voor proceswarmte. Dit zijn ammoniak (kragen), methanol en LSM (*steam reforming*). In geval van conversie en decentrale synthese in Nederland (type 10 keten) is het volumeverlies navenant groter. Bij het transport van vloeibare waterstof, waterstofgas via het waterstofnet en methaangas uit LSM via het aardgasnet treden beperkte verliezen op. Ook bij de (de)centrale opslag van vloeibare waterstof, LSM en van ammoniak is sprake van kleine verliezen. Bijlage B geeft toelichting op de berekening van volumes³⁴ in de ketens.

	Eindgebruik waterstof							Eindgebruik drager				
	NH ₃	LH ₂	MCH	DBT	MeOH	LSM	NaBH ₄	NH ₃	LH ₂	MeOH	LSM	
	129%	102%	102%	101%	121%	133%	100%		100%	102%	100%	
	129%	103%	102%	101%	121%	133%	100%		100%	103%	100%	
	129%	102%	102%	101%	121%	133%	100%		100%	102%	100%	
	129%		102%	101%	121%	132%			100%		100%	100%
	129%	100%	102%	101%	121%	132%	100%		129%	102%	192%	

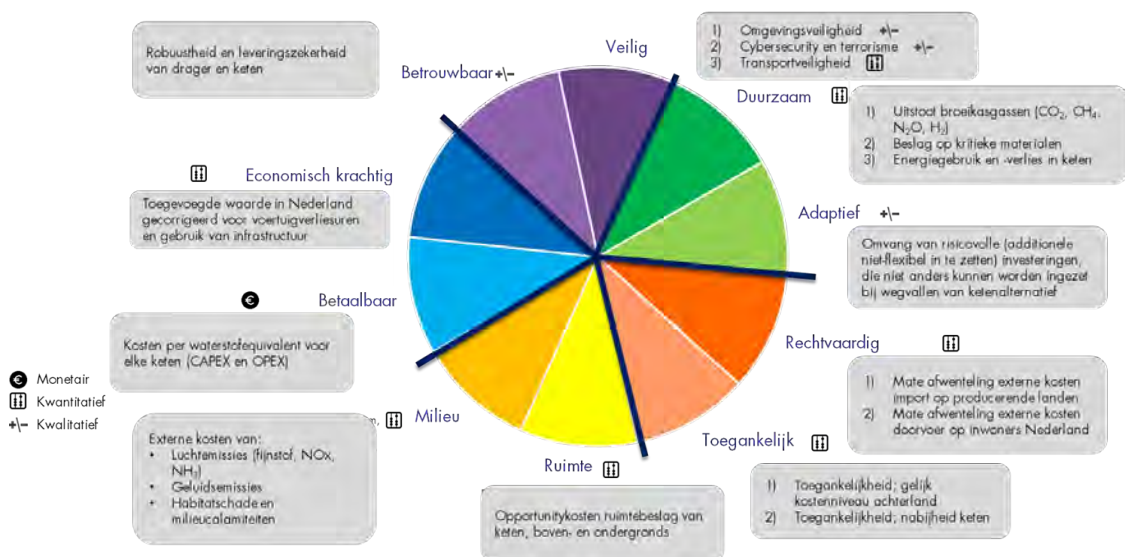
Figuur 9: Benodigd importvolume ketens t.o.v. eindgebruik (100%); waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

³⁴ Hoewel we de hoeveelheden waterstofdragers uitdrukken in de eenheid kton voor massa spreken we toch over volume om aan te sluiten bij de eerder genoemde ‘volumestudie’.

HOOFDSTUK 3 PUBLIEKE BELANGEN: CONCRETISERING

In dit hoofdstuk worden de publieke belangen toegelicht en de manier waarop deze belangen zijn geconcretiseerd in indicatoren. Het gaat om de publieke belangen zoals gehanteerd in het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE)³⁵:

- Betaalbaar en Economisch krachtig
- Betrouwbaar en Veilig
- Duurzaam
- Rechtvaardig en Toegankelijk (Participatief)³⁶
- Ruimte en Milieu



Figuur 10: Overzicht van 10 publieke belangen en bijbehorende 16 indicatoren

Een publiek belang dat in het NPE ontbreekt, is adaptiviteit. Wij hebben dit in overleg met de opdrachtgever als extra publiek belang toegevoegd. Adaptiviteit is belangrijk vanwege de onzekerheid over toekomstige waterstof(drager)ontwikkelingen. De technieken en ketens hebben zich veelal nog niet op grote schaal bewezen en zijn afhankelijk van ontwikkelingen op het gebied van macro-economie, politiek, innovatie, industriebeleid enzovoorts. De markt moet daarom flexibel kunnen inspelen op veranderingen. De mate waarin dat kan, verschilt per keten en daarop wordt beoordeeld en vergeleken. Dit betekent dat per waterstofdrager en transportketen informatie nodig is over de mate van flexibiliteit en robuustheid van de infrastructuur en marktposities. Is er

³⁵ Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2023), Nationaal Plan Energiesysteem.

³⁶ Het publieke belang Participatief dat wij concretiseren als de mogelijkheid voor bedrijven om de importwaterstof te benutten, wordt om verwarring te voorkomen met participatieprocessen in dit rapport Toegankelijk genoemd.

sprake van *lock-ins* of *lock-outs*³⁷ en wat zijn de benodigde doorlooptijden en kosten om een overstap of aanpassing te doen?

Het begrip Participatief wordt vaak opgevat als de mate waarin stakeholders mee kunnen doen aan het beleidsproces. Dit is niet onderscheidend voor de verschillende ketens van waterstofdragers in deze studie en zou eerder als een randvoorwaarde kunnen worden beschouwd in de te ontwikkelen kabinetsvisie. In het vervolg van de rapportage gebruiken we daarom het begrip Toegankelijk, waarmee we de mogelijkheid bedoelen die bedrijven hebben om de importwaterstof te benutten.

Tabel 4: Indicatoren per publiek belang (in volgorde NPE)

Publiek belang	Indicatoren
Betaalbaar	<ul style="list-style-type: none"> Kosten per waterstofequivalent (€ per kton) voor de eindgebruiker
Economisch krachtig	<ul style="list-style-type: none"> Toegevoegde waarde per waterstofequivalent voor de Nederlandse economie, gecorrigeerd voor de kosten van congestie en maatschappelijke kosten van gebruik van infrastructuur (€ per kton)
Veilig	<ul style="list-style-type: none"> Omgevingsveiligheid (Potentiële slachtoffers per jaar per kton) Cybersecurity en terrorisme (Potentiële slachtoffers per jaar per kton) Transportveiligheid (€ per jaar per kton)
Duurzaam	<ul style="list-style-type: none"> Broeikasgasemissies (Kosten van broeikasgasemissies CO₂, CH₄, H₂, N₂O per jaar per kton) Kritisch materiaalgebruik (Waarde van materiaal in € per kton) Energieverlies (MJ per kton)
Adaptief	<ul style="list-style-type: none"> Omvang van risicovolle (niet-flexibel in te zetten) investeringen, d.w.z. additionele investeringen die niet anders kunnen worden ingezet en moeten worden afgeschreven als de keten zich niet voldoende ontwikkelt (€ per kton)
Rechtvaardig	<ul style="list-style-type: none"> Mate van afwenteling van externaliteiten op producerende landen en de rest van wereld (kosten van externaliteiten van import in € per kton gedeeld door importkosten in € per kton) Mate van afwenteling van externaliteiten van ketens op de omgeving in Nederland (kosten van externaliteiten van keten in Nederland in € per kton gedeeld door kosten van keten in Nederland in € per kton)
Toegankelijk	<ul style="list-style-type: none"> Gelijk speelveld qua kosten voor eindgebruikers in het binnenland t.o.v. eindgebruikers in de importhaven (€ per kton in binnenland gedeeld door € per kton in importhaven) Nabijheid tot vervoersmodaliteiten op bedrijventerreinen (percentage bedrijventerreinen met toegang tot de keten)
Ruimte	<ul style="list-style-type: none"> Opportunitetskosten ruimtebeslag keten (waarde in € per kton)
Milieu	<ul style="list-style-type: none"> Externe kosten als gevolg van emissies (ammoniak, fijnstof- en NO_x), geluidsemissies, habitatschade, ecotoxiciteit en smogvorming van methaan en milieucalamiteiten (€ per jaar per kton)

Figuur 10 vat de publieke belangen samen. We hanteren hierbij de volgorde uit het NPE, waarbij Adaptief is toegevoegd na Duurzaam. Elk publiek belang is concreet gemaakt door deze voor dit onderzoek te vertalen naar één of meer indicatoren. Deze zijn opgenomen in Figuur 10 en Tabel

³⁷ Lock-ins beperken de overstapmogelijkheden; een eerdere keuze maakt het moeilijk en duur om van strategie te veranderen (bijv. door investeringen die nog niet afgeschreven zijn). Lock-outs zijn alternatieven die je niet meer kunt kiezen door eerdere keuzes of het niet tijdig anticiperen.

4. Het vervolg van dit hoofdstuk licht de publieke belangen verder toe. Hierbij zijn de belangrijkste gebruikte bronnen kort genoemd. Meer informatie over de gebruikte bronnen en uitgangspunten bij de modellering is te vinden in Bijlage A. Bijlage B en C gaan in op de berekening van de scores per keten voor elk publiek belang.

3.1 BETAALBAAR

Het publieke belang Betaalbaar heeft betrekking op de totale kosten van de leveringsketen tot aan de poort van de eindgebruiker. Deze kosten worden uitgedrukt in de totale kosten per kton waterstofequivalent (H₂-eq) bij volumes zoals die in 2030 en 2050 worden aangenomen. Ze bestaan uit investeringskosten (CAPEX) en operationele kosten (OPEX). De investeringskosten zijn afgeschreven over de levensduur van de investering. Deze levensduur kan verschillen; een investering in een installatie heeft een kortere levensduur dan een investering in een buisleiding.

Omdat voor het bepalen van sommige andere publieke belangen in deze MCA onderdelen van de totale kosten nodig zijn, gebruiken we een onderverdeling in:

1. Kosten van importdrager bij aankomst in Nederland,
2. Kosten van overslag/opslag in de importhaven,
3. Kosten van centrale conversie naar waterstof,
4. Kosten van transport en opslag, en
5. Kosten van decentrale conversie naar waterstof of synthese van de drager.

De resulterende kosten hangen sterk af van de gehanteerde aannames. We gebruiken daarom zoveel mogelijk dezelfde bron voor de verschillende dragers. De belangrijkste, meest complete en transparante bronnen voor de kosten van import van waterstofdragers zijn HyDelta en JRC. De kosten van transport in Nederland voegen we toe gebaseerd op kentallen van de MKBV, Panteia en KiM.³⁸ Voor LSM, natriumboorhydride en MCH leveren HyDelta en de JRC-studie geen of gedeeltelijke informatie. Deze hebben we aangevuld met andere bronnen³⁹ en zoveel mogelijk met dezelfde aannames als gebruikt in de JRC-studie. De kosten van eindgebruikapparatuur zijn niet meegenomen omdat dit een breed spectrum omvat (brandstofcellen, branders, turbines, verbrandingsmotoren, procesreactoren, et cetera).

3.2 ECONOMISCH KRACHTIG

Bij het publieke belang Economisch krachtig gaat om het (toekomstig) verdienvermogen voor Nederland. Hiervoor schatten we de toegevoegde waarde in de verschillende ketens voor Nederland. De toegevoegde waarde (absoluut) is het verschil tussen 1) de verwachte binnenlandse of exportopbrengsten inclusief marge en 2) de kosten van import. Hierdoor hebben ketens met lage importkosten een hoge score, ook als de opslag-, conversiekosten en kosten voor transport in

³⁸ Panteia (2023), Cost Figures for Freight Transport – final report, commissioned by Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM), January 2023.

³⁹ Voor LSM: Agora Industrie, Technische Universität Hamburg (2023), Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland. Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenkreislauf, September. Voor natriumboorhydride: o.a. Ainee, Ibrahim, Mark Pakevicius and Craig E. Buckley (2023), Chemical compression and transport of hydrogen using sodium borohydride, *Sustainable Energy & Fuels*, 2023, 7, 1196-1203. Voor MCH: marktinformatie en o.a. Aziz, Muhammad, Takuya Oda, Takao Kashiwagi (2019), Comparison of liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia on energy efficiency and economy, 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22-25 August 2018, Hong Kong, China, *Energy Procedia* 158 (2019), 4086-4091.

Nederland hoog zijn. De uitgaven hiervoor komen immers ten goede aan de Nederlandse economie.⁴⁰

De verkoopprijs in de toekomst die we nodig hebben om de toegevoegde waarde te bepalen, is het meest onzeker. We veronderstellen dat het voor de eindgebruiker geen verschil maakt via welke keten de waterstof geleverd wordt. De verkoopprijs per waterstofequivalent is daarom gelijk genomen voor alle ketens: 12 euro per kilogram waterstof. Om ketens met en zonder conversie naar waterstof eerlijk te vergelijken, is er een correctie toegepast voor ketens waarbij de drager als eindproduct wordt gebruikt (ammoniak, methanol, methaan) door de kosten van conversie naar waterstof af te trekken van de verkoopprijs van deze dragers.

Deze toegevoegde waarde corrigeren we voor mogelijke extra congestiekosten en extra kosten voor het gebruik van de weg-, water- en spoorinfrastructuur. Deze kosten komen niet in het publieke belang Betaalbaar tot uiting omdat ze neerslaan bij de maatschappij.

De economische activiteit en toegevoegde waarde van importwaterstof of -dragers kunnen ook invloed hebben op de toegevoegde waarde en hoogwaardige werkgelegenheid van aanpalende sectoren en waterstofgebruikers door kennisoverdracht tussen bedrijven en versterking van het vestigingsklimaat voor deze sectoren. Het precieze effect is moeilijk te kwantificeren, nu en laat staan in de toekomst. We nemen aan dat de toegevoegde waarde ook hier een goede benadering voor is.

3.3 BETROUWBAAR

Bij het publieke belang Betrouwbaar gaat het om zekerheid van tijdige levering van de waterstofdragers zonder grote prijschommelingen. Ook het voorkómen van risicovolle strategische afhankelijkheden kan een rol spelen. Omdat we echter geen specifieke informatie over de exporterende landen gebruiken, kunnen we dit aspect (strategische afhankelijkheden) niet concretiseren. Het gaat in dit rapport dus om de zekerheid van tijdige levering door betrouwbaarheid van de importen, de conversiestappen en het transport in Nederland.

Factoren die dit beïnvloeden zijn:

- de TRL (*Technology Readiness Level*) van productie van een waterstofdrager uit waterstof in exportlanden (hoe hoger, hoe betrouwbaarder),
- de TRL van zeeschepen geschikt voor het vervoer van de drager (hoe hoger, hoe betrouwbaarder) en de beschikbaarheid van deze zeeschepen,
- de chemische stabiliteit van de drager (hoe meer bestendig de stof is tegen interne en externe invloeden of storingsparameters zoals *boil-off* of reactie met vocht, hoe betrouwbaarder de levering),
- de TRL voor opslag van de waterstofdrager (hoe hoger, hoe betrouwbaarder),
- de TRL voor conversie en eventuele synthese van de waterstofdrager (hoe hoger, hoe betrouwbaarder),
- de TRL van de transportmodaliteit voor de drager in Nederland (hoe hoger de leveringszekerheid/TRL, hoe betrouwbaarder de keten) en de beschikbaarheid van geschikte transportmiddelen, en

⁴⁰ We veronderstellen dat deze uitgaven volledig in Nederland neerslaan. Bij buitenlandse aandeelhouders en de aanschaf van kapitaalgoederen in het buitenland zal ook een deel in het buitenland terecht komen.

- de leveringszekerheid en robuustheid van de transportmodaliteit (hoe meer potentiële routes, hoe kleiner de kans dat uitval van een route levering onmogelijk maakt).

Niet voor al deze factoren zijn bronnen in de literatuur beschikbaar en zeker niet voor de onderlinge afweging. De scores per ketenonderdeel zijn daarom in overleg met een groep experts kwalitatief en ten opzichte van de andere ketenonderdelen vastgesteld.

3.4 VEILIG

Het publieke belang Veilig geven we vorm met drie deelindicatoren: 1) omgevingsveiligheid (niet-opzettelijke calamiteiten), 2) bescherming tegen cyberaanvallen en terrorisme (opzettelijke calamiteiten) en 3) transportveiligheid. Bij veiligheid kijken we naar direct gevaar voor de veiligheid en gezondheid van mensen. Langetermijneffecten voor de gezondheid van mensen, bijvoorbeeld een verhoogde kans op de ontwikkeling van kanker of longaandoeningen als gevolg van blootstelling aan gevaarlijke stoffen, nemen we mee bij het publieke belang Milieu. Effecten op de natuur als gevolg van calamiteiten zijn ook onderdeel van het publieke belang Milieu.

Omgevingsveiligheid

Omgevingsveiligheid gaat over het risico dat de omgeving loopt op potentiële incidenten bij het op- en overslaan, converteren of transporteren⁴¹ van waterstofdragers. Omdat het gaat om gevaarlijke stoffen is er een risico op slachtoffers, milieu- en materiële schade. Dit risico hangt af van het effect van en de kans op een incident.

De methodiek die wordt gebruikt voor het scoren van omgevingsveiligheid is gebaseerd op de methodiek van het regionale risicoprofiel en de rijksbrede risicoanalyse nationale veiligheid (enigszins vereenvoudigd). Per incidentscenario (bijv. lekkage, explosie) en per ketenstap zijn samen met een groep experts de kans en het effect van incidenten met verschillende waterstofdragers beoordeeld. De vermenigvuldiging van kans en effect levert het risico op (het aantal potentiële slachtoffers). Om tot scores per leveringsketen te komen zijn de risico's van de ketenstappen opgeteld. De incidenten kunnen optreden in stedelijk gebied, landelijk gebied of industrieel gebied. In de beoordeling is uitgegaan van de 'worst case'.

Cybersecurity en terrorisme

Cybersecurity en terrorisme gaan over de risico's van een doelgerichte cyberaanval of terroristische aanslag. Deze risico's zijn niet het gevolg van menselijke fouten of technisch falen, maar van bewuste acties om de maatschappij te ontwrichten. Net als bij omgevingsveiligheid sluiten we aan bij de methodiek van het regionale risicoprofiel en de rijksbrede risicoanalyse nationale veiligheid. Met een groep experts zijn de kansen van een cyberincident en terroristische aanslag bij verschillende waterstofdragers per ketenstap beoordeeld. Deze kansen zijn gecombineerd met de potentiële effecten die al zijn bepaald bij de indicator voor omgevingsrisico, tot een cyber- en terrorisme-risico per ketenstap. De scores per leveringsketen zijn een optelsom van de afzonderlijke ketenstappen.

⁴¹ Bij transport van waterstofdragers gaat het om slachtoffers als gevolg van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen, niet om een 'gewone' aanrijding of aanvaring waarbij slachtoffers vallen. Dit laatste valt onder transportveiligheid.

Transportveiligheid

Bij transportveiligheid gaat het om de transportrisico's (risico van ongevallen) als gevolg van het aantal (extra) voertuig- en vaartuigbewegingen voor het transport van waterstofdragers. Deze transportrisico's worden bepaald door het aantal tonkilometers per keten te vermenigvuldigen met de schaduwkosten per tonkilometer. Deze methodiek is gebruikelijk voor het bepalen van het risico van transportveiligheid.

De schaduwkosten zijn bepaald door CE Delft en worden ook gebruikt in de Kennisbasis goederenvervoer van het KiM.⁴² De kosten omvatten de medische kosten, productieverliezen, afhandelingskosten en materiële kosten van dodelijke slachtoffers, zwaargewonden en lichtgewonden. Voor transport over weg, water en spoor zijn kentallen bekend. Bij transport per buisleiding zijn er geen ongevallen te verwachten en zetten we de kosten van transportveiligheid op nul.

3.5 DUURZAAM

Het publieke belang Duurzaam bestaat uit drie deelindicatoren: 1) broeikasgasemissies, 2) energieverlies en 3) materiaalgebruik.

Broeikasgasemissies

In de verschillende waterstofketens worden bij productie, conversie, opslag en transport kleine hoeveelheden kool(stof)dioxide, methaan, waterstof en/of distikstofmonoxide (N₂O - lachgas) uitgestoten. Deze emissies dragen direct (kooldioxide, methaan, lachgas) of indirect (waterstof) bij aan versterkte klimaatverandering. Tussen de ketens zijn grote verschillen in het soort uitstoot en de omvang. Inschattingen voor de omvang van de emissies in verschillende ketenstappen zijn gebaseerd op literatuur, met name JRC2.⁴³

Uitstoot van kooldioxide (CO₂) treedt op bij transport door het gebruik van fossiele brandstoffen (in 2030 nog dominant, in 2050 grotendeels uitgefaseerd). Bij de synthese van methanol en LSM wordt CO₂ gebruikt. Deze CO₂ komt bij conversie naar waterstofgas of bij eindgebruik van de drager zelf weer vrij. We rekenen deze 'embedded' CO₂ wel mee bij het bepalen van de broeikasgasemissies van de ketens als sprake is van gebruik van CO₂ uit industriële bronnen (aanname voor 2030) en niet als sprake is van CO₂ uit *direct air capture* (aanname voor 2050).

In de LSM-ketens en bij het transport van methaan via het aardgasnet kunnen ook kleine hoeveelheden methaan verloren gaan. Waterstof ontsnapt in kleine hoeveelheden bij de conversie van verschillende waterstofdragers naar waterstof en bij het transport van waterstof in vloeibare of gasvormige vorm. Bij de conversie van ammoniak treden volgens JRC2 ook geringe emissies van N₂O op.

Het totale effect per keten bepalen we door het effect van methaan-, waterstof- en lachgasemissies uit te drukken in CO₂-equivalenten op basis van de *Global Warming Potential* van methaan, waterstof en lachgas ten opzichte van CO₂: het aardopwarmingsvermogen van de ene stof is hoger (per kilo) dan van de andere. We zijn uitgegaan van het *Global Warming Potential* van de stoffen

⁴² CE Delft (2022), De prijs van een reis, de meest recente kentallen voor Nederland, en KiM (2023), Kennisbasis goederenvervoer 2023.

⁴³ European Commission, Joint Research Centre, Arrigoni, A. et al. (2024), *Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

over een periode van 100 jaar. Per keten vermenigvuldigen we de uitstoot van CO₂-equivalenten met de CO₂-prijs.

Energieverlies

Energieverlies is opgebouwd uit twee onderdelen. Ten eerste de energie die nodig is om de waterstof in het exportland te produceren, te binden aan een waterstofdrager of vloeibaar te maken, te verschepen en binnen Nederland op te slaan, verder te transporteren en te converteren tot waterstof of een ander product voor eindgebruik. Het energieverlies voor de productie (*direct air capture*) of afvang van CO₂ wordt hierin meegerekend. Ten tweede de energie die nodig is voor het aanvullen van de hoeveelheid waterstof(drager) die in het hele proces verloren gaat door onbedoelde emissies of benutting als bedoelde brandstof voor stappen in de keten, en dus niet gebruikt kan worden door de eindgebruiker. De optelsom hiervan is de totale energie-input die nodig is om 1 kton waterstof te leveren aan de eindgebruiker. Deze totale energie-input drukken we uit ten opzichte van de energie-inhoud van 1 kton waterstof.

De hoeveelheid hernieuwbare energie die nodig is voor de productie van een energetisch equivalent volume aan waterstof(dragers) voor een eindgebruiker is niet alleen relevant voor de efficiëntie van het proces en dus de betaalbaarheid, maar ook voor het gebruik van energie zolang er mondiaal nog schaarste aan hernieuwbare energie bestaat.

Inschattingen voor de benodigde hoeveelheid energie en de verliezen gedurende productie en transport zijn gebaseerd op literatuur, met name JRC2.

Materiaalgebruik

Onder materiaalgebruik bepalen we de omvang van het beslag op de schaarse materialen die nodig zijn voor de waterstofketen. Het gaat hierbij om verschillende katalysatoren en om dragermaterialen die gebruik maken van grondstoffen die door EU⁴⁴ zijn aangemerkt als kritiek. De laatste categorie heeft betrekking op boor, dat gebruikt wordt in boorhydride. Idealiter zou je ook het verlies aan schaarse materialen willen meenemen. Hierover is echter weinig informatie beschikbaar. We beperken ons daarom tot de hoeveelheid materiaal in gram per kilogram waterstof dat nodig is voor de jaarvraag (bron: JRC2). De verschillende materialen brengen we onder één noemer door ze te vermenigvuldigen met de huidige marktprijs. De indicator die we per keten vergelijken, is dus de waarde van het beslag op schaarse materialen per kton waterstofequivalent.

3.6 ADAPTIEF

Adaptiviteit is belangrijk vanwege de onzekerheden rondom de ontwikkeling van waterstofdragers en waterstofketens. Hierdoor lopen marktpartijen investeringsrisico's. Het is daarom een voordeel als er minder risicovolle investeringen nodig zijn voor een keten of als de installaties en transportmiddelen flexibel zijn en voor andere toepassingen kunnen worden ingezet.

De mate van adaptiviteit is uitgedrukt in de waarde van de aanvullende investeringen die niet voor andere doeleinden kunnen worden gebruikt. Dit is de '*value at risk*'. Samen met experts is het aandeel beoordeeld van alle investeringen dat aanvullend moet worden gedaan en de mate waarin de investering voor andere doeleinden kan worden aangewend. De uiteindelijke indicator per keten is de omvang van de investering die nodig is en later niet anders kan worden ingezet, uitgedrukt per kton waterstofequivalent. Hoe hoger deze risicovolle investeringen, hoe lager de

⁴⁴ [Website](#) van Europese Commissie over Critical Raw Materials.

score op adaptiviteit. De investeringen die per keten nodig zijn, hebben we vooral gebaseerd op JRC1.

3.7 RECHTVAARDIG

Rechtvaardig gaat over de eerlijke verdeling van lusten en lasten. We concretiseren het belang Rechtvaardig op het niveau van producerende en importerende of doorvoerende landen in twee deelindicatoren: 1) de afwenteling van externe kosten van import op de producerende landen en 2) de afwenteling van de externe kosten van de leveringsketen in Nederland op de omgeving.

Lusten en lasten zijn minder eerlijk verdeeld als een relatief groot deel van de ongeprijsde (externe) effecten van import zoals de milieu-impact en de uitstoot van broeikasgassen in de producerende landen terecht komt, of als er relatief veel externe effecten van de leveringsketen van waterstofdragers in Nederland neerslaan. De ‘*true price*’ ligt dan veel hoger dan de in rekening gebrachte kostprijs.⁴⁵

We hebben ook andere uitwerkingen van het begrip Rechtvaardig overwogen. Deze uitwerkingen leiden niet tot onderscheidende beoordelingen, of er zijn niet de juiste data per keten voor beschikbaar. Bijvoorbeeld of de baten van de productie van waterstofdragers bij de inwoners van een exportland terecht komen of bij buitenlandse investeerders, kan alleen per land en project goed worden bepaald. Dat past niet binnen dit onderzoek.

Afwenteling van externe kosten op producerende landen

Importketens waarbij de *true price* en de importkostprijs dicht bij elkaar liggen beschouwen we in deze studie als het meest rechtvaardig. Hiervoor delen we de totale waarde van de externe effecten van import door de kosten van de import in Nederland. Hoe hoger de uitkomst, des te meer sprake is van afwenteling van externe kosten op producerende landen en dus hoe minder rechtvaardig en hoe lager de score op dit belang.

De kosten van import zijn bepaald bij het publiek belang Betaalbaar. De externe effecten van import volgen deels uit de LCA-studie van JRC2⁴⁶ in combinatie met milieukostenfactoren van CE Delft.⁴⁷

Afwenteling van externe kosten van ketens in Nederland

Als indicator voor rechtvaardigheid voor (inwoners van) Nederland gebruiken we de totale waarde van de externe effecten in Nederland per keten gedeeld door de kosten van de ketenactiviteiten in Nederland. Dat wil zeggen: de kosten van overslag en opslag, transport en de conversiestappen⁴⁸. De kosten hiervoor zijn bepaald bij Betaalbaar. De externe kosten in Nederland bestaan uit:

- de gemonetariseerde uitstoot van broeikasgassen,
- de gemonetariseerde milieueffecten, en

⁴⁵ De *true price* is een concept dat zowel de marktprijs als alle externe kosten (sociale en milieukosten) omvat. De *true price* is een manier om verborgen kosten bij de productie van goederen en diensten zichtbaar te maken.

⁴⁶ European Commission, Joint Research Centre, Arrigoni, A. et al. (2024), *Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

⁴⁷ CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.

⁴⁸ Bij export naar Duitsland vervalt in onze analyse de conversiestap bij de eindgebruiker.

- de kosten van transportveiligheid.

Deze zijn berekend bij de publiek belangen Duurzaam, Milieu en Veilig.

3.8 TOEGANKELIJK

Het publieke belang Toegankelijk concretiseren we in deze studie in twee deelindicatoren: 1) het verschil in de kosten voor gebruikers van waterstof in het binnenland en in de importhavens (gelijk speelveld qua kosten) en 2) de nabijheid van of mate van toegang tot de leveringsketens.

Toegankelijk kostenniveau (achterland vs. importhaven)

De toegankelijkheid van het kostenniveau van de waterstofdragers voor verschillende eindgebruikers in het binnenland zetten we af tegen de kosten die een gebruiker in een importhaven heeft. In die haven zijn de kosten per waterstofequivalent het laagst door het ontbreken van transportkosten in Nederland. De indicator is de verhouding tussen de kosten in het achterland in Nederland of Duitsland (aan het eind van het 200 km lange representatieve tracé) en de kosten in de importhavens. Als de kosten in het achterland veel hoger liggen, is er geen sprake van een gelijk speelveld en kunnen daar gevestigde bedrijven moeilijker concurreren met een partij in één van de importhavens. Wij beseffen dat dit een gewenst effect kan zijn als het gaat om concurrentievoordeel ten opzichte van buurlanden.

De variabelen voor deze vergelijking volgen uit de cijfers van het publiek belang Betaalbaar.

Toegankelijk netwerk / nabijheid voor eindgebruikers

Voor de toegankelijkheid van de verschillende waterstofdragers voor eindgebruikers in het achterland gebruiken we een methodiek die is geïnspireerd door de factor nabijheid in andere domeinen (zie [nabijheidsstatistieken](#) CBS). We concretiseren deze indicator als het aandeel bedrijventerreinen dat is aangesloten op de transportmodaliteit. Voor levering via de weg en via het aardgasnet is dit 100%. Voor levering via spoor en water volgt dit uit informatie van de IBIS-database.⁴⁹ Het aandeel bedrijventerreinen dat toegang zal hebben tot specifieke buisleidingen of het waterstofnet schatten we door de gemeenten te inventariseren waar de Delta-Rijn-Corridor en het landelijk waterstofnet volgens plan doorheen lopen. Het aantal bedrijventerreinen in deze gemeenten als fractie van het totaal aantal bedrijventerreinen in Nederland gebruiken we als benadering (zie Bijlage C voor de aantallen).

3.9 RUIMTE

De productie, conversie, transport en opslag van de waterstofdragers vragen om (fysieke) ruimte. Omdat ruimte in Nederland schaars is, zowel boven- als ondergronds, is de impact van de verschillende leveringsketens op het ruimtegebruik, de ruimtelijke inpassing en de eventuele afname van de kwaliteit van de leefomgeving belangrijk.

Voor de conversie- en synthese-installaties, overslag- en opslagfaciliteiten hebben we het benodigde (industriële) grondoppervlak in vierkante meters geschat. Dit is tegen een gemiddelde industriële grondprijs gewaardeerd. Ook voor de aanleg van buisleidingen en eventuele aansluitingen op het waterstofnet is ruimte nodig. Wanneer het gaat om ruimte op een industrieterrein is verondersteld dat het gaat om een strook grond, tegen de industriële grondprijs, die niet meer

⁴⁹ IBIS-database: [Integraal Bedrijventerreinen Informatie Systeem](https://provincies.pleio.nl/), te downloaden via <https://provincies.pleio.nl/>

benut kan worden voor andere doeleinden (opportuïteitskosten). Wanneer het gaat om de aanleg van buisleidingen in natuur- en landbouwgebied is de gemiddelde landbouwgrondprijs gehanteerd.

3.10 MILIEU

Onder Milieu vallen de effecten van verschillende emissies die het milieu en de gezondheid van mens en dier schaden. Het publieke belang Milieu omvat in deze vergelijking de kosten van stikstofuitstoot, fijnstof, ammoniakemissies, habitatschade, geluidsoverlast, de ecotoxiciteit en smogvorming van methaan en waar mogelijk milieueffecten bij calamiteiten. Deze kosten zijn meegerekend in het publieke belang Milieu voor zover deze kosten in Nederland optreden. Milieueffecten in het buitenland worden alleen meegenomen bij het belang Rechtvaardig.

Uitstoot van stikstof, ammoniak, fijnstof en/of methaan veroorzaakt de volgende effecten:

- Gezondheidskosten door de inademing van vervuilende stoffen.
- Schade aan gebouwen en materialen doordat stikstofoxiden corrosie veroorzaken aan gevels, en doordat deeltjes en stof gebouwen en materialen vervuilen.
- Verlies van landbouwgewassen door o.a. de verzurende stoffen en secundaire ozon.
- Impacts op ecosystemen en biodiversiteit doordat luchtvervuilende stoffen schade aan ecosystemen veroorzaken.

De kosten van geluid zijn gedefinieerd als de kosten voor derden (bijv. omwonenden) van verkeersgeluid dat leidt tot fysieke of psychische klachten bij deze mensen. Drie andere schadelijke effecten van geluid zijn niet meegenomen door het ontbreken van betrouwbare data hierover. Het gaat om productiviteitsverlies, verstoring van rustige gebieden en effecten op ecosystemen.

Verschiedende negatieve effecten van transport op natuur en landschap vallen onder habitatschade (aantasting van het natuurlijk leefgebied van dier- en plantsoorten). Het gaat om habitatverlies door ruimtegebruik van transportinfrastructuur, habitatfragmentatie of barrièrewerking door grote en brede hoofdinfrastructuren zoals snelwegen en spoorlijnen, en aantasting van het leefgebied als gevolg van milieubelastende stoffen anders dan NO_x en fijnstof. Directe en indirecte broeikasgasemissies (kooldioxide, methaan, waterstof, lachgas) zijn voor zover ze tot klimaatverandering leiden meegenomen bij het publieke belang Duurzaam. De effecten van methaan zijn hiervoor gesplitst in klimaateffecten en effecten als gevolg van de ecotoxiciteit en smogvorming.

Binnenlands transport per weg, water en spoor veroorzaakt NO_x en fijnstofemissies, habitatschade en geluidsoverlast. Ook kunnen milieucalamiteiten optreden. Voor de binnenvaart is geen geluidsoverlast verondersteld door de grotere afstand tot omwonenden. Voor deze effecten zijn kentallen bekend (bron: KiM) die we combineren met de vervoerde tonkilometers per keten. Transport per buisleiding levert geen uitstoot van NO_x, fijnstof of geluid op doordat elektrische pompen worden gebruikt.⁵⁰

Bij conversie en opslag van waterstofdragers treden ook emissies op. In de ketens waarin ammoniak wordt omgezet naar waterstof is sprake van ammoniak- en NO_x-emissies en bij LOHC-conversies van NO_x-emissies (bron: JRC2). Voor geluidsemissies, fijnstof en habitatschade bij conversie-installaties hebben we onvoldoende data gevonden.

⁵⁰ In 2030 veroorzaakt de opwekking van de gebruikte elektriciteit wel NO_x-emissies. Deze zijn meegerekend.

Het effect van milieucalamiteiten is qua grootteorde geschat door de kans op een calamiteit te vermenigvuldigen met het vrijkomende volume en de schaduwkosten van de drager bij emissie naar het milieu.

Dit hoofdstuk licht de gevolgde aanpak van de multicriteria-analyse toe. Multicriteria-analyses worden op verschillende terreinen waaronder energievraagstukken toegepast. Deze methodiek is een adequate manier om ongelijksoortige criteria mee te wegen, die niet eenvoudig onder een noemer te brengen zijn; de zogenaamde vergelijking van appels, peren en citroenen. We hebben gekozen voor een multicriteria-analyse waarbij de publieke belangen zijn vertaald naar indicatoren, die zoveel mogelijk gekwantificeerd en zo mogelijk gemonetariseerd zijn, en in andere gevallen kwalitatief beoordeeld zijn door experts.

Een multicriteria-analyse bestaat in zijn algemeenheid uit zeven inhoudelijke stappen:

1. Identificeren van de alternatieven (de te beoordelen leveringsketens, zie Hoofdstuk 2),
2. Bepalen van de criteria (de publieke belangen, zie Hoofdstuk 3),
3. Bepalen van de scores van de alternatieven (de te beoordelen ketens),
4. Normalisatie van de scores op de criteria (de publieke belangen),
5. Weging van de criteria (de publieke belangen),
6. Rangschikking van de alternatieven (de te beoordelen ketens),
7. Gevoeligheidsanalyse.

De eerste twee stappen zijn in de vorige twee hoofdstukken toegelicht. In dit hoofdstuk gaan we kort in op de overige stappen. Per onderdeel van de multicriteria-analyse maken we soms ook gebruik van andere methoden. Deze worden eveneens kort verduidelijkt.

4.1 **BEPALEN VAN DE SCORES OP DE PUBLIEKE BELANGEN**

De score op de publieke belangen wordt vooral gebaseerd op informatie uit de bestaande literatuur. Witte vlekken worden waar mogelijk aangevuld op basis van interviews en *expert judgement*. De score van een keten op een belang zoals Betaalbaar is goed in euro's uit te drukken. De score op Milieu (bijv. uitstoot van milieubelastende stoffen per keten), Veilig (potentieel aantal slachtoffers en gewonden) of Ruimte(beslag) kunnen we wel kwantificeren en eventueel monetariseren met behulp van schaduwkosten of grondprijzen. Omdat dit een methodische benadering met virtuele euro's betreft beschouwen we de indicator als kwantitatief in plaats van monetair. Monetarisering kan soms wenselijk zijn als er bijvoorbeeld verschillende typen grondgebruik moeten worden vergeleken.⁵¹ Indicatoren die in dit onderzoek niet feitelijk kwantificeerbaar zijn, zoals cyberrisico, rechtvaardigheid of adaptiviteit, beoordelen we via een voor dit onderzoek ontwikkelde indicator en *expert judgement*. Dit kan een bestaande methode voor kwalitatieve ranking

⁵¹ Ruimtebeslag kan in hectares worden vergeleken als het type grond en gebruik gelijk zijn. Als dit niet het geval is, kan het zinvol zijn het ruimtebeslag te monetariseren om het ruimtebeslag te kunnen vergelijken. Bijvoorbeeld een keten die beslag legt op landbouwgrond waar een buisleiding doorheen loopt: de grond kan dan nog wel gebruikt worden; versus een keten waar vooral ruimtebeslag is op een industrieterrein waar die grond niet tegelijk voor andere doeleinden gebruikt kan worden.

zijn zoals bij omgevingsveiligheid en cyberrisico of een nieuwe indicator zoals voor de publieke belangen Adaptief en Betrouwbaar.

4.2 NORMALISATIE VAN DE SCORES OP DE PUBLIEKE BELANGEN

Nadat de scores op de individuele publieke belangen zijn bepaald, worden ze genormaliseerd. Dat is nodig om de scores ondanks de verschillende eenheden (kilogrammen, ++, euro's) te kunnen combineren tot een eindscore per keten. Daarvoor worden alle ketens per publieke belang op een nieuwe schaal afgebeeld, die tussen 0 en 1 loopt. We gebruiken hiervoor een lineaire min-max-normalisatie. Dit is de meest gebruikte aanpak.⁵²

Voor de verdeling tussen de 0 (de min) en de 1 (de max) worden in de literatuur van MCA-studies verschillende aanpakken voorgesteld: lokale en globale normalisatie.

Bij *lokale normalisatie* krijgt de beste score onder de ketens de hoogste waarde (=1), de slechtste krijgt de laagste waarde (=0). Dat betekent bijvoorbeeld dat de keten met de laagste kosten (= beste op Betaalbaar) de hoogste score van 1 krijgt. Ketens die niet het beste maar ook niet het slechtste presteren op Betaalbaar krijgen een waarde die tussen 0 en 1 ligt. De keten die een kostenniveau heeft dat halverwege de goedkoopste en duurste keten ligt, krijgt dus een genormaliseerde score van 0,5.

Nadeel van deze vorm van normalisatie is dat de beoordeling sterk afhangt van de ketens die beschouwd worden en van hun scores op de individuele publieke belangen. Zowel het minimum als het maximum worden bepaald door de score van één van de ketens. Als het verschil tussen het minimum en maximum verandert, bijvoorbeeld in een gevoeligheidsanalyse, kunnen de genormaliseerde scores sterk veranderen. Een score in een gevoeligheidsanalyse kan immers buiten de bandbreedte van de oorspronkelijke score vallen. Het effect van de weegfactoren en daardoor de eindscore verandert dan ook. Hierdoor worden vergelijkingen minder inzichtelijk.

Bij *globale normalisatie* worden de minimale en maximale theoretische scores voor elk publiek belang gebruikt om de scores per publiek belang op een vergelijkbare schaal te brengen, ongeacht de precieze scores van de onderzochte ketens. Met deze aanpak komen de scores altijd uit op de schaal tussen 0 en 1 en blijven de bandbreedtes tussen minimum en maximum en de impact van de weegfactoren gelijk. Dit is een voordeel. Nadeel is dat het niet altijd mogelijk is de minimale en maximale theoretische waardes eenvoudig te bepalen. Dat geldt in deze studie bijvoorbeeld voor het publieke belang Duurzaam – broeikasgasemissies. Het is logisch dat de beste theoretische score nul emissies is. De slechtste score is echter niet direct duidelijk. Deze zal minimaal zo groot moeten zijn als de hoogste uitstoot die te vinden is in één van de ketens die in deze studie is beschouwd inclusief de gevoeligheidsanalyse, maar zou ook hoger kunnen liggen.

⁵² Naast min-max-normalisatie zijn er andere methoden mogelijk. Deze zijn complexer en worden minder vaak gebruikt. Bijvoorbeeld 1) Z-score-normalisatie: de scores worden omgezet naar z-scores door het gemiddelde van de scores af te trekken en te delen door de standaardafwijking van de scores, 2) Decielrangschikking: de scores worden gerangschikt en verdeeld in tien gelijke delen (decielen). Elke score wordt vervolgens vervangen door het midden van het bijbehorende deciel, 3) Vectornormalisatie: elke vector (set van scores) wordt genormaliseerd tot een lengte van 1 door de vector te delen door zijn Euclidische lengte.

Een voordeel van globale normalisatie is dat het toevoegen van nieuwe waterstofdragers of ketens die een score hebben die buiten de bandbreedte van de andere ketens valt, niet leidt tot verschuivingen van de resultaten van de andere ketens. Ook zorgt het verwijderen van een waterstofdrager of keten uit de resultaten niet voor een mogelijke verschuiving van de min- en max-scores.

In deze studie volgen we daarom zoveel mogelijk de methodiek van globale normalisatie omdat dit de ongewenste verschuivingen van scores voorkomt, ook bij extra gevoeligheidsanalyses. Wanneer het niet mogelijk was om zowel het minimum als het maximum theoretisch te bepalen, hebben we de hoogste of laagste score van de ketens in alle beschouwde ketens in de verschillende varianten⁵³ gebruikt. In bijlage D staat per publiek belang hoe de minimum en de maximum-waarde voor normalisatie zijn bepaald.

4.3 WEGING VAN DE PUBLIEKE BELANGEN

Omdat de hoogste score op bijvoorbeeld Betaalbaar niet vanzelfsprekend dezelfde publieke waarde heeft als de hoogste score op Duurzaam is een onderlinge weging van de publieke belangen nodig om de scores te kunnen combineren tot één eindscore. Deze weging is niet eenvoudig objectief vast te stellen of wetenschappelijk te onderbouwen. Daarvoor zijn twee redenen:

1. De ene partij weegt het belang van Milieu zwaarder dan Betaalbaar of Veilig. De andere partij geeft juist het meeste gewicht aan het publieke belang Betaalbaar of Veilig. Omdat het om de algemene waardering van het publieke belang gaat, willen we zoveel mogelijk partijen met verschillende achtergrond betrekken in plaats van alleen als onderzoekers of ministerie de weging te bepalen. We gebruiken een *Modified Delphi*-aanpak om een zo gebalanceerd mogelijke weging van de verschillende publieke belangen en input van deelnemers te vinden (binnen de mogelijkheden van tijd en budget) en de discussie zo feitelijk en objectief mogelijk te maken.
2. Ook wanneer een deelnemer zelf een objectieve ranking wil bepalen, is het niet eenvoudig om de juiste weegfactoren te vinden. We ondersteunen de bepaling van de weegfactoren daarom met een gestructureerde aanpak die het *Analytic Hierarchy Process (AHP)* heet. In deze aanpak vergelijk je steeds twee alternatieven met verschillende publieke belangen met elkaar en geef je de onderlinge voorkeur aan. Uit de resultaten kan via een wiskundige aanpak de meest representatieve weging van alle publieke belangen worden bepaald.

Door deze combinatie van een *Modified Delphi*-aanpak met AHP komen we zo dicht mogelijk bij een objectieve weging. Aan dit proces hebben 21 personen deelgenomen vanuit verschillende organisaties, zie Tabel 5.

In bijlage E is meer informatie te vinden over de gebruikte methoden. Hoofdstuk 5 laat de uitkomsten voor de weegfactoren zien.

⁵³ In twee van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses bleek de slechtste score soms net buiten de gehanteerde bandbreedte voor de normering te liggen. In deze gevallen hebben we de score op dat publieke belang gelijkgesteld aan de slechtste score op de normeringsbandbreedte. Het effect van deze vereenvoudiging is klein en leidt niet tot andere conclusies.

Tabel 5: Organisaties die deelnemers aan Delphi-proces leverden (totaal 21 deelnemers)

Overheden (8)	Ketenpartijen (8)	NGO & kennis en advies (5)
Ministerie van KGG	Havenbedrijf Amsterdam	IPHE
Ministerie van IenW (2x)	Havenbedrijf Rotterdam	Natuur & Milieu
Ministerie van BZK	Koninklijke Binnenvaart Nederland	NIPV
Ministerie van JenV	NL-Hydrogen	PBL
DCMR	VELIN	Universiteit Utrecht
IPO	VEMW	
Veiligheidsregio Kennemerland/Programma Veilige Energietransitie	VNCI	
	VOTOB	

4.4 RANGSCHIKKING VAN DE ALTERNATIEVEN

Een eenvoudige multicriteria-analyse combineert de scores op de publieke belangen met de weegfactoren tot een eindscore. Dit is de zogenaamde ‘Nuts’-score, een score die een indicatie is voor het maatschappelijk ‘Nut’. Vervolgens bepaalt men de meest aantrekkelijke keten door de leveringsketens te ordenen op grond van afnemende Nutsscores. De keten met de hoogste Nutscore verdient de voorkeur, de keten met de op één na hoogste Nutscore volgt daarna, etc.

In een dergelijk aanpak wordt alleen gekeken naar de hoogste Nutscore en niet of een keten wellicht op één publiek belang een heel lage score heeft. Bij onderhandelingen over alternatieven in de praktijk is dit echter wel vaak een belangrijk aspect. Partijen die een bepaald publiek belang doorslaggevend vinden, zullen een minimale score eisen op dat belang en een keten met de alleraagste score op dat belang niet accepteren. Wij rangschikken de alternatieven (de ketens) daarom standaard op een meer geavanceerde manier.

De VIKOR *Multicriteria Optimization and Compromise Solution*⁵⁴ bepaalt de aantrekkelijkheid van een leveringsketen aan de hand van de afstand tot de ideale score op elk publiek belang en de afstand tot de minst ideale/de slechtst mogelijke score op elk publiek belang. Deze twee scores kunnen ten opzichte van elkaar worden gewogen, maar meestal wordt een 50-50 weging gebruikt. De keten die het beste presteert op de combinatie is dan de keten die de voorkeur krijgt. Dit is een keten die redelijk dicht bij de beste score op elk publiek belang ligt en redelijk ver van de slechtste score op elk publiek belang.

TOPSIS (*Technique for order preference by similarity to an ideal solution*) is een alternatieve methode. Hiermee wordt ook de aantrekkelijkheid van een alternatief bepaald aan de hand van de afstand tot de ideale score op elk criterium (publiek belang) en de afstand tot de minst ideale/de slechtst mogelijke score op elk criterium, maar varieert het gewicht hiertussen niet: het is altijd 50-50. Aanvullend krijgen belangrijke criteria, dat wil zeggen criteria waarvoor een hogere weegfactor met de AHP-aanpak is vastgesteld, een hoger gewicht. De afstand tot de ideale score en de minst ideale score op dat criterium telt zwaarder mee in de beoordeling.

⁵⁴ In het Servisch: VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

Omdat de TOPSIS-methode het effect van de weegfactoren versterkt, geven we de voorkeur aan de VIKOR-methode boven de TOPSIS-methode in dit onderzoek. In bijlage F is meer informatie te vinden over de VIKOR-methode en een getallenvoorbeeld.

4.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE

Tot slot voeren we een aantal gevoeligheidsanalyses uit van de resultaten. Het gaat om de volgende gevoeligheidsanalyses:

- De gevoeligheid voor verschillende weegfactoren. Over de uitkomsten van de Delphi-analyse kunnen verschillen van inzichten bestaan. Daarom wordt de gevoeligheid voor een alternatieve weging bepaald (impact op ranking). In dit geval hebben we de gevoeligheid van de eindscore bepaald voor:
 - weegfactoren die volgen uit een verdeling van 100 punten in plaats van de Delphi-scores;
 - een set weegfactoren waarbij betaalbaarheid twee keer zo zwaar is gewogen en het gewicht van duurzaamheid en veiligheid is gehalveerd ten opzichte van de weegfactoren die volgen uit de Delphi-scores;
 - *gelijke* weging van de publieke belangen (elk publiek belang 10%).
- De gevoeligheid voor de transportafstand over zee. Afhankelijk van waar de waterstofdrager wordt geproduceerd, moet er per schip een grotere afstand worden afgelegd naar Nederland. Dit is van invloed op de kosten, het energieverlies en de emissies gedurende zeetransport en dus op de ranking.
- De gevoeligheid voor het volume van de getransporteerde waterstofdragers (impact op individuele scores op belangen en dus op ranking).
- De gevoeligheid voor opslag en conversie van waterstofdragers buitengaats ten opzichte van op land in een importhaven. Dit kan impact hebben op individuele scores op publieke belangen, met name Veilig en Milieu, en dus op de ranking.
- De gevoeligheid voor meer progressieve aannames voor energieverlies, emissies en sommige kosten in 2050 dan in de basissituatie voor 2050.
- De gevoeligheid voor het gebruik van een andere bron voor de kosteninschattingen van geïmporteerde waterstofdragers. In de basissituatie gebruiken we data van Hy-Delta, in de gevoeligheidsanalyse het hoge scenario uit JRC1.
- De gevoeligheid voor het gebruik van CO₂-afvang in Nederland bij *steam reforming* van LSM en methanol.

VERGELIJKING WATERSTOFDRAGERS DEEL B: UITKOMST DELPHI-SESSIE

HOOFDSTUK 5 RESULTATEN WEGING

De weegfactoren die we hebben gebruikt om de eindscore te bepalen zijn via een Delphi-aanpak en door toepassing van AHP bepaald met een breed samengestelde groep van 21 deelnemers, zie hiervoor paragraaf 4.3. Dit hoofdstuk gaat in op de resultaten hiervan: de weegfactoren.

Het resultaat van de Delphi-aanpak is ook gebruikt om de weging van verschillende deelindicatoren te bepalen in het geval dat een publiek belang is geconcretiseerd via meer dan één indicator. Dit geldt voor de publieke belangen Veilig, Duurzaam, Rechtvaardig en Toegankelijk.

Voor goed begrip is het belangrijk om te vermelden dat in de Delphi-aanpak geen vragen zijn gesteld waarin specifieke waterstofdragers werden vergeleken. Dit is gedaan om de afweging tussen de publieke belangen zo objectief mogelijk te laten verlopen. De uitkomst van de weging is op dezelfde wijze toepasbaar op de huidige set van zeven waterstofdragers als op een set van andere dragers.

5.1 WEEGFACTOREN PUBLIEKE BELANGEN

Figuur 11 geeft de resultaten van de weging van de publieke belangen na de analyse van de ingevulde paarsgewijze vragen. Veilig en Duurzaam worden verreweg het zwaarst gewogen door de Delphi-groep. Daarna volgen op enige afstand Milieu en Betaalbaar. De overige belangen krijgen samen het laatste kwart van de punten.



Figuur 11: Resulterende weging van publieke belangen voor waterstofdragers op basis van Delphi-scores

Paragraaf 5.4 geeft de argumenten die door de deelnemers in de Delphi-sessie zijn gebruikt om tot de uiteindelijke weging te komen. Hier volgt een samenvatting van de voornaamste argumenten.

Een belangrijk argument genoemd door de deelnemers voor de hoge score voor Veilig is dat het verkleinen van het risico van een catastrofe (zeker als het gaat om giftige gaswolken) belangrijk is voor acceptatie en draagvlak van de energietransitie en dus voor de snelheid en implementatie van de klimaatplannen. De inpassing van waterstof in den brede gaat volgens de deelnemers sowieso al knellen op het gebied van veiligheid. Daarom moet de beschikbare veiligheidsruimte efficiënt gebruikt worden. Ketens die per waterstofequivalent meer veiligheidsruimte nodig hebben dan andere ketens zijn minder efficiënt.

De reden dat Duurzaam een hoge weging krijgt van de deelnemers, is dat het einddoel van de energie- en grondstoffentransitie inclusief het gebruik van groene waterstof(dragers) het verminderen van broeikasgassen is. Zonder deze reductie is men contraproductief bezig. Bovendien is een hoge uitstoot van broeikasgassen een vorm van afwentelen in de tijd, aldus de Delphi-groep.

Milieu krijgt een relatief zwaar gewicht van de deelnemers omdat de uitstoot van gevaarlijke stoffen leidt tot minder biodiversiteit en daardoor tot instabielere ecosystemen en tot gezondheidsschade. Dat is gevaarlijk voor iedereen, ook voor de economie. Een hoge NO_x-uitstoot kan er op plaatsen met weinig stikstofruimte voor zorgen dat projecten mogelijk niet doorgaan.

Het publieke belang Betaalbaar vinden de deelnemers belangrijk omdat de kostprijs momenteel een drempel voor implementatie van de waterstofketens vormt. Met een lage kostprijs komen initiatieven eerder van de grond. En zonder lage prijs is er geen duurzaam, betaalbaar alternatief voor fossiele brandstoffen. De betaalbaarheid van de waterstof is doorslaggevend voor business cases en draagvlak, aldus de Delphi-groep.

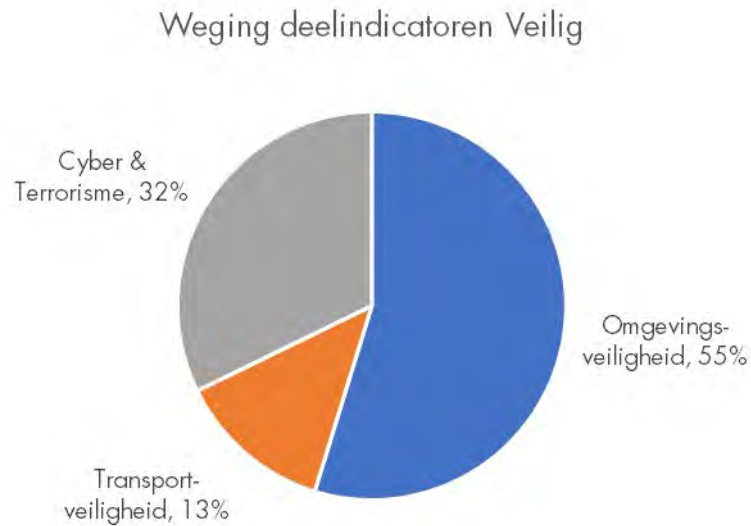
5.2 WEEGFACTOREN INDICATOREN

Vier van de tien publieke belangen zijn geconcretiseerd door middel van twee of drie indicatoren, waarvan de scores niet direct kunnen worden opgeteld. Om deze scores wel tot één waarde per publiek belang te kunnen combineren zijn ook hiervoor weegfactoren bepaald.

Veilig

Het publieke belang Veilig is opgebouwd uit drie deelindicatoren: omgevingsveiligheid, cyberveiligheid/terrorisme en transportveiligheid. Figuur 12 geeft de weging tussen deze drie deelindicatoren; samen vormen deze indicatoren 29,3% van de totale weging.

Omgevingsveiligheid is van deze drie als het meest belangrijk beoordeeld door de deelnemers. Dit komt doordat een goede waarborging van de omgevingsveiligheid ook voor een kleinere impact van een potentiële cyberaanval of terroristisch incident zorgt en omdat de beschikbare veiligheidsruimte voor inpassing van waterstofdragers al beperkt is. Transportveiligheid is volgens de groep minder dominant in deze studie. De reden is dat bij omgevingsveiligheid er sprake kan zijn van een catastrofe, die altijd meer impact heeft dan een groot verkeersongeval. Volgens de Delphi-groep is voor publieke acceptatie omgevingsveiligheid daarom kritischer dan transportveiligheid. Transportveiligheid gaat immers over het risico op ongevallen met verkeersslachtoffers en materiële schade, niet om het risico voor de omgeving van een ongeval met transport van gevaarlijke stoffen.

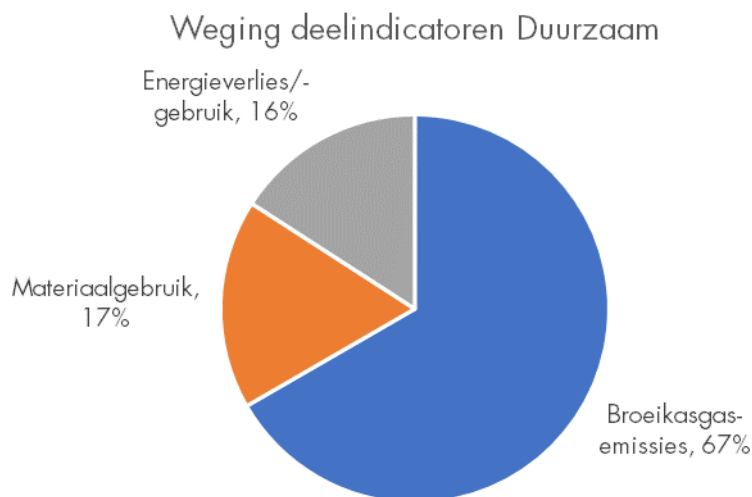


Figuur 12: Verdeling weging deelindicatoren Veilig op basis van Delphi-scores

Duurzaam

Het publieke belang Duurzaam is ook met drie deelindicatoren geconcretiseerd: energieverlies in de keten, broeikasgasemissies, en beslag op schaarse materialen. Figuur 13 geeft de weging tussen deze drie deelindicatoren; samen is dit 23,6% van de totale weging.

De uitstoot van broeikasgasemissies is veel belangrijker dan de andere twee deelindicatoren volgens de Delphi-groep, omdat de reductie van broeikasgassen de voornaamste reden is dat Nederland groene waterstof wil importeren.

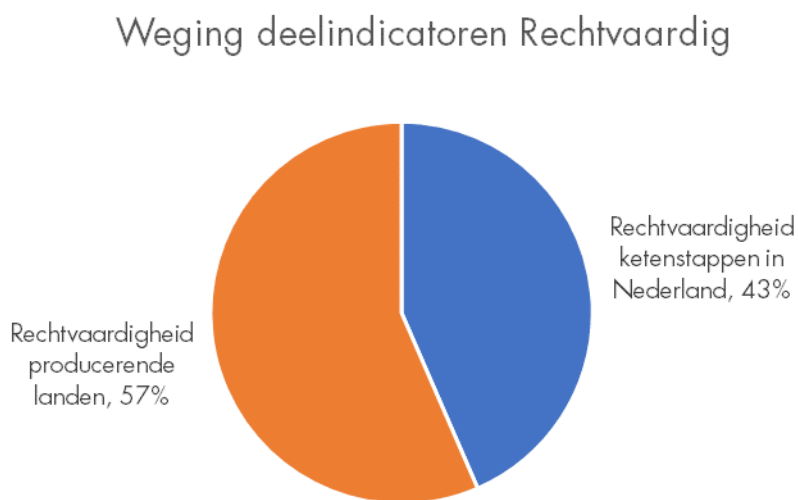


Figuur 13: Verdeling weging deelindicatoren Duurzaam op basis van Delphi-scores

Rechtvaardig

Het publieke belang Rechtvaardig is opgebouwd uit twee deelindicatoren: een eerlijke verdeling van lusten en lasten in internationaal perspectief en een eerlijke verdeling bij transport in en door Nederland. Figuur 14 geeft de resulterende weging tussen deze twee indicatoren; samen is dit 3,8% van de totale weging.

De eerlijke verdeling ten opzichte van producerende landen wordt in het Delphi-proces net iets zwaarder gewogen, omdat deelnemers vinden dat Nederland zijn verantwoordelijkheid moeten nemen en de negatieve externaliteiten niet mag afwentelen op het buitenland. De vraag wordt wel gesteld of als Nederland een hogere en eerlijkere prijs betaalt aan het exportland, dat geld dan goed terecht komt, of is het een druppel op een gloeiende plaat, en benadeelt Nederland zichzelf met de hogere prijs meer dan dat Nederland de exportlanden bevoordeelt?



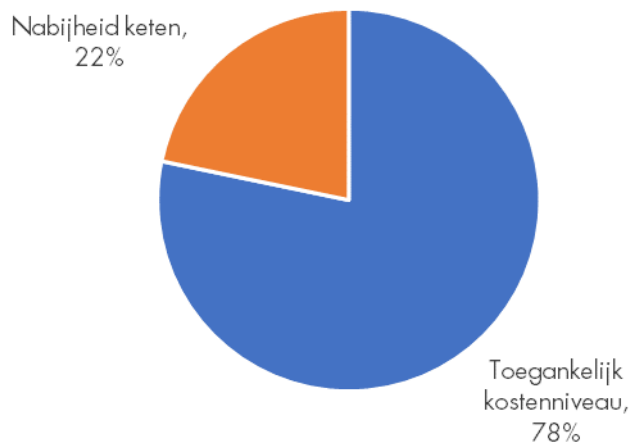
Figuur 14: Verdeling weging deelindicatoren Rechtvaardig op basis van Delphi-scores

Toegankelijk

Het publieke belang Toegankelijk is opgebouwd uit twee deelindicatoren: nabijheid van de keten voor waterstof(dragers) voor bedrijven in Nederland, en de mate van een gelijk kostenniveau in het land. Figuur 15 geeft de resulterende weging tussen deze twee deelindicatoren; samen is dit 4,2% van de totale weging.

De deelindicator voor gelijk kostenniveau wordt ongeveer drie keer zo zwaar gewogen door de groep als de deelindicator voor Nabijheid van de keten. Genoemde argumenten hiervoor zijn dat hoewel grotere toegankelijkheid van de keten kan helpen om het gebruik van waterstof te vergroten, clustering van bedrijven rond een beperkte infrastructuur volgens de groep ook veel voordelen heeft: een overzichtelijkere markt, minder benodigde waterstofopslag, lagere importbehoefte en dus hogere onafhankelijkheid, hogere efficiëntie van elektrificatie, lagere veiligheidskosten (minder nadelig effect op omgevingsveiligheid), en lagere waterstofnetkosten.

Weging deelindicatoren Toegankelijk



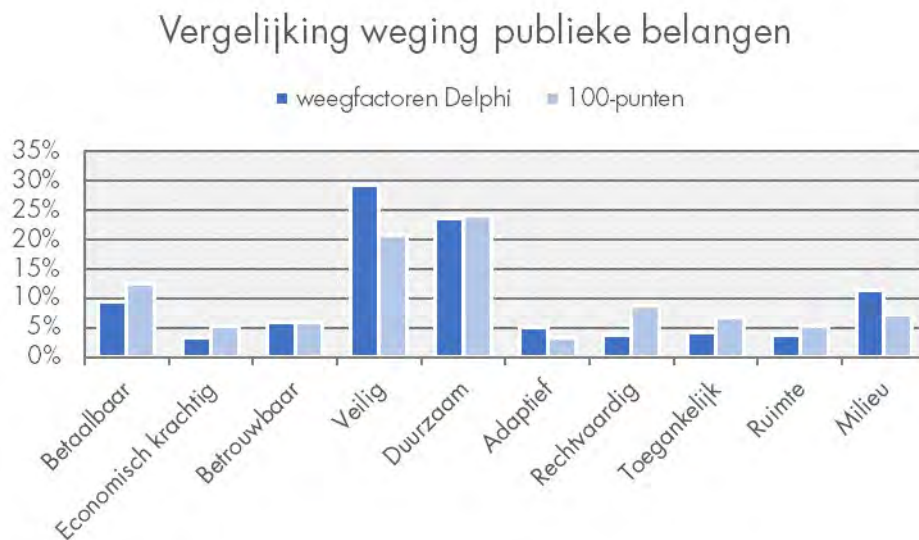
Figuur 15: Verdeling weging deelindicatoren Toegankelijk op basis van Delphi-scores

5.3 VERGELIJKING MET 100-PUNTENWEGING

Naast de paarsgewijze vergelijkingen tussen publieke belangen hebben de deelnemers aan het Delphi-proces 100 punten verdeeld over de indicatoren die zijn gebruikt om de 10 publieke belangen te concretiseren. Dit is gedaan als controle op de consistentie van de antwoorden op de Delphi-enquête en AHP-analyse.⁵⁵

De vergelijking van beide methoden levert geen reden op om te twijfelen aan de consistentie van de beantwoording van de enquête met paarsgewijze vergelijkingen. Volgens de enquêteresultaten is de weging van Veilig en Milieu in de Delphi-resultaten iets hoger dan bij de verdeling van 100 punten. Dat kan goed worden verklaard uit het feit dat het belang Milieu bij het verdelen van de 100 punten niet altijd zoals bedoeld was in de breedte is beschouwd; het gaat niet alleen om NO_x, maar ook om andere milieuemissies: geluid, habitatschade, fijnstof, ammoniakuitstoot etc. Ook werd het publieke belang Veilig in de Delphi-bijeenkomst zwaarder gewogen.

⁵⁵ Normaal gesproken is voor een volledige AHP-analyse bij dit aantal indicatoren nodig dat de respondenten 120 vergelijkingen scoren (16 indicatoren, dus 15+14+13+...+1=120 paarsgewijze vragen). Dan kan de mate van interne consistentie uit de antwoorden worden afgeleid. Dat aantal is echter alleen realistisch in een academische omgeving. Het tijdsbeslag voor de deelnemers bij de huidige invulling bedroeg nu al 1-1,5 dag. Om die reden is voor een andere check op de consistentie gekozen.



Figuur 16: Vergelijking weging Delphi en 100-puntenverdeling

5.4 ARGUMENTEN GEBRUIKT BIJ DELPHI-WEGING

Deze paragraaf geeft een samenvatting van de in het Delphi-proces door de deelnemers naar voren gebrachte argumenten over de publieke belangen.

Betaalbaar

Betaalbaarheid is volgens de deelnemers doorslaggevend voor business cases en draagvlak. De kostprijs is momenteel de drempel voor implementatie van waterstofinitiatieven. Daarom is een lage kostprijs leidend. Met een lage kostprijs komen initiatieven eerder van de grond dan als de kostprijs heel hoog is. En zonder lage prijs is er geen duurzaam, betaalbaar alternatief voor fossiele brandstoffen. De energiekosten zullen naar verwachting de komende jaren stijgen. Er moet nog veel geïnvesteerd worden in nieuwe technologieën en installaties, terwijl de energiekosten nu al voor veel bedrijven en huishoudens hoog zijn. Met name in de beginfase van de markt zijn lagere kosten belangrijk, omdat dit de eindgebruikers in staat stelt te investeren in het gebruik van waterstof en ook meer zekerheid biedt voor de importeurs van waterstof(dragers). Een lage kostprijs kan gunstig zijn voor een waterstofeconomie en het ontwikkelen van toegevoegde waarde in de keten. De hubfunctie voor havens en logistieke sector moet behouden blijven, wil Nederland een speler van betekenis zijn in Noordwest-Europa. Dit vraagt om lage kosten, aldus de Delphi-groep.

Economisch krachtig

Door in te zetten op waterstofketens met een hogere (economische) toegevoegde waarde creëer je kansen voor de toekomstige economie van Nederland, vinden de deelnemers. Hoge toegevoegde waarde komt ten goede aan het land als geheel, een lage kostprijs meer aan het gewin van een beperkt aantal individuen. Een investering in ontwikkelingen met hoge toegevoegde waarde gaat zichzelf uiteindelijk terugverdienen. Voor het draagvlak van doorvoer van energiedragers naar het Europese achterland is voldoende toegevoegde waarde in Nederland belangrijk. Energie is in zijn algemeenheid een schaars goed en vanwege de milieueffecten van het gebruik van energie zou energie vooral gebruikt moeten worden als dit leidt tot een hoge toegevoegde waarde, aldus de Delphi-groep.

Betrouwbaar

Bedrijven zullen alleen overgaan op gebruik van waterstof als zij kunnen vertrouwen op een stabiele toevoer. Voor het slagen van de energietransitie zijn betrouwbaarheid en leveringszekerheid van groot belang volgens de Delphi-groep. Zonder betrouwbare (en betaalbare) duurzame energie komt de energietransitie niet op gang. Voorzieningszekerheid en betrouwbaarheid zijn belangrijke economische waarden. Wanneer de betrouwbaarheid van een waterstofketen lager is, zullen er extra reserves nodig zijn om een gelijke mate van betrouwbaarheid te bereiken, met een kosten-toename tot gevolg volgens de deelnemers.

Veilig

Deelindicator Omgevingsveiligheid

Omgevingsveiligheid is erg belangrijk, zeker omdat de inpassing van waterstof in den brede sowieso al gaat knellen volgens de deelnemers. Daarom vindt de Delphi-groep dat de beschikbare veiligheidsruimte efficiënt gebruikt moet worden. Ketens die per waterstofequivalent meer veiligheidsruimte nodig hebben dan andere ketens zijn minder efficiënt.

Het voorkómen van een catastrofe is volgens de deelnemers belangrijk voor acceptatie en draagvlak van de energietransitie en dus de snelheid en implementatie van verduurzaming. Veiligheid moet te allen tijde leidend zijn, ook boven prijs. Het is belangrijk om alles in het werk te stellen zodat met name grote, maar ook kleine incidenten met nieuwe energiedragers worden voorkomen, vooral als het gaat om giftige gaswolken. Een verhoging van het risico is niet acceptabel, met veiligheid mag je niet marchanderen, aldus de deelnemers. De factor tijd speelt hierbij een rol. Volumes zijn in het begin nog beperkt en daarmee kan op basis van opgedane ervaring worden bijgestuurd. Extra investeringen in duurere modaliteiten of alternatieven zijn verdedigbaar om risico-afwenteling te voorkomen. Goed waarborgen van de omgevingsveiligheid zorgt ook voor een kleinere impact van een cyberaanval of terroristisch incident. De deelnemers vinden dat ongeacht de oorzaak de impact op de omgeving klein moet zijn bij een incident.

Deelindicator Cyberveiligheid & Terrorisme

In zijn algemeenheid geldt dat cybersecurity meer aandacht verdient: men is te goed van vertrouwen, aldus de Delphi-groep. De risico's voor cyberveiligheid en terrorisme zijn groter dan de risico's voor omgevingsveiligheid, ook buiten de toepassing van waterstofdragers. Cyberveiligheid en terrorisme zijn moeilijk controleerbaar. Maatregelen om het effect of de kans op cyberaanvallen en terrorisme te verkleinen zijn lastig volgens de deelnemers.

Deelindicator Transportveiligheid

De veiligheid van transport in Nederland mag volgens de deelnemers niet afnemen als waterstofdragers op grote schaal vervoerd worden in Nederland. Transportveiligheid is belangrijk en kan door modaliteitskeuzes worden beïnvloed.

Adaptief

Voor een snelle stap richting verduurzaming is een adaptieve optie belangrijk. Het risico van *lock-in* wil de Delphi-groep zoveel mogelijk voorkomen, dus er moet blijvende aandacht voor de transitie zijn.

Het risico door gebruik van nieuwe technieken of schakels in de keten zal groter zijn dan de deelnemers idealiter zouden willen; daarom is adaptiviteit belangrijk. Hoe hoger de adaptiviteit

is, hoe makkelijker er in de infrastructuur geïnvesteerd zal worden volgens de deelnemers. Dit is noodzakelijk om de infrastructuur te krijgen om waterstof te distribueren.

Duurzaam

Deelindicator Broeikasgasuitstoot

Lage uitstoot van broeikasgassen is de drijfveer en doel voor de energie- en grondstoffentransitie. Het einddoel van gebruik van groene waterstof(dragers) is het verminderen van CO₂. De CO₂-ruimte is schaars: zonder significante reductie is men met waterstofimporten contraproductief bezig. Hoge uitstoot van broeikasgassen is een vorm van afwentelen in de tijd, aldus de deelnemers. Dat import van groene waterstof duurder kan uitpakken dan import van dragers met minder broeikasgasreductie is volgens de Delphi-groep niet erg. Dat kan een impuls geven aan direct gebruik van elektriciteit, wat uit oogpunt van energie-efficiëntie, broeikasgasemissies én ruimtebeslag wenselijker is dan waterstof en prijsprikkels nodig heeft. Dit laatste argument is overigens meer een pleidooi voor elektrificatie dan relevant voor het onderscheid tussen waterstofdragers.

Deelindicator Energieverlies

Primair is het doel een laag energieverbruik omdat dit zich op vele fronten naar voordelen vertaalt, aldus de deelnemers. Een reductie van het energieverbruik is bovendien nog mogelijk. Een laag energieverlies in de waterstofketens zorgt voor noodzakelijk behoud van de beschikbare energie voor de industrie en maatschappelijk draagvlak door minder transport van gevaarlijke stoffen. Een hoog energieverbruik betekent dat meer energie moet worden opgewekt om ook de ketenverliezen, extra transporten en extra materiaalgebruik te compenseren.

Deelindicator Materiaalgebruik

Materialenschaarste is volgens de Delphi-groep een groot toekomstig probleem, onder meer als gevolg van geopolitiek. Het beslag dat wordt gelegd op kritieke grondstoffen wordt steeds belangrijker als potentieel knelpunt voor het bedrijfsleven. Er is behoefte aan strategische autonomie voor de Nederlandse en Europese economie. Een belangrijk deel van de benodigde energietransitie is een transitie naar een circulaire economie. Hiermee worden meerdere milieudoelstellingen en voorzieningszekerheid gewaarborgd, aldus de deelnemers.

Rechtvaardig

Deelindicator Doorvoer en ketenstappen in Nederland

Verdelende rechtvaardigheid is essentieel voor het draagvlak voor vervoer en toepassing van waterstofdragers, zeker als de effecten en baten ongelijk verdeeld zijn tussen stakeholders. Doorvoer naar het buitenland moet volgens de deelnemers niet gepaard gaan met hoge externe kosten voor het binnenland. Industriële activiteiten moeten geen onevenredig hoge externe kosten opleveren voor de omgeving. Als deze externe kosten niet in de prijs worden verdisconteerd, betalen de Nederlandse belastingbetaler en het milieu de rekening voor de industrie en eindgebruikers die de effecten veroorzaken.

Deelindicator Producerende landen (activiteiten vóór import in Nederland)

Rechtvaardigheid voor producerende landen moet meer aandacht krijgen, vindt de Delphi-groep. Nederland moet zijn verantwoordelijkheid nemen en negatieve externaliteiten niet afwentelen op het buitenland. Dat wil zeggen dat men moet kiezen voor dragers met minimale externe effecten en dat bereid moet zijn de kosten voor deze effecten te vergoeden. Ook moet de import van

waterstofdragers er niet toe leiden dat mogelijke exportlanden het verduurzamen van hun energiesysteem uitstellen ten gunste van de exportprojecten. De vraag is volgens de deelnemers wel of als Nederland een hogere en eerlijkere prijs betaalt aan een exportland, dat geld dan goed terecht komt, of benadeelt Nederland zichzelf meer dan dat de exporterende landen worden geholpen?

Toegankelijk

Deelindicator Nabijheid

Toegankelijkheid tot waterstof voor zoveel mogelijk bedrijven is belangrijk voor verduurzaming van de industrie en draagt bij aan een gelijk speelveld. De Delphi-groep wil dat naast de industrieclusters ook cluster-6-bedrijven in staat gesteld worden om te verduurzamen met waterstof. Anders is het risico dat schaalvoordelen van het gebruik van waterstof niet benut worden.

Aan de andere kant heeft een beperkt waterstofnet voordelen volgens de deelnemers: een overzichtelijkere markt, minder benodigde waterstofopslag, lagere importbehoefte en dus hogere onafhankelijkheid, hogere efficiëntie als gekozen wordt voor directe elektrificatie, lagere veiligheidskosten (minder nadelig effect op omgevingsveiligheid), en lagere netkosten. Bedrijven kunnen ook clusteren.

De belofte voor een fijnmazig waterstofnet is bovendien riskant als marktpartijen, gemeenten, consumenten gaan wachten met verduurzaming, aldus de deelnemers. Een fijnmazig net zorgt voor hogere kosten.

Deelindicator Toegankelijk kostenniveau

Een gelijk speelveld is erg belangrijk in welke markt dan ook. Een gelijk speelveld betekent een zoveel mogelijk (ver)gelijk(baar) kostenniveau. Om een voldoende grote markt voor waterstof(dragers) te creëren is het volgens de Delphi-groep noodzakelijk dat ook bedrijven die verder van de importhavens liggen zoals de cluster-6-bedrijven een relatief gunstige prijs kunnen betalen.

Milieu

Uitstoot van gevaarlijke stoffen leidt tot minder biodiversiteit en daardoor tot instabieler ecosysteem. Dat is gevaarlijk voor iedereen, ook voor de economie, aldus de Delphi-groep. Verminderen van milieubelasting (ZZS, fijnstof) van energiedragers is belangrijk vanwege gezondheidseffecten. Als energiedragers een hoge milieubelasting hebben is er geen reden voor overstap. Een te grote milieubelasting zal leiden tot extra regelgeving en toenemende kosten. De Delphi-groep benoemt de milieu-impact als een belangrijke reden voor het vastlopen van investeringen: projecten zijn mogelijk niet realiseerbaar bij te weinig stikstofruimte. Conversie en vervoer van waterstof moeten volgens de groep niet zorgen voor hogere NO_x-uitstoot omdat er al sprake is van een stikstofoverschot.

Ruimte

Fysieke ruimte voor energietransitie-activiteiten is zeer schaars in Nederland en kun je maar één keer vullen. Dat geldt ook voor milieuruimte en veiligheidsruimte, aldus de deelnemers. De energiedichtheid van waterstofdragers is lager dan van (de meeste) fossiele dragers en er is dus meer schaarse ruimte nodig om in de energiebehoefte te voorzien. Efficiënt ruimtegebruik voor de energietransitie is daarom volgens de Delphi-groep essentieel om met de beschikbare ruimte zoveel mogelijk klimaatwinst te behalen. Veel hangt af van de plek van het ruimtebeslag. Er zijn

gebieden met zeer beperkte fysieke ruimte voor economische activiteiten, met beperkte veiligheidsruimte en met beperkte milieuruimte, maar ook plekken waar nog wel voldoende ruimte beschikbaar is.

VERGELIJKING WATERSTOFDRAGERS

DEEL C: RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten voor de 10 publieke belangen toegelicht en de genormaliseerde scores per publiek belang getoond voor de basissituatie in 2030. Deze basissituatie heeft betrekking op levering van waterstof of waterstofdragers in 2030 naar een eindgebruiker in het binnenland. Na de basissituatie volgt het resultaat voor de varianten: 1) eindgebruik in de importhaven, 2) doorvoer en export en 3) ten slotte tijdshorizon 2050. De volgorde waarin de publieke belangen worden getoond is gelijk aan de volgorde in het NPE. Meer informatie over de achtergronden bij de berekening is te vinden in bijlage C.

6.1 WIJZE VAN PRESENTATIE RESULTATEN

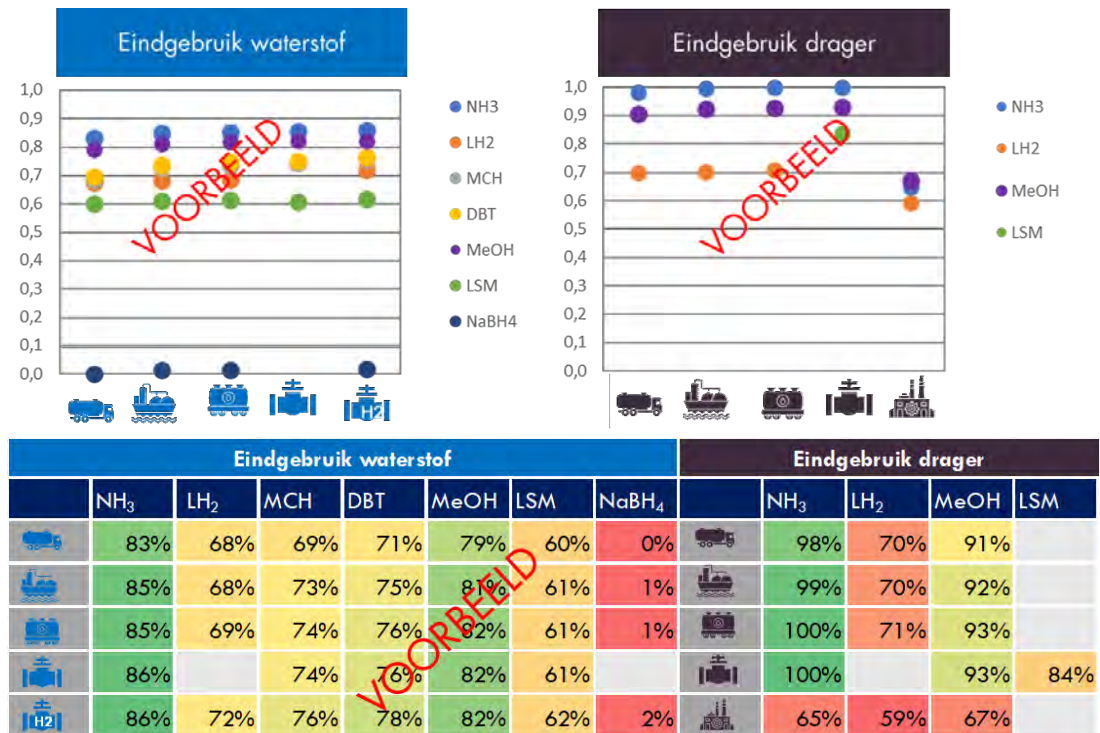
De ketens worden steeds getoond verdeeld over twee grafieken met resultaten. Een linkergrafiek (zie Figuur 17 in blauw) bevat alle resultaten voor het eindgebruik van *gasvormig waterstof*. Op de x-as zijn de eerste vijf typen ketens afgebeeld:

- Type 1: transport over de weg en conversie naar waterstof bij eindgebruiker;
- Type 2: transport over water en conversie naar waterstof bij eindgebruiker;
- Type 3: transport per spoor en conversie naar waterstof bij eindgebruiker;
- Type 4: transport van drager per buisleiding en conversie naar waterstofgas bij eindgebruiker;
- Type 5: conversie naar waterstof in importhaven en transport via het waterstofnet naar eindgebruiker.

Een rechtergrafiek (zie Figuur 17, in zwart) bevat alle ketens waarin een *waterstofdrager* voor eindgebruik wordt ingezet. Op de x-as zijn de tweede groep van vijf ketentypen afgebeeld:

- Type 6: transport over de weg naar eindgebruiker (zonder conversie);
- Type 7: transport over water naar eindgebruiker (zonder conversie);
- Type 8: transport per spoor naar eindgebruiker (zonder conversie);
- Type 9: transport van drager per buisleiding naar eindgebruiker (zonder conversie);
- Type 10: conversie naar waterstof in importhaven, transport via het waterstofnet en decentrale synthese van dezelfde drager bij eindgebruiker.

Niet alle waterstofdragers worden als eindgebruiksstof beschouwd. Hierdoor is het aantal resultaten in de rechtergrafiek kleiner.



Figuur 17: Voorbeeld visualisatie

De hoogst haalbare score is aangeduid met 1, de laagst haalbare score met 0. Omdat sommige scores van de alternatieven gelijk zijn, vallen de resultaten (bolletjes) soms over elkaar. Onder de grafiek is daarom een tabel toegevoegd zodat de resultaten duidelijk en inzichtelijk worden. De indeling en icoontjes in de tabel komen overeen met die in de grafieken. Verschillende achtergrondkleuren in de tabel laten zien welke ketens de meest gunstige en welke de minst gunstige score hebben (van groen naar rood op basis van ranking). Omdat de kleuren variëren op basis van de ranking van de ketens in de linker of in de rechtergrafiek kunnen ketens met ogenschijnlijk dezelfde score toch een andere kleur krijgen. Ter illustratie: in de linkergrafiek heeft de keten met DBT-transport over de weg een score van 71% en een gele kleur, terwijl in de rechtergrafiek dezelfde score (71%) oranje kleurt. De laagste score in de rechtergrafiek is nl. 59% en de laagste score in de linkergrafiek 0%.

6.2 SCORES OP PUBLIEKE BELANG BETAALBAAR

Figuur 18 toont de genormaliseerde scores voor betaalbaarheid van waterstofdragers voor de verschillende leveringsketens bij gebruik in het binnenland. Hoe hoger de score, hoe lager de kostprijs per kilogram waterstofequivalent. De gebruikte bandbreedte is 2,50 (score 1) tot 12 euro (score 0).

Opgemerkt moet worden dat deze kostprijzen niet hetzelfde zijn als marktprijzen omdat een aantal kostenposten niet is meegenomen, zoals winst en risico-opslag en eventuele locatie-specifieke kosten zoals kosten van veiligheidsvoorzieningen (zie bijlage C).

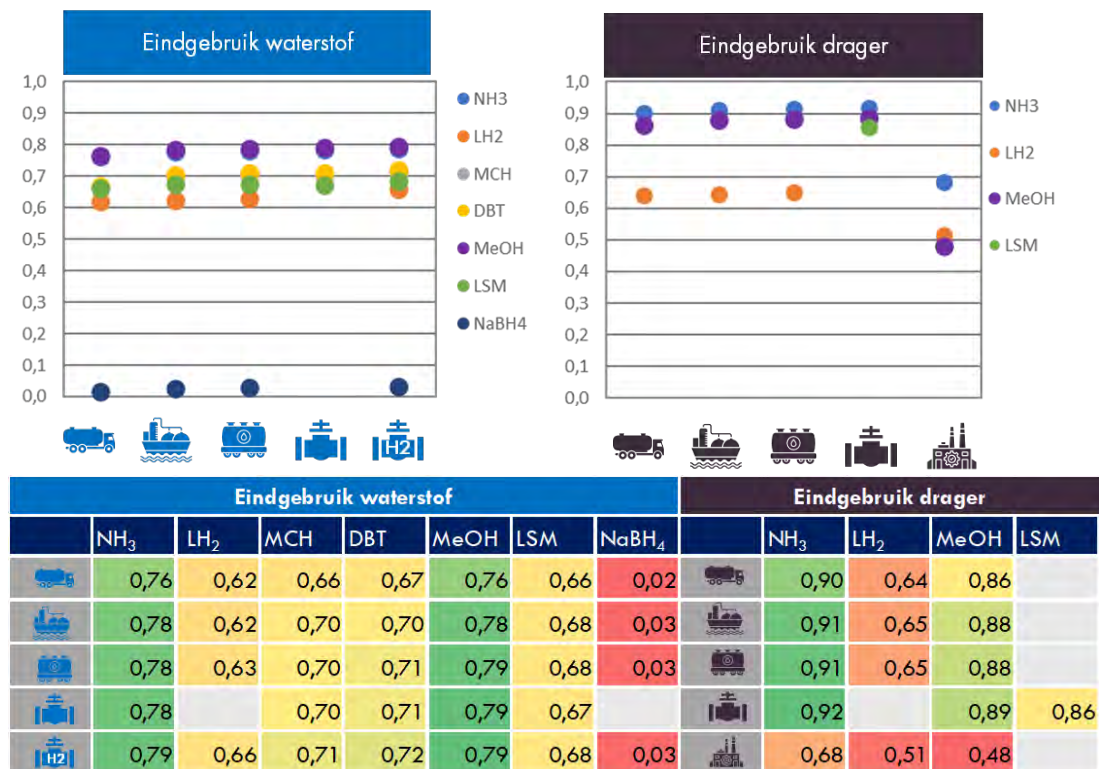
Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

De hoogste scores hebben ammoniak en methanol, als deze stoffen direct gebruikt worden (rechtergrafiek, Figuur 18). Dit komt door de lagere importkosten. Wanneer conversie naar waterstof nodig is (linkergrafiek), hebben ammoniak en methanol ook de hoogste score. Dit komt door de lagere importkosten én relatief lage conversiekosten van beide dragers. De verliezen in de keten door het gebruik als brandstof zijn hierin meegenomen. De LOHC's hebben bij eindgebruik van waterstofgas een iets lagere score, en daarna volgt LSM. Bij direct gebruik ligt LSM in de buurt van ammoniak en methanol. Vloeibare waterstof volgt bij eindgebruik van waterstofgas vlak na LSM. Bij direct gebruik van de drager volgt vloeibare waterstof op iets meer afstand door de hogere kosten van import, opslag en transport die niet deels worden gecompenseerd door lagere kosten van conversie.

Natriumboorhydride heeft de laagste score. Dit komt met name omdat de productie van de drager en de recycling van de drager na afgifte van waterstof energie-intensief is. Ook is het dragermateriaal waar het element boor in zit kostbaar. Dit veroorzaakt hoge importkosten.

Direct eindgebruik van de drager (rechts) is goedkoper dan de leveringsketens met conversie (links). De modaliteitskeuze in het binnenland heeft weinig invloed op de kosten.

Omdat de kosten voor import en conversie in de literatuur uiteenlopen worden in Hoofdstuk 7 de resultaten van een gevoeligheidsanalyse getoond. Deze gevoeligheidsanalyse laat de impact zien van het gebruik van een andere dataset voor de kosten, nl. die van JRC in plaats van HyDelta.

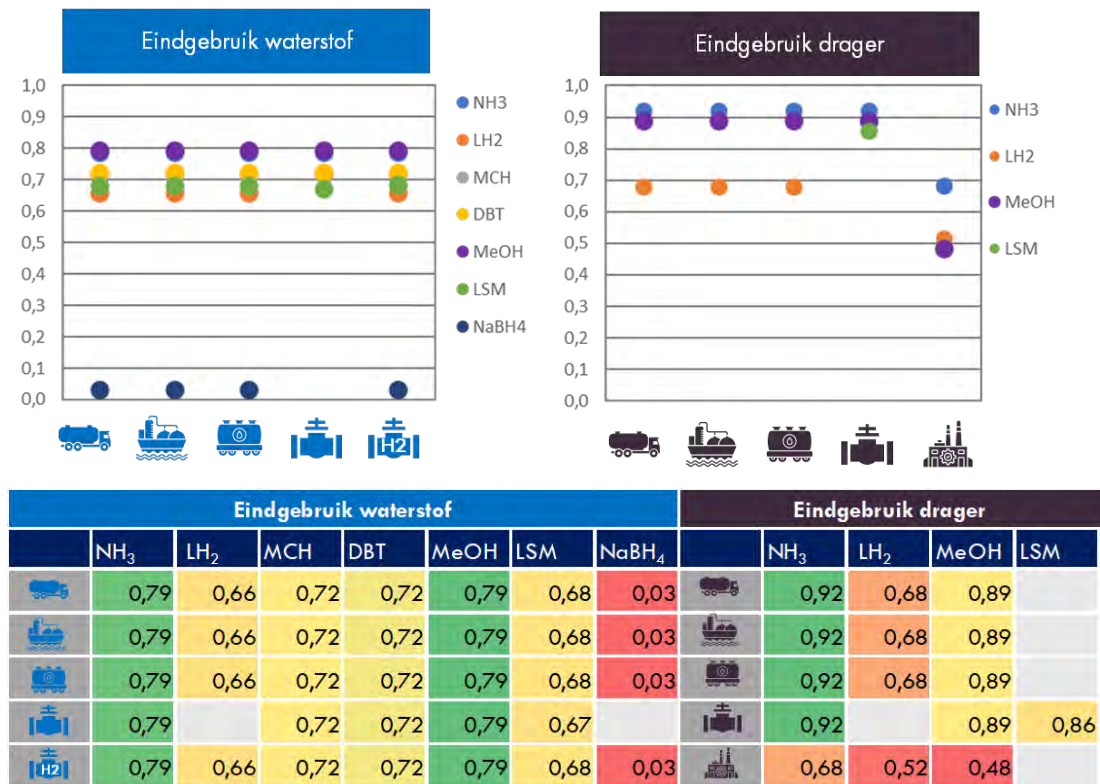


Figuur 18: Scores Betaalbaar ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Resultaten varianten

Importhaven

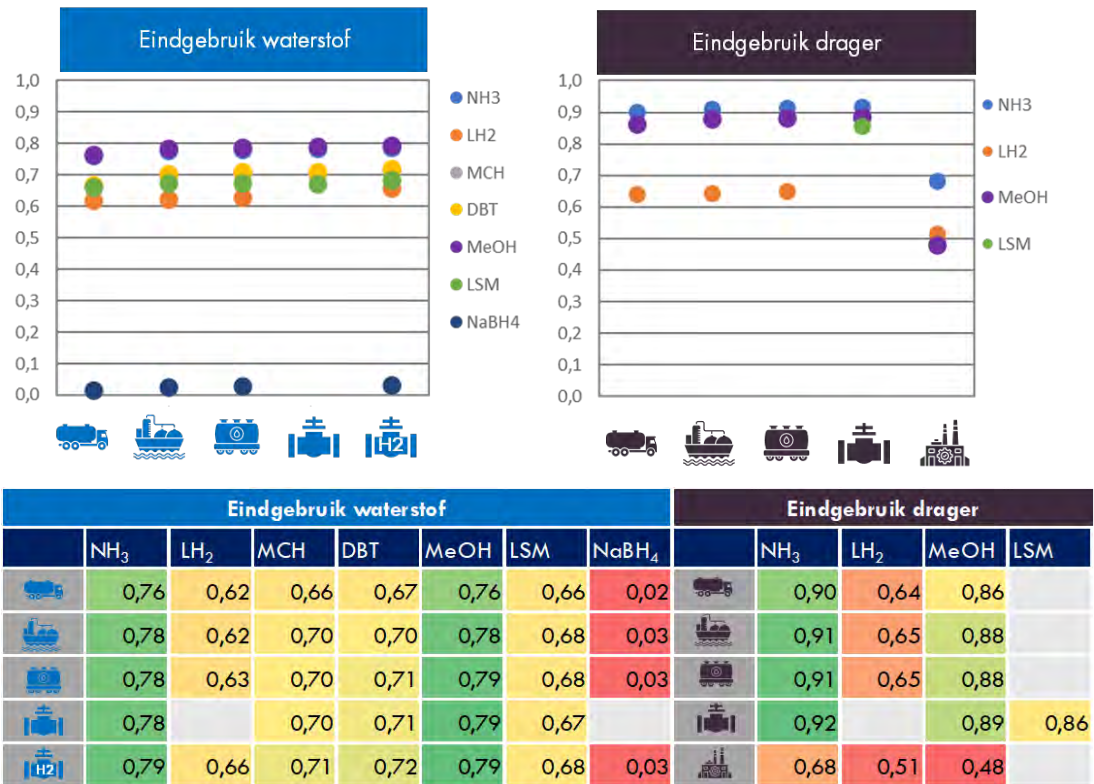
Eindgebruik in de importhaven verbetert ten opzichte van de basissituatie de score op Betaalbaar, Figuur 19. Het effect is echter niet groot omdat de binnenlandse transportkosten in vergelijking met de kosten voor import en conversie beperkt zijn. Ook zijn er geen verschillen meer tussen de modaliteiten. Dit komt omdat de kosten voor binnenlands transport vervallen.



Figuur 19: Scores Betaalbaar ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Doorvoer en export

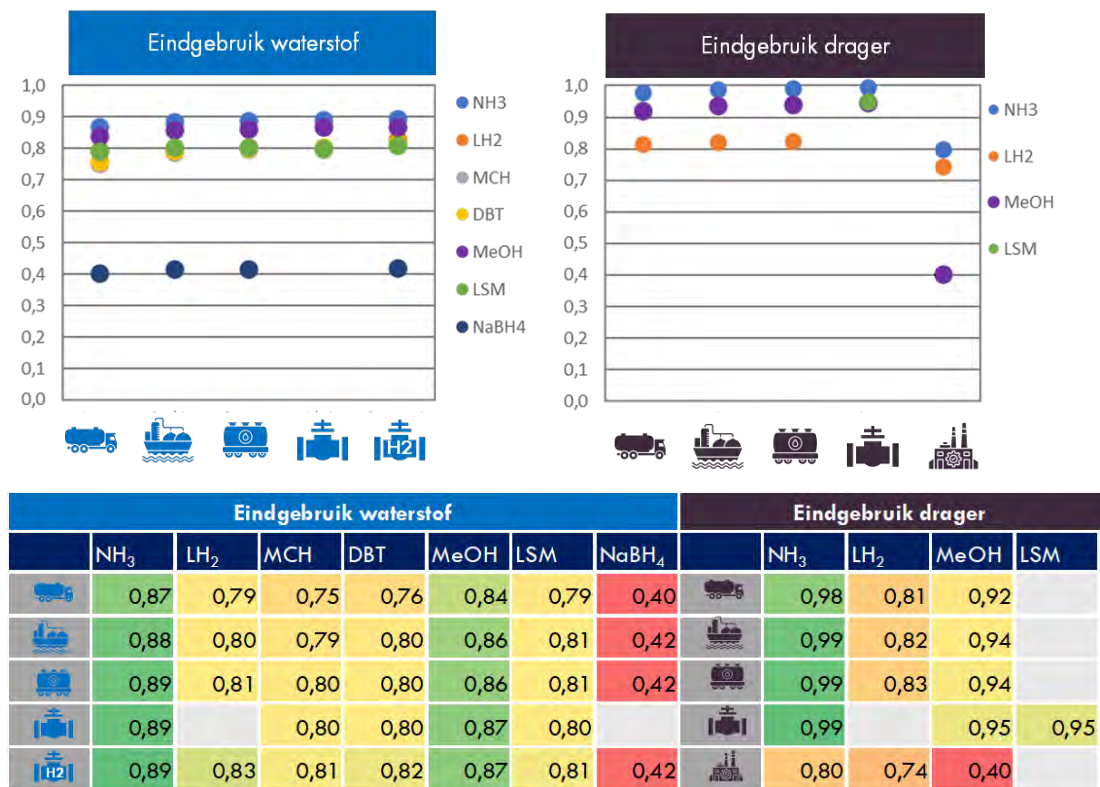
De scores op Betaalbaar bij doorvoer naar Duitsland liggen een fractie lager dan in de basissituatie, zie Figuur 20. Dit komt door het wegvallen van de kosten voor opslag en conversie bij de eindgebruiker. Deze conversie ontbreekt bij direct eindgebruik van de waterstofdrager of waterstof uit het waterstofnet. De score van de vijfde keten in de linkergrafiek blijft daarom exact gelijk door het ontbreken van opslag en conversie bij de eindgebruiker. De overige verschillen zijn vaak te klein om te zien.



Figuur 20: Scores Betaalbaar ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Zichtjaar 2050

In het zichtjaar 2050 liggen de scores voor de verschillende alternatieven hoger dan in het zichtjaar 2030 omdat alle ketens verbeteren ten opzichte van 2030. Vloeibare waterstof en natriumboorhydride tonen de grootste verbetering omdat hiervoor de grootste kostenverlaging van import en conversie wordt verwacht. Hierdoor is de score voor vloeibare waterstof net iets hoger dan de LOHC's (Figuur 21, links). Uitzondering is de methanolketen met zowel conversie als synthese. Omdat in 2050 DAC wordt gebruikt in plaats van CO₂ uit een industriële puntbron is meer waterstof als brandstof nodig, en daarvoor moet eerst meer methanol worden ingevoerd. Het hogere importvolume doet de kostenverlaging per kilogram methanol teniet.



Figuur 21: Scores Betaalbaar ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

6.3 SCORES OP PUBLIEKE BELANG ECONOMISCH KRACHTIG

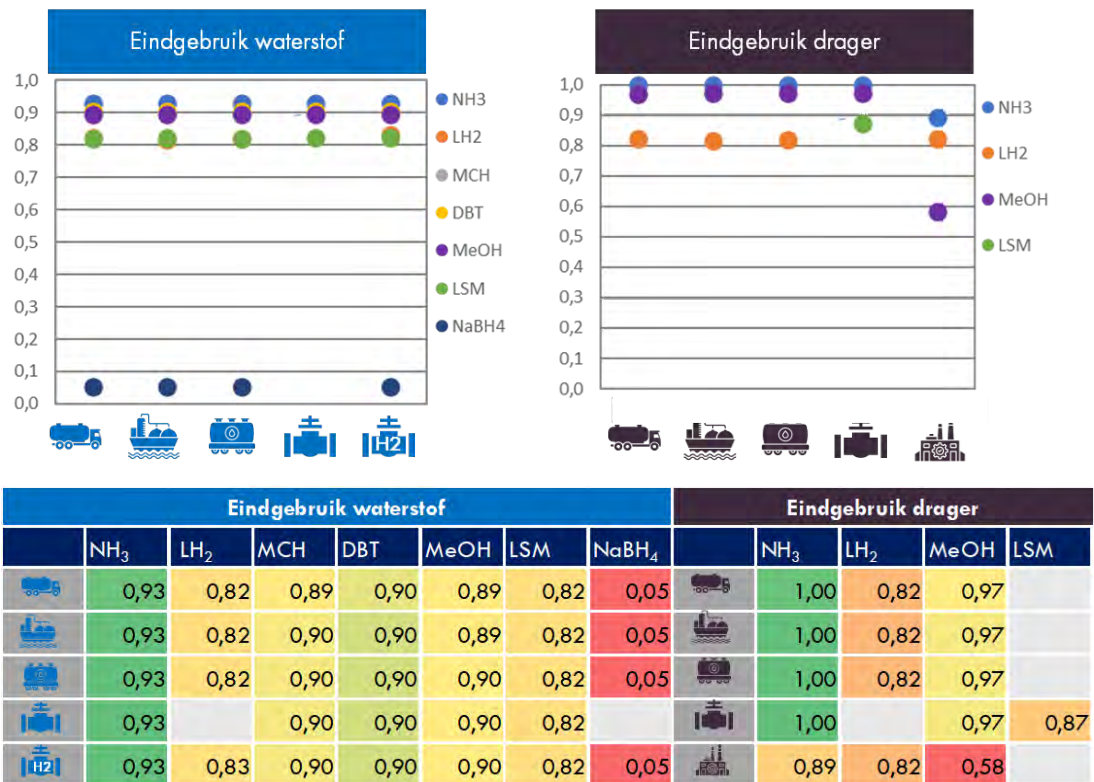
De genormaliseerde scores voor het publieke belang Economisch Krachtig worden getoond in Figuur 22 voor de verschillende leveringsketens bij gebruik in het binnenland. Hoe hoger de score, hoe hoger de toegevoegde waarde in Nederland, gecorrigeerd voor congestie en publieke infrastructuurkosten. De gebruikte bandbreedte is 0,20 (score 0) tot 8,60 euro (score 1) per kilogram waterstofequivalent.

Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

De scores van Betaalbaar en Economisch Krachtig zijn sterk gecorreleerd, ook al vallen verschillen in transportkosten in Nederland weg. Deze zijn onderdeel van de toegevoegde waarde, maar klein ten opzichte van andere kosten, net als de kosten voor congestie en gebruik van de publieke infrastructuur. De laatste twee posten hebben samen een omvang van minder dan 1% van de toegevoegde waarde en hebben dus weinig effect op de verschillen tussen de ketens.

De hoogste score hebben ammoniak en methanol, als deze stoffen direct gebruikt worden (rechtergrafiek, Figuur 22). Wanneer conversie naar waterstof nodig is, krijgen de LOHC's een vergelijkbare score als ammoniak en methanol. De hogere score voor de LOHC's komt doordat de hogere transportkosten in Nederland wel een nadeel zijn bij het publieke belang Betaalbaar en niet voor het publieke belang Economisch Krachtig. Verondersteld is dat de uitgaven in het Nederlandse deel van de keten de Nederlandse economie versterken.

LSM en vloeibare waterstof hebben over de hele linie een iets lagere score. Natriumboorhydride heeft ook hier de laagste score. Dit komt door de hogere kosten van de geïmporteerde drager.

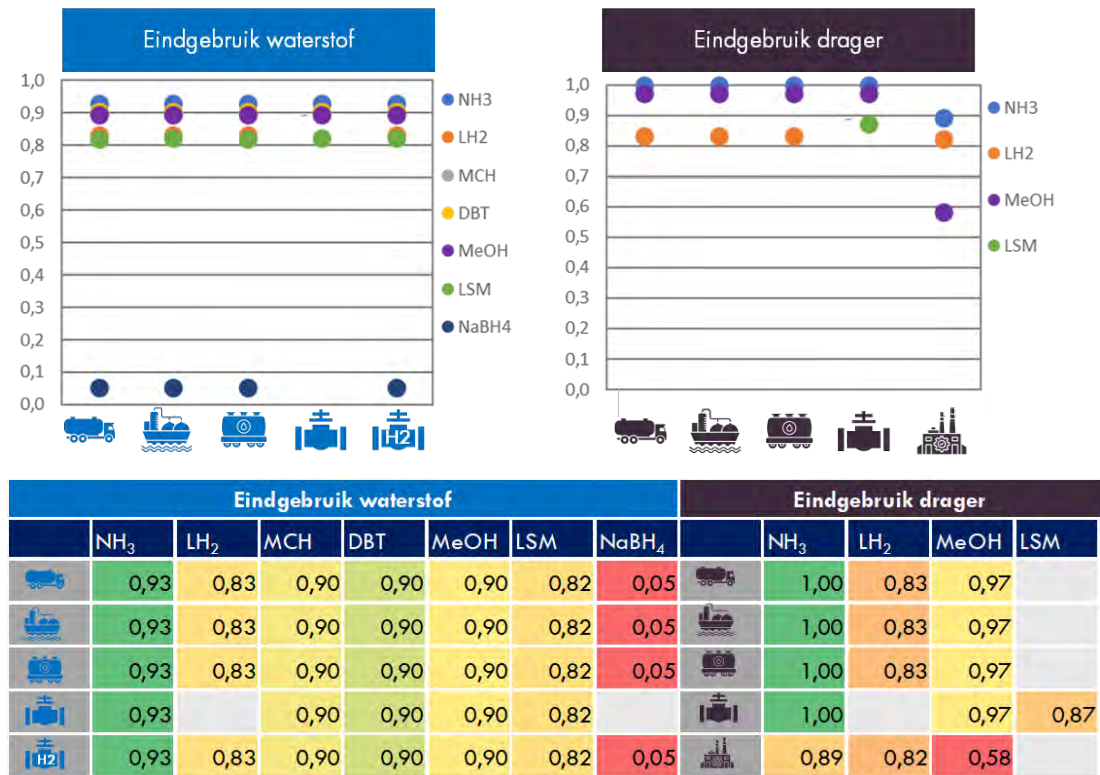


Figuur 22: Scores Economisch Krachtig alternatieven binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Resultaten varianten

Importhaven

Eindgebruik in de importhaven verbetert de score ten opzichte van de basissituatie, met uitzondering van de ketens die gebaseerd zijn op transport per buis, Figuur 23. Bij eindgebruik in de haven zijn er geen verschillen meer tussen de modaliteiten. Dit komt doordat de maatschappelijke kosten van congestie en gebruik van de publieke infrastructuur wegvallen. Het effect hiervan is niet groot. Verschillen tussen Figuur 23 en Figuur 22 zijn te klein om te zien.

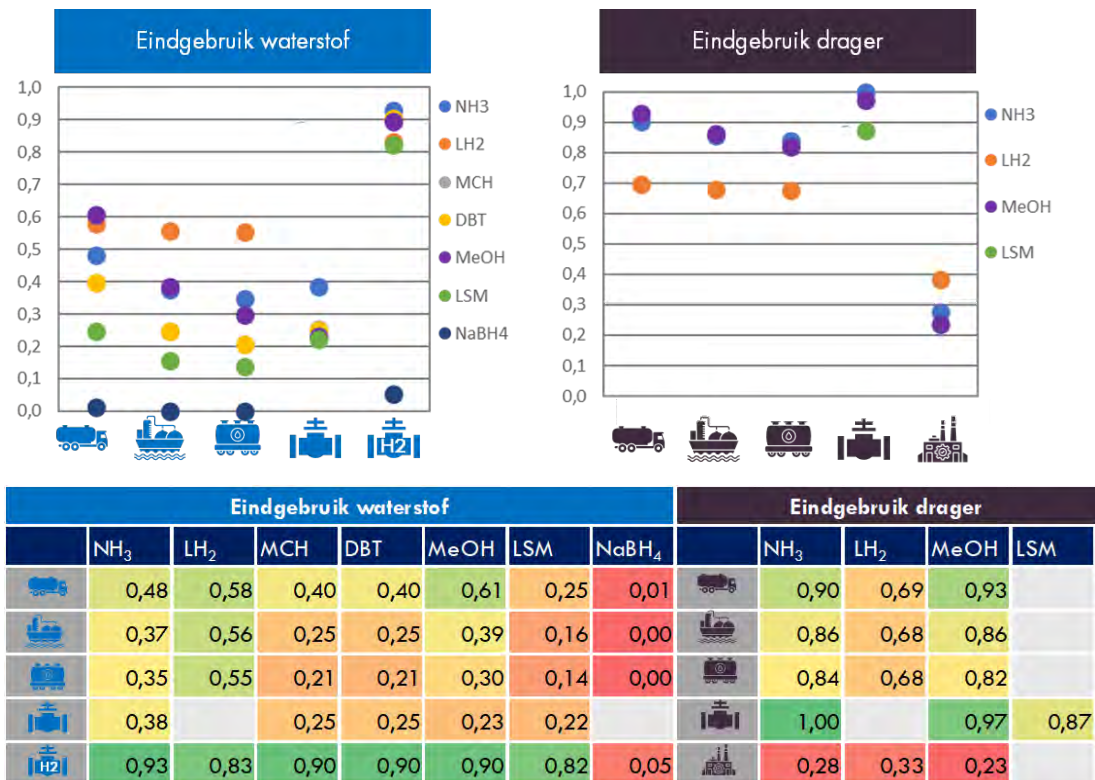


Figuur 23: Scores Economisch Krachtig ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Doorvoer en export

De scores bij doorvoer en export naar Duitsland vallen lager uit dan in de basissituatie, zie Figuur 24. Dit komt door het wegvallen van de toegevoegde waarde van opslag en conversie bij de eindgebruiker. De toegevoegde waarde is toegedeeld naar rato van de kostenverdeling tussen Nederland en Duitsland. Dat wil zeggen als 30% van de kosten tussen import en eindgebruiker bij doorvoer en export in Duitsland terecht komt, veronderstellen we dat van de toegevoegde waarde tussen import en eindgebruiker ook 30% in Duitsland neerslaat.

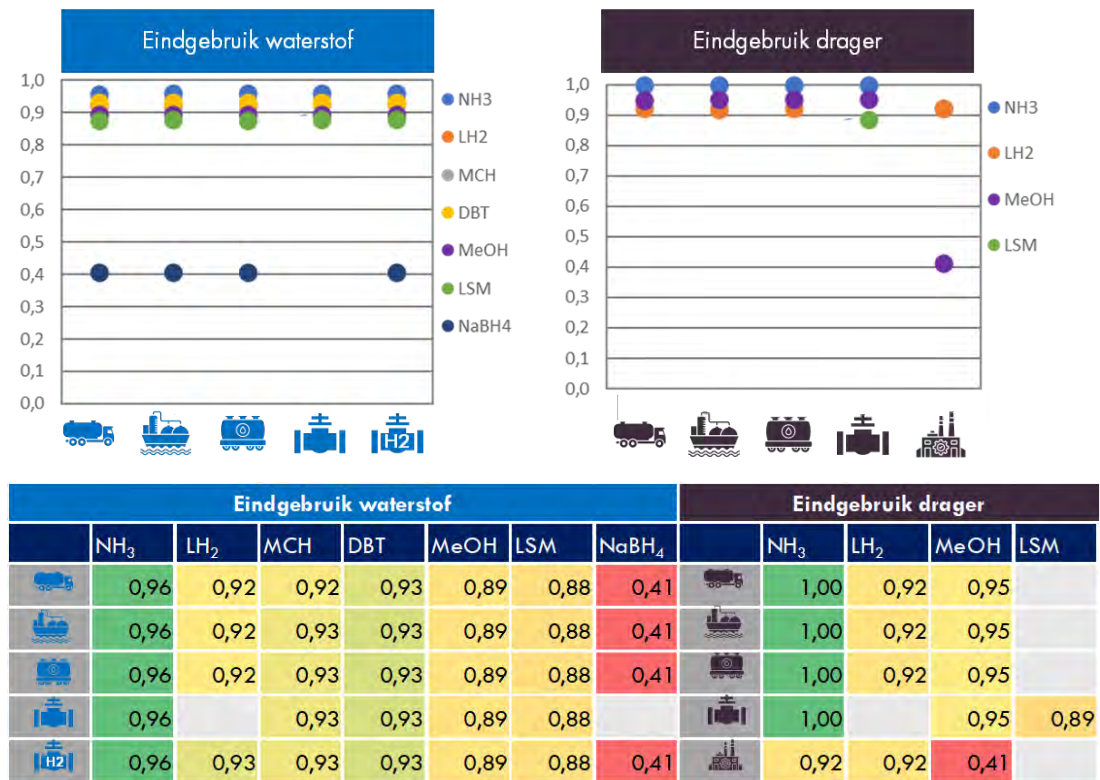
Hierdoor ligt de score van transport over de weg hoger dan voor transport over water of spoor.



Figuur 24: Scores Economisch Krachtig ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Zichtjaar 2050

Als gevolg van de lagere kosten voor import en conversie door innovatie verbeteren alle scores ten opzichte van de basissituatie in 2030. Vloeibare waterstof en natriumboorhydride verbeteren relatief het meest. Vloeibare waterstof komt zo goed als op gelijke hoogte met de LOHC's (Figuur 25, links). Doordat bij synthese van methanol (en LSM) CO₂ uit DAC in plaats van een industriële puntbron is verondersteld, valt de score voor combinatie van conversie en decentrale synthese in Nederland (meest rechtse kolom bij eindgebruik drager) lager uit, ondanks de daling van de importkosten per kilogram methanol. Er is namelijk meer volume nodig doordat ook waterstof nodig is als brandstof voor DAC, en daarvoor moet eerst meer methanol worden ingevoerd.



Figuur 25: Scores Economisch Krachtig ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik draager

6.4 SCORES OP PUBLIEKE BELANG BETROUWBAAR

De genormaliseerde scores voor Betrouwbaar zijn getoond in Figuur 26. Hoe hoger de score, hoe betrouwbaarder de keten door de experts is beoordeeld. Het gaat om een relatieve score. De slechtst beoordeelde keten krijgt de score 0. Een keten die niet minder betrouwbaar is dan de huidige levering via het aardgasnet krijgt een score van 1.

Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

De betrouwbaarheidsscores van LSM, methanol en ammoniak zijn het hoogst, gevolgd door MCH, DBT, vloeibare waterstof en ten slotte natriumboorhydride.

LSM, methanol en ammoniak hebben van de experts de hoogste score gekregen omdat er nu al grote volumes fossiele varianten getransporteerd worden. Men ziet geen reden voor een lagere betrouwbaarheid en noodzaak om extra voorraden aan te houden. Ammoniak krijgt een fractie lagere score dan LSM en methanol omdat er vooralsnog minder zeetransportschepen ter beschikking staan.⁵⁶

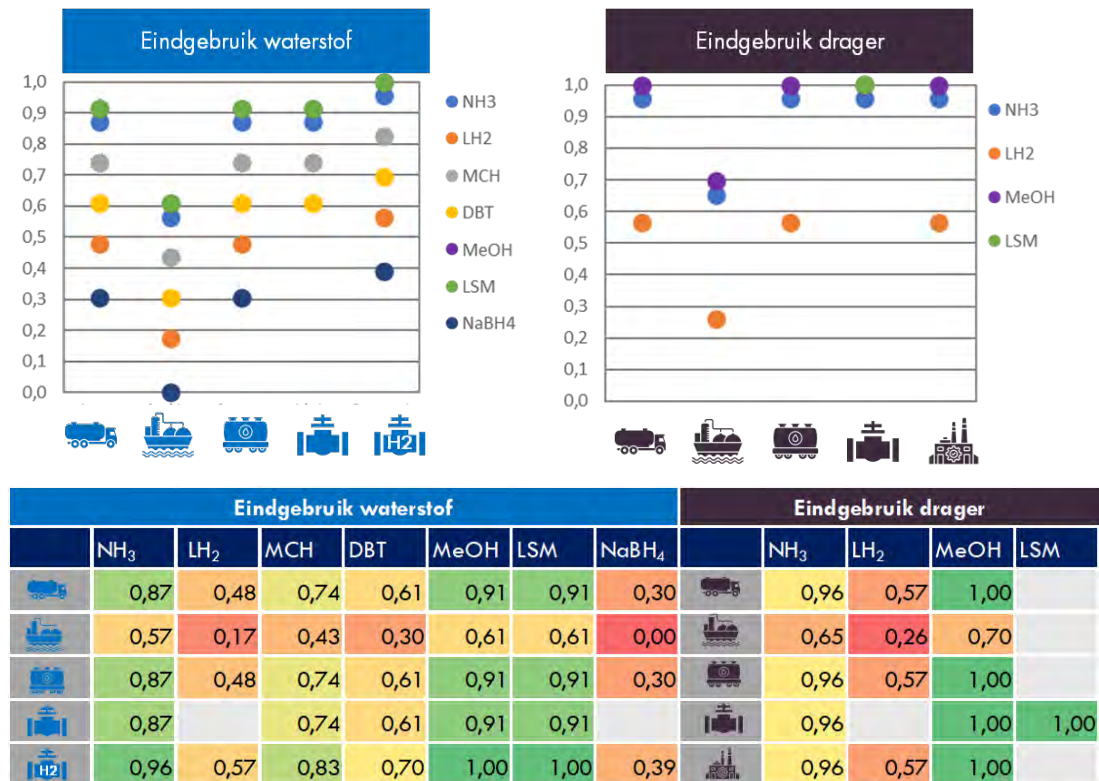
De LOHC's krijgen een lagere score op Betrouwbaar omdat de importketen alleen kleinschalig is gedemonstreerd. Het TRL-niveau van de synthese in het exportland is voor de experts aanleiding

⁵⁶ “While the chemical is already traded overseas, the current fleet is extremely small compared to the scale of export-oriented green NH₃ projects expected by 2030.” *Hydrogen Insight*, 22 August 2023. Sindsdien is er wel nieuwbouw van schepen aangekondigd.

om de betrouwbaarheid van de LOHC's lager in te schatten. MCH krijgt ten opzichte van DBT een hogere score omdat er al een grote markt voor toluen in de chemiesector bestaat; de huidige markt voor DBT als industriële warmtewisselingsvloeistof is veel kleiner, waardoor de score van DBT wat lager uitkomt.

Vloerbare waterstof krijgt een lagere score van de experts omdat grootschalige toepassing op dit moment ontbreekt en er pas één transportschip beschikbaar is dat vaart tussen Australië en Japan. Hierdoor is de betrouwbaarheid van deze ketens vooralsnog lager ingeschat.

Voor natriumboorhydride is de recyclingstap nog niet gedemonstreerd. Door het lagere TRL-niveau en het feit dat de wijze van opslag en transport⁵⁷ zich nog moet ontwikkelen, krijgen de natriumboorhydrideketens de laagste score.



Figuur 26: Scores betrouwbaar ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

De keuze van de modaliteit zorgt soms ook voor een verschil in scores op het publieke belang Betrouwbaar. Niet tussen het transport per buisleiding, spoor of over de weg, wel bij transport over water (een lagere score) of via het waterstofnet (een hogere score).

Het vervoer over water is wat minder betrouwbaar beoordeeld vanwege het risico op laag- en hoogwatersituaties die langdurige stremmingen kunnen veroorzaken. Dit verklaart de lagere score voor de ketens die de drager per binnenvaartschip transporteren.

Transport via het waterstofnet in de linkergrafiek krijgt de hoogste score omdat er dan geen decentrale conversie naar waterstof nodig is. Dit gebeurt immers al in de importhaven. Als een keten

⁵⁷ Er geldt in Europa een verbod voor het transport van natriumboorhydride in bulk.

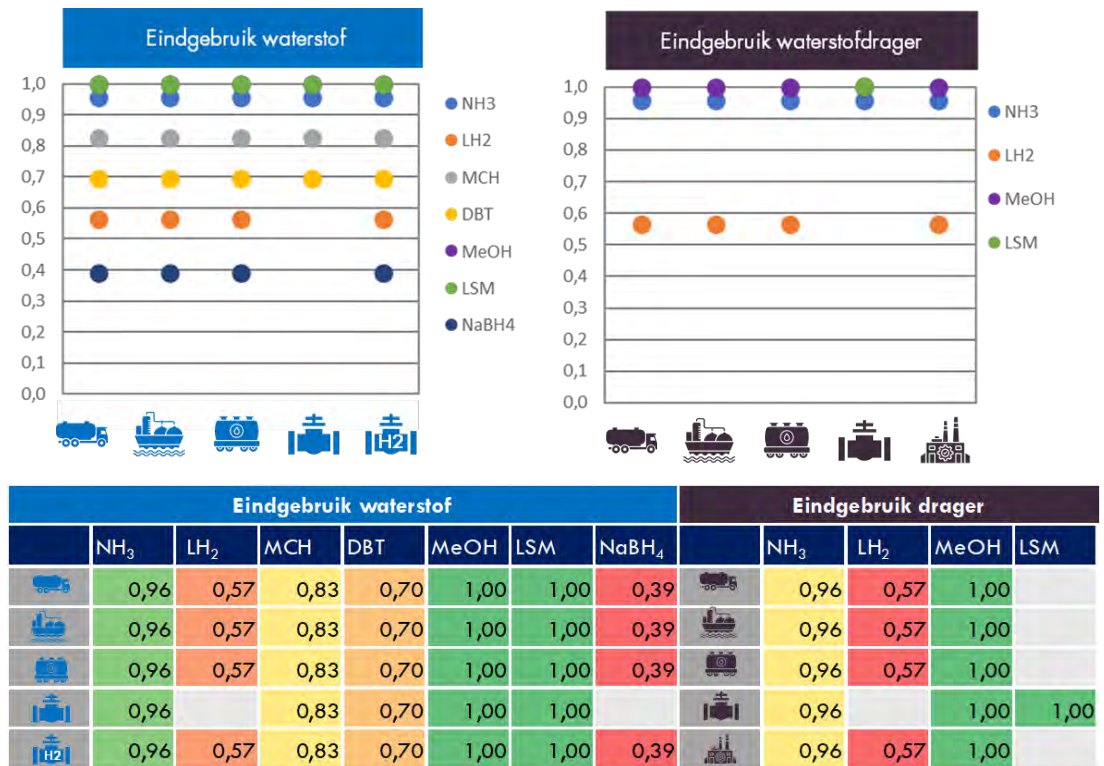
decentrale conversie bevat, levert dat volgens de betrokkenen een iets lagere betrouwbaarheid op.⁵⁸

Omdat er geen decentrale conversie nodig is bij eindgebruik van de drager liggen de scores in de rechtergrafiek gemiddeld iets hoger dan in de linkergrafiek. Decentrale synthese van ammoniak, methanol en vloeibare waterstof vermindert de betrouwbaarheid niet volgens de experts. Hierdoor liggen de scores per waterstofdrager voor de ketens in de rechtergrafiek steeds even hoog behalve voor transport over water.

Resultaten varianten

Importhaven

Bij eindgebruik in de importhaven verbetert de betrouwbaarheid van verschillende ketens ten opzichte van de basissituatie.



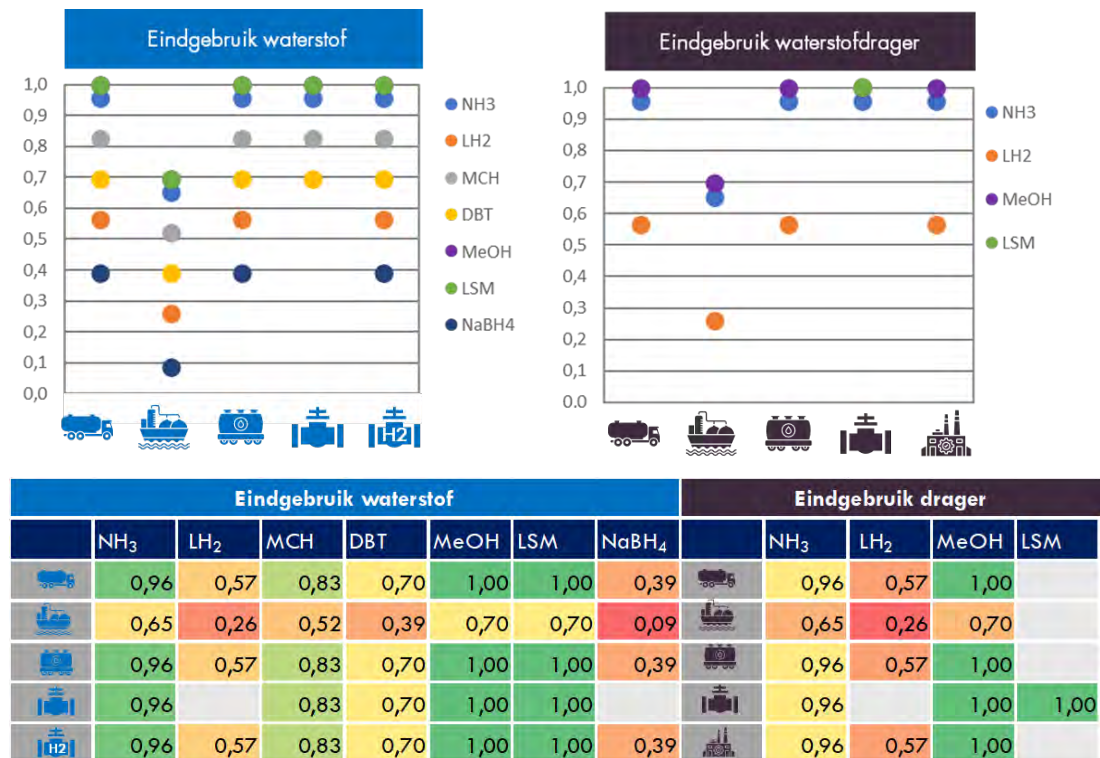
Figuur 27: Scores Betrouwbaar ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Dit is vooral het geval voor transport per binnenvaartschip omdat het transport niet afhankelijk meer is van mogelijke hoog- en laagwatersituaties. Ook is er geen nadeel meer van decentrale conversie, aangezien alle conversies nu centraal plaatsvinden.

⁵⁸ De experts hebben aangegeven dat de lagere betrouwbaarheid voor decentrale conversie voor alle dragers in gelijke mate van toepassing is. De betrouwbaarheid van verdamping van vloeibare waterstof zou hoger ingeschat kunnen worden vanwege de relatieve eenvoud van dit proces ten opzichte van de conversie naar waterstof van andere dragers. We hebben echter de beoordeling van de experts overgenomen.

Doorvoer en export

Bij eindgebruik in Duitsland of België is de betrouwbaarheid van de decentrale opslag en conversie niet meer binnen scope. Hierdoor verbetert de score van de ketens met decentrale conversie (de eerste vier in de linkergrafiek) ten opzichte van gebruik in Nederland.

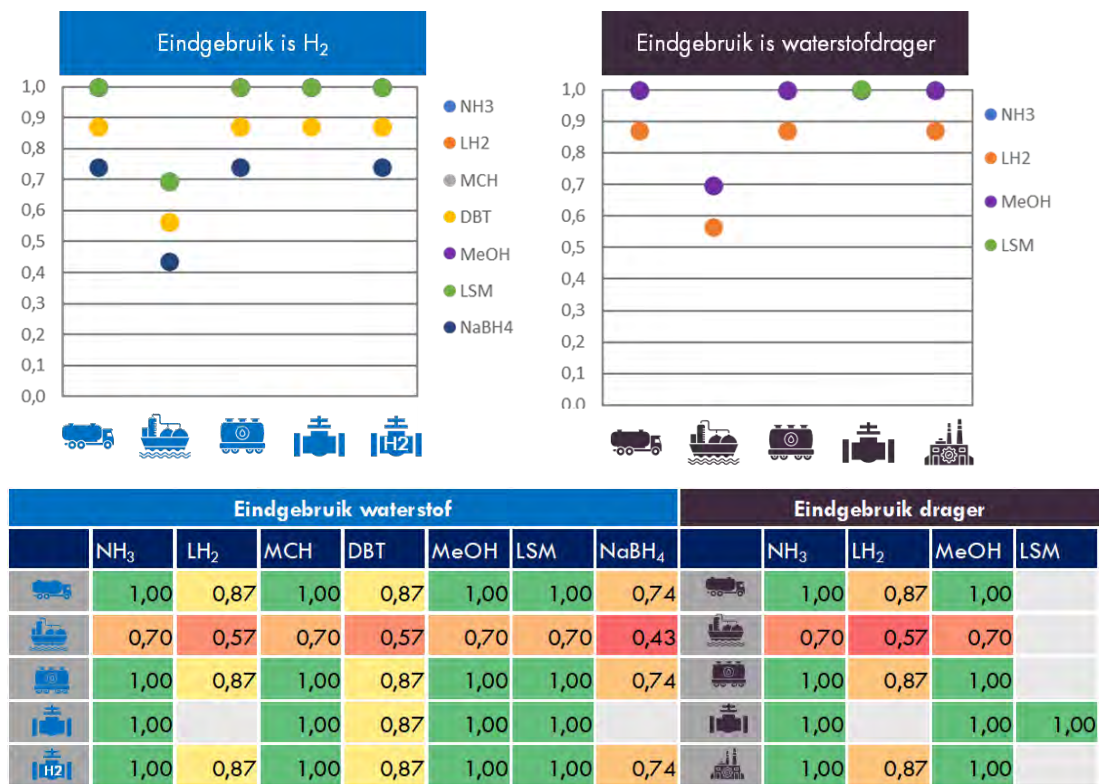


Figuur 28: Scores Betrouwbaar ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Zichtjaar 2050

In 2050 verbetert de betrouwbaarheid van verschillende ketens ten opzichte van de basissituatie 2030. Dit komt door de verbetering in de TRL's; de betrouwbaarheid van de drager en importstromen en van de decentrale conversie ten opzichte van de basissituatie neemt toe.

Het nadeel van het risico op hoge en lage waterstanden bij transport per schip blijft bestaan. Natriumborhydride, DBT en vloeibare waterstof hebben volgens de experts nog steeds een nadeel ten opzichte van LSM, ammoniak, methanol en MCH, zij het in minder mate dan in 2030.



Figuur 29: Scores Betrouwbaar ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

6.5 SCORES OP PUBLIEKE BELANG VEILIG

Het publieke belang Veilig geven we vorm met drie indicatoren: omgevingsveiligheid (niet-opzettelijke calamiteiten), bescherming tegen cyberaanvallen en terrorisme (opzettelijke verstoringen en incidenten) en transportveiligheid. De scores voor omgevingsveiligheid en cyberaanvallen en terrorisme zijn dominant vanwege de hoge weegfactoren gegeven door de Delphi-groep. In deze paragraaf worden allereerst de samengevoegde en gewogen resultaten voor het publieke belang Veilig beschreven. Vervolgens worden de resultaten per indicator toegelicht.

Hoe hoger de score, hoe veiliger de keten door de experts is beoordeeld. Het gaat om een relatieve score. De minst veilig beoordeelde keten krijgt de score 0. Een keten zonder veiligheidsrisico krijgt een score van 1.

Resultaten basissituatie(2030, eindgebruik in het binnenland)

Het samengevoegde en gewogen resultaat voor het publieke belang Veilig⁵⁹ is te zien in Figuur 30. Deze toont lage scores voor ammoniak vanwege het grote potentiële effect van een gifwolk. Bij een calamiteit met ammoniak treedt (vrijwel altijd)⁶⁰ direct een gifwolk op, terwijl bij andere

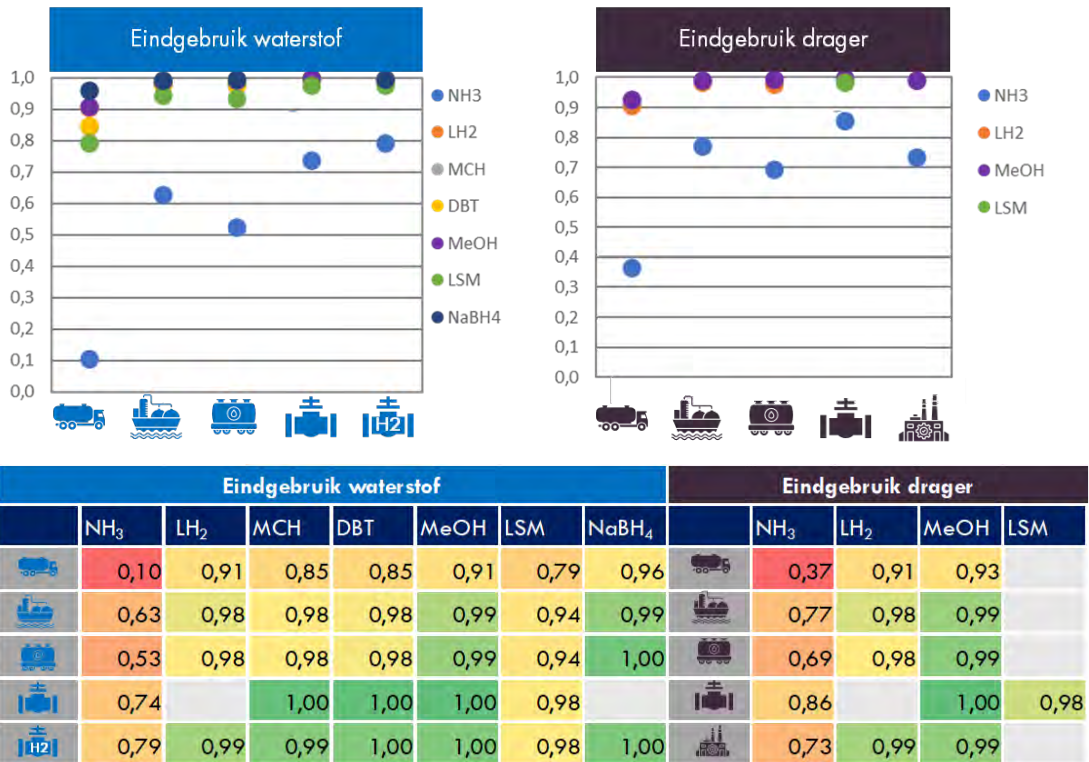
⁵⁹ Om de verschillende indicatoren te kunnen combineren zijn in het Delphi-proces ook weegfactoren voor de afzonderlijke indicatoren van het publieke belang Veilig bepaald, zie Hoofdstuk 5. Deze zijn gebruikt om de score voor het publieke belang Veilig te bepalen.

⁶⁰ Bij onder druk vloeibaar gemaakte ('warme') ammoniak vormt zich direct een gaswolk. Bij gekoeld vloeibaar gemaakte ('koude') ammoniak ontstaat eerst een plas en duurt het langer voordat zich een gifwolk vormt.

dragers een brand of explosie pas optreedt na ontsteking. Dit heeft dus een lagere waarschijnlijkheid (kleinere kans). De modaliteit weg heeft de laagste score vanwege de hoogste kans op een incident of ongeval, ondanks het kleinere potentiële effect ten opzichte van andere modaliteiten (door de kleinere hoeveelheden die per vrachtwagen worden vervoerd).

De score voor de modaliteit spoor is hoger dan voor de weg maar lager dan voor de binnenvaart. De reden dat transport per spoor veiliger is dan over de weg is de lagere kans op ongevallen (transportveiligheid) en het door de experts lager ingeschatte risico op omgevingsveiligheid vanwege de lagere kans op een incident. De binnenvaart heeft een hogere score dan transport per spoor door de lager ingeschatte kans op een incident op het gebied van omgevingsveiligheid.

De score van ammoniak is ook laag bij modaliteiten met een lage kans op transportongevallen en een laag risico voor omgevingsveiligheid. Dit wordt veroorzaakt door een hogere kans op een cyberaanval of terroristische aanslag volgens de experts. Installaties en leidingen met ammoniak worden – meer dan die voor andere dragers – door de experts als aantrekkelijke en meer waarschijnlijke doelen gezien van cyber- en terrorisme-aanvallen.

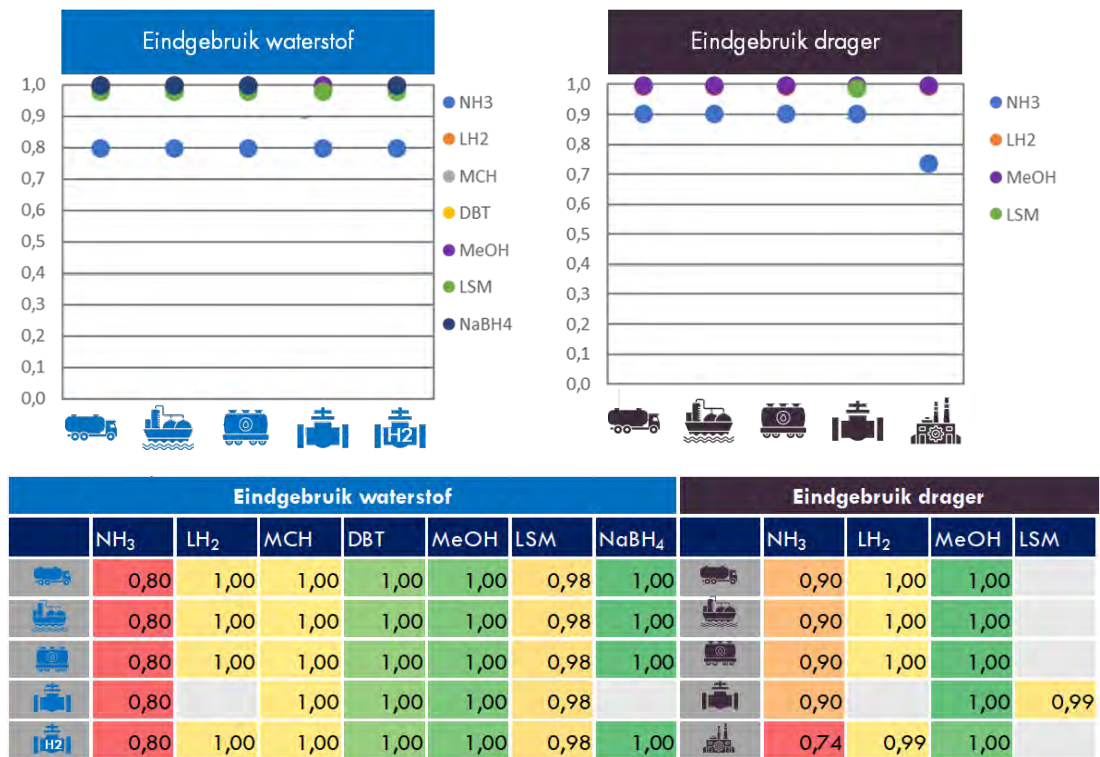


Figuur 30: Scores Veilig ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Resultaten varianten

Importhaven

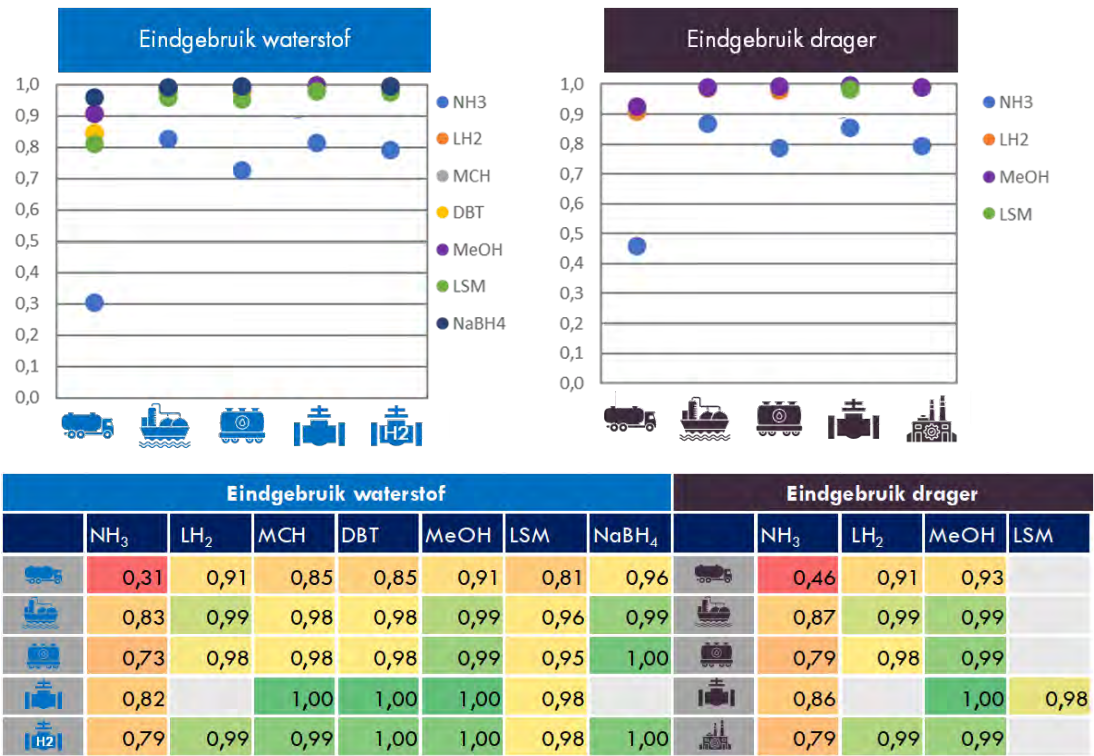
Bij eindgebruik in de importhaven verbetert de veiligheid van verschillende ketens ten opzichte van de basissituatie. Dit komt doordat de risico's voor de omgeving van het transport door Nederland wegvallen (omgevingsveiligheid, cyber- en terrorisme risico's en verkeersongevallen). Ook vallen hiermee verschillen tussen de modaliteiten weg, zie Figuur 31.



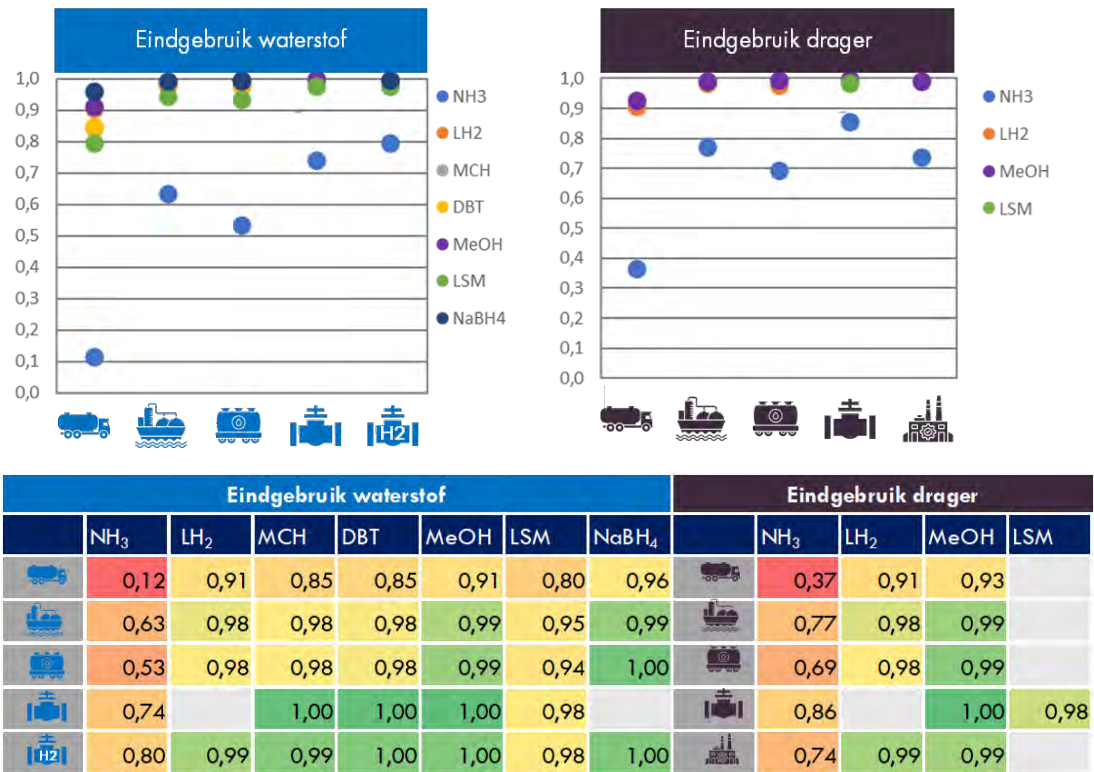
Figuur 31: Scores Veilig ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Doorvoer en export

Bij eindgebruik in Duitsland of België zijn de veiligheidsrisico's (omgevingsrisico en cyber- en terrorisme risico) van de decentrale opslag en conversie niet meer binnen scope. Hierdoor verbetert de score van de ketens met decentrale conversie en/of opslag ten opzichte van gebruik in Nederland. Alleen de scores in de vijfde keten in de linkergrafiek en de vierde keten in de rechtergrafiek verbeteren niet.



Figuur 32: Scores Veilig ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager



Figuur 33: Scores Veilig ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

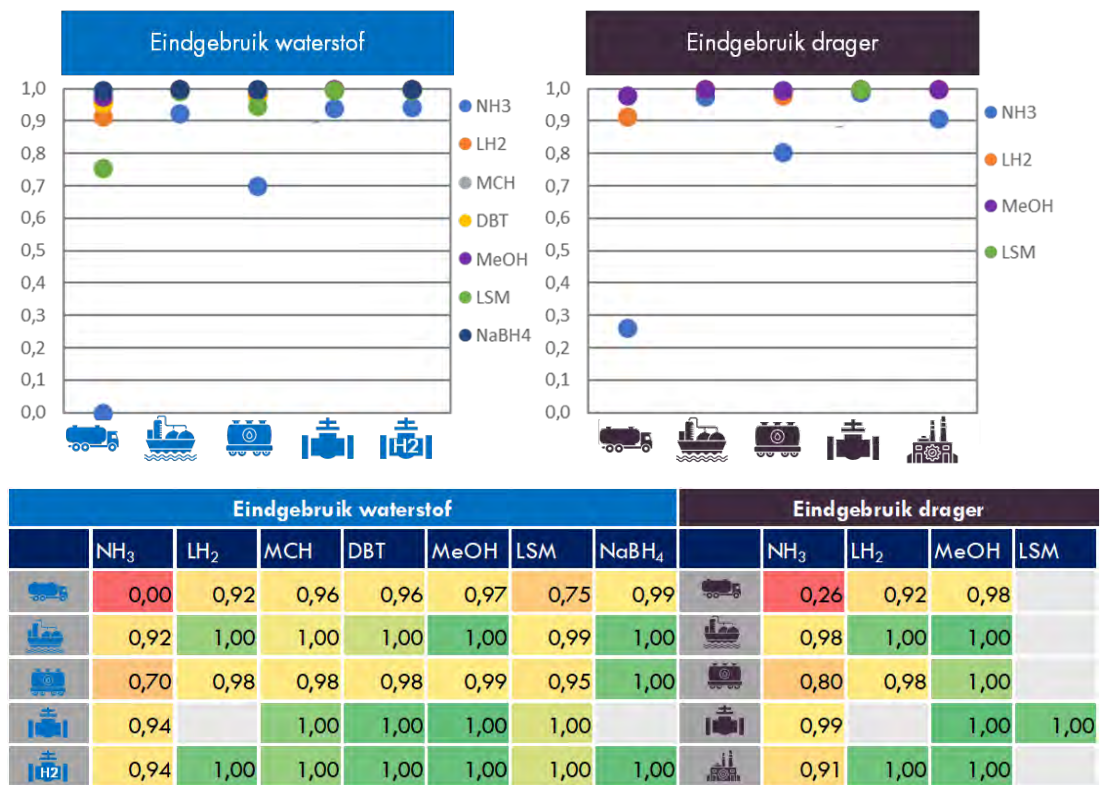
Zichtjaar 2050

In 2050 hebben we geen aanvullende veiligheidsmaatregelen verondersteld ten opzichte van 2030. Hierdoor blijft de score van alle ketens zo goed als gelijk per kilogram waterstofequivalent aan de scores in de basissituatie. Bij ammoniak is er soms een kleine verbetering zichtbaar door de iets lagere getransporteerde volumes als gevolg van hogere efficiëntie van conversie (kraken).

Omgevingsveiligheid (deelindicator)

Ammoniak krijgt van de experts de laagste score op omgevingsveiligheid. Met name transport over weg en spoor levert het grootste risico op. Dit risico is het hoogst omdat bij een incident (breuk, lekkage) direct een gifwolk ontstaat (bij transport onder druk) of na verdamping (bij transport als vloeistof, overigens verboden voor weg en spoor). Bij andere waterstofdragers kan bij een breuk of lekkage een brand of explosie ontstaan, maar alleen als de drager tot ontbranding of explosie komt. Een dergelijk incident levert bovendien een lager aantal slachtoffers op dan een gifwolk. Weg en spoor hebben een lagere score dan de andere modaliteiten door de hogere kans op een incident en daardoor het hogere risico.

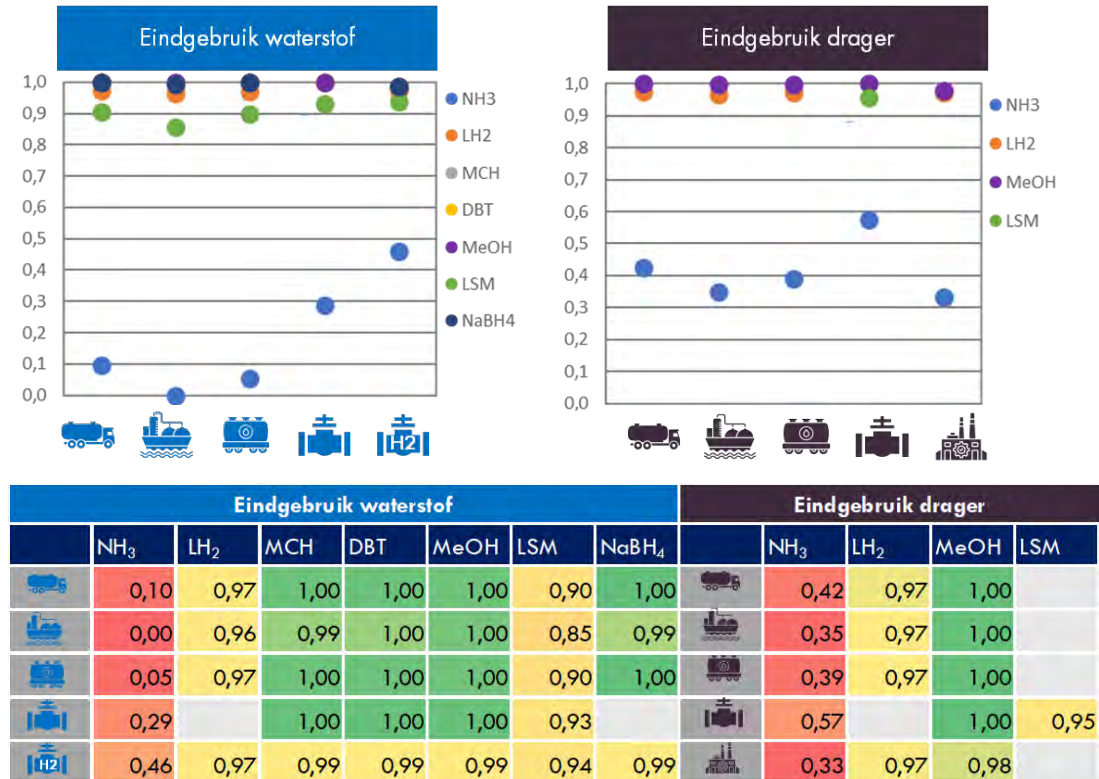
LSM brengt het risico op een wolkbrand of fakkelbrand met zich mee. Dit levert meer slachtoffers op dan een plasbrand. Vanwege het explosiegevaar krijgt ook vloeibare waterstof een lagere score dan de overige waterstofdragers. Hoewel natriumboorhydride bij contact met water ook een explosie kan veroorzaken, is deze kans kleiner omdat er eerst contact met water moet zijn en vervolgens ontbranding van de vrijkomende waterstof.



Figuur 34: Scores omgevingsveiligheid ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik draager

Cybersecurity en terrorisme (deelindicator)

Ook op het vlak van cybersecurity en terrorisme heeft ammoniak in alle ketens de laagste score gekregen, en lager dan bij omgevingsveiligheid. Dit komt doordat de experts verwachten dat een aanval of aanslag eerder gericht zal zijn op ketenonderdelen en stoffen waar de negatieve impact groot is dan op ketenonderdelen en stoffen met een minder catastrofale impact. Ook LSM krijgt hierdoor een lagere score, maar het verschil ten opzichte van de andere dragers is significant kleiner dan voor ammoniak. De scores voor de andere dragers en ketens liggen dicht bij elkaar.



Figuur 35: Scores voor cybersecurity en terrorisme ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

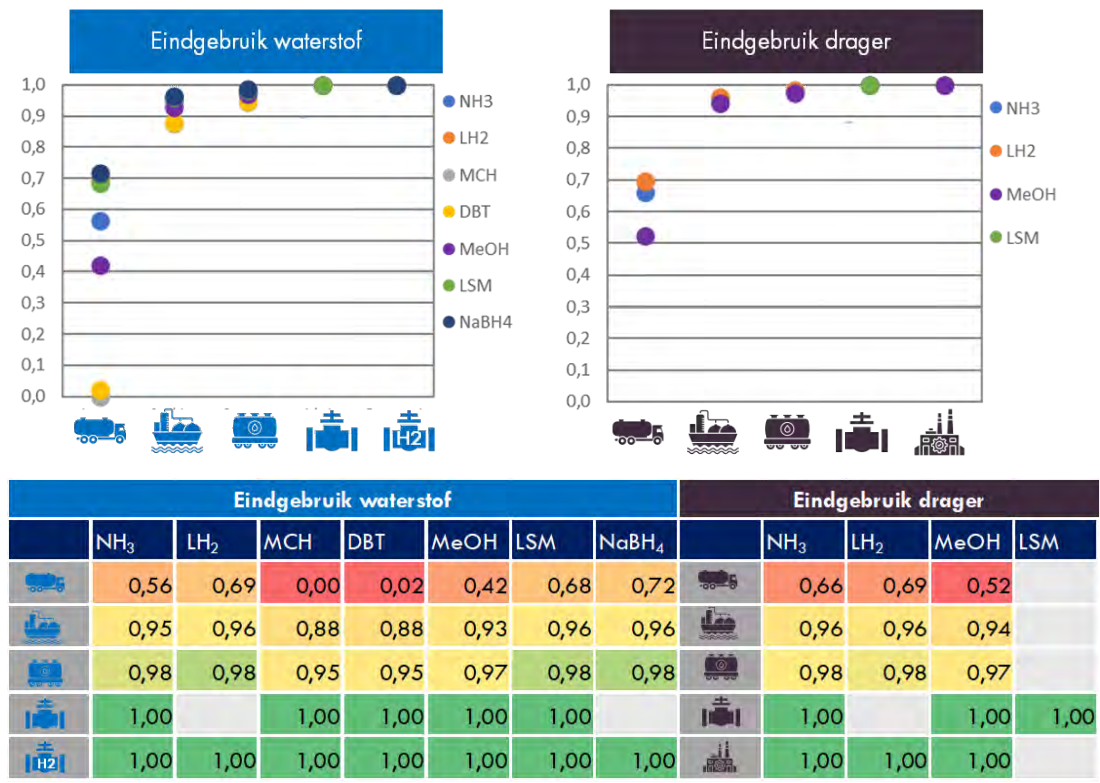
Transportveiligheid (deelindicator)

Transport over de weg levert de hoogste risico's op verkeersongevallen op, vervolgens transport over water, en daarna per spoor. Transport via buisleiding veroorzaakt geen verkeersongevallen en dus ook geen risico's hierop. Van de wegalternatieven hebben de LOHC's een relatief lage score omdat ze de meeste vervoerbewegingen opleveren.

De rechtergrafiek toont iets hogere scores dan de linkergrafiek doordat er minder volume getransporteerd wordt door het ontbreken van een conversiestap bij de eerste vier ketengroepen in de rechtergrafiek. Bij de conversies van ammoniak, methanol en LSM is sprake van inzet van de drager voor proceswarmte, zodat er meer drager moet worden aangevoerd om te compenseren voor conversieverlies.

De ketens met zowel conversie als decentrale synthese in Nederland zouden meer transportveiligheidskosten kunnen opleveren als de volumes per weg, water of spoor zouden worden vervoerd.

Omdat deze alternatieven echter uitgaan van transport via het waterstofnet, zijn de transportveiligheidskosten nihil.



Figuur 36: Scores transportveiligheid ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

6.6 SCORES OP PUBLIEKE BELANG DUURZAAM

Het publieke belang Duurzaam wordt geconcretiseerd met drie indicatoren: broeikasgasemissies, energieverlies en materiaalgebruik. De uitstoot van broeikasgasemissies heeft het grootste gewicht in deze analyse. In deze paragraaf worden eerst de samengevoegde en gewogen resultaten voor het publieke belang Duurzaam beschreven. Vervolgens worden de resultaten per indicator toegelicht.

De score op Duurzaam is een combinatie van drie kwantitatieve scores. De als minst duurzaam beoordeelde keten krijgt de score 0. Een theoretische keten die geen kritische materialen nodig heeft, geen broeikasgasemissies oplevert en geen extra energie vraagt om een kilogram waterstof te produceren krijgt een score van 1.

Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

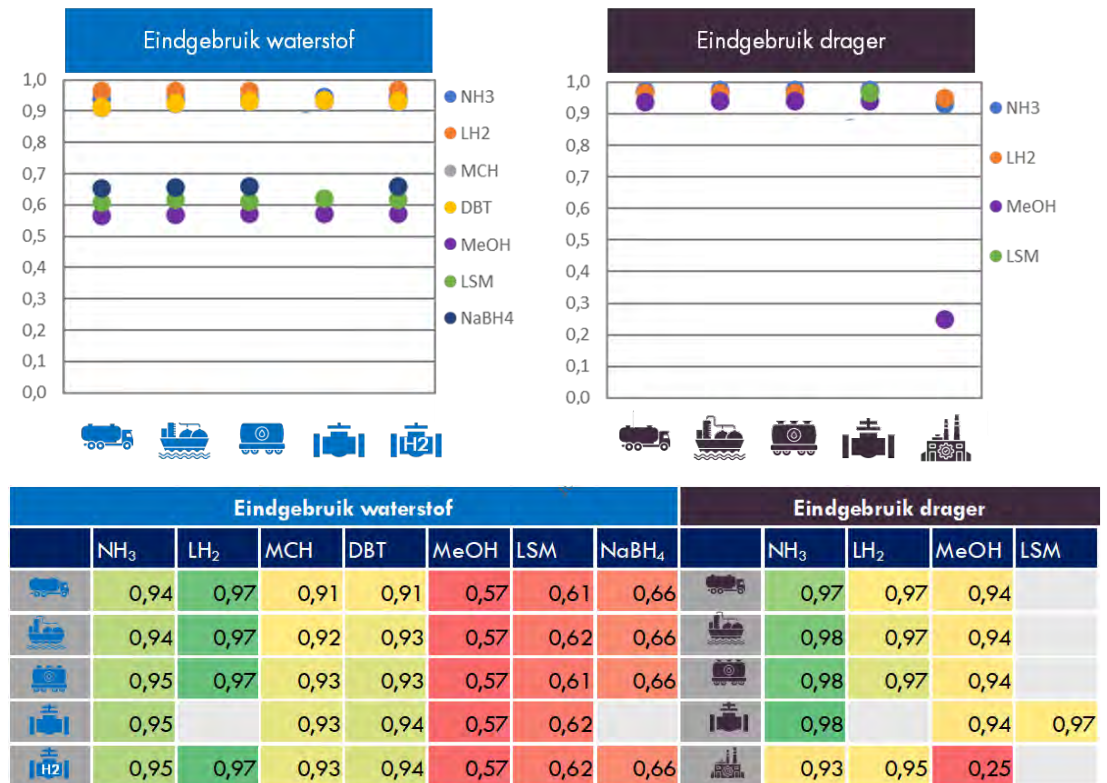
Het gewogen resultaat voor Duurzaam is te zien in Figuur 37. De meeste dragers hebben een hoge score. Bepalend voor verschillen blijkt de broeikasgasuitstoot en voor de positie van natriumboorhydride ook het materiaalgebruik en energieverlies.

Voor de (deel)score broeikasgassen zijn CO₂-emissies bij de conversie van methanol en LSM belangrijk. Hierdoor hebben deze dragers een lagere score. In 2030 is de aanname dat voor synthese van LSM en methanol CO₂ van fossiele herkomst uit een industriële puntbron wordt gebruikt. Als deze CO₂ in het exportland wordt opgeslagen in methaan of methanol en in Nederland bij

steam reforming weer vrijkomt is sprake van netto CO₂-uitstoot die we toerekenen aan de keten.⁶¹ Bovendien is bij synthese sprake van een deel CO₂ dat uit het proces weglekt. In 2050 gaan we uit van gebruik van CO₂ uit *direct air capture*: in dat geval wordt de bij *steam reforming* vrijkomende CO₂ (en ook de bij synthese weglekkende CO₂) niet toegerekend aan de keten.

Natriumborhydride krijgt een lagere score door een groot beslag op het kritieke materiaal boor en een hoog energieverlies voor productie en recycling.

Tussen de overige ketens zijn de verschillen klein. De effecten van broeikasgasemissies bij transport en als gevolg van *boil-off* en lekkage van vloeibare waterstof zijn weinig onderscheidend. De iets lagere scores voor MCH en DBT bij transport over de weg of water zijn het gevolg van meer CO₂-uitstoot door het grotere aantal transportbewegingen vanwege het lagere waterstofgehalte voor conversie, de hogere beladingsgraad van de voertuigen vanwege de retourstroom en de hogere CO₂-uitstoot door het gebruik van elektriciteit in Nederland. Andere dragers gebruiken minder elektriciteit in Nederland doordat 1) voor een deel van de energiebehoefte de drager zelf wordt ingezet (methanol, LSM, ammoniak), 2) de energievraag voor conversie in Nederland kleiner is (vloeibare waterstof) of 3) de energie voor conversie vooral nodig is bij productie in het buitenland (natriumborhydride). In 2050 zullen de emissies van de transportbewegingen zijn verdwenen vanwege de aanname van zero-emissietransport.



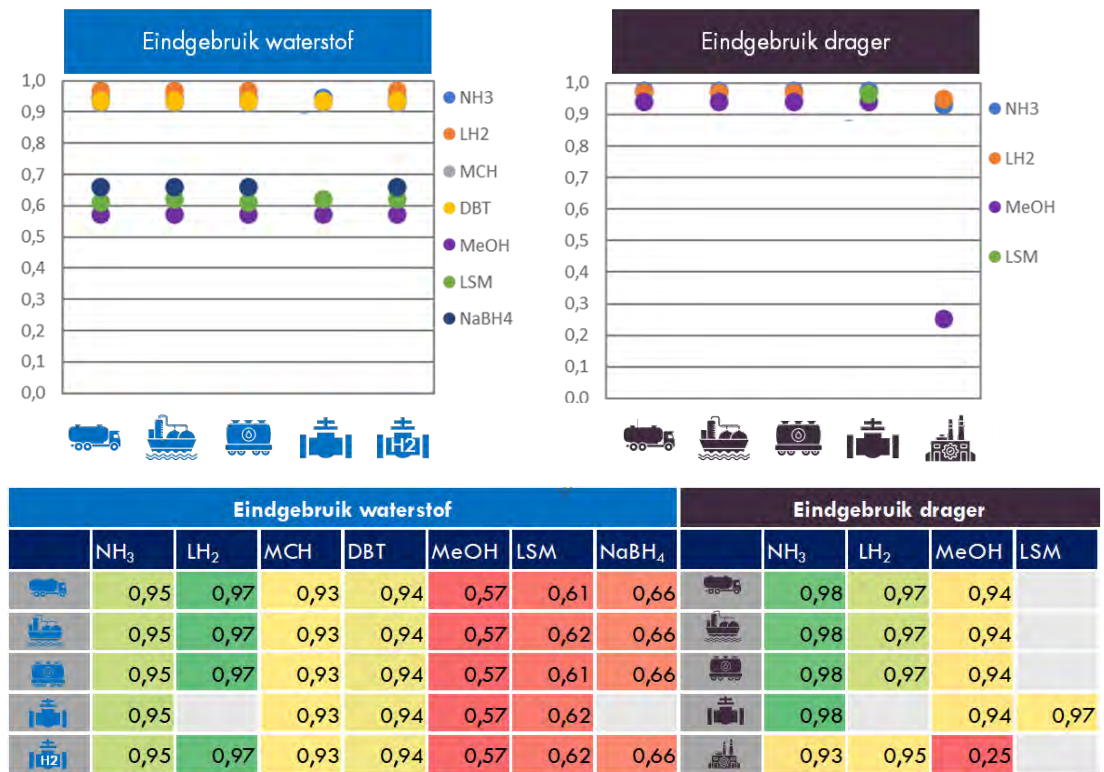
Figuur 37: Scores Duurzaam ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

⁶¹ In de basissituatie en varianten haven, doorvoer en export naar buurlanden, en 2050 veronderstellen we dat de CO₂ die vrijkomt bij *steam reforming* niet afgevangen wordt. Er is wel een gevoeligheidsanalyse gedaan naar effect met afvang, zie Hoofdstuk 7.

Resultaten varianten

Importhaven

Bij eindgebruik in de importhaven verbetert de score op Duurzaam van verschillende ketens een klein beetje ten opzichte van de basissituatie. De effecten van binnenlands transport en de verschillen tussen de modaliteiten vallen weg, zie Figuur 38. Deze zijn echter klein ten opzichte van de andere ketenonderdelen waardoor het totale effect op de scores klein is.



Figuur 38: Scores Duurzaam ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Doorvoer en export

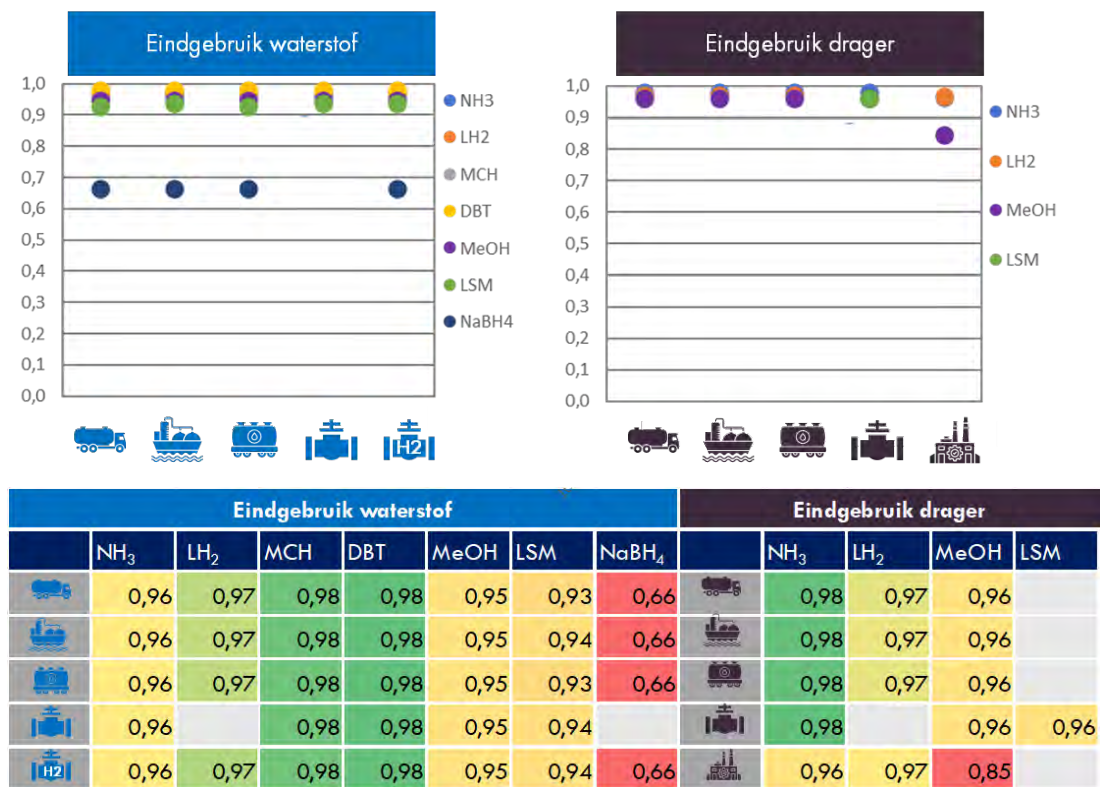
Bij eindgebruik in Duitsland of België zijn de scores op Duurzaam exact gelijk aan in de basissituatie. Dit komt omdat we de duurzaamheidsaspecten (broeikasgas, energieverlies en materiaalgebruik) over de hele keten meetellen, terwijl we bij andere publieke belangen alleen de impact binnen Nederland meenemen.



Figuur 39: Scores Duurzaam ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager (identiek aan Figuur 37)

Zichtjaar 2050

In 2050 verbeteren de scores op Duurzaam ten opzichte van de basissituatie in 2030 maar niet in gelijke mate voor alle ketens. De LSM- en methanolketens verbeteren sterk doordat de CO₂-emissies in 2050 klimaatneutraal zijn door het gebruik van CO₂ uit DAC in plaats van uit een industriële puntbron zoals in de basissituatie. De meeste ketens profiteren in meer of mindere mate van een verbetering van de energie-efficiëntie en klimaatneutraal transport. Vooral voor de LOHC's zorgt dit voor een hogere score. Vloeibare waterstof krijgt geen zichtbaar hogere score doordat de waterstofverliezen in 2050 gelijk zijn verondersteld aan de basissituatie. Het materiaalgebruik van de ketens is in 2050 gelijk verondersteld aan de basissituatie.

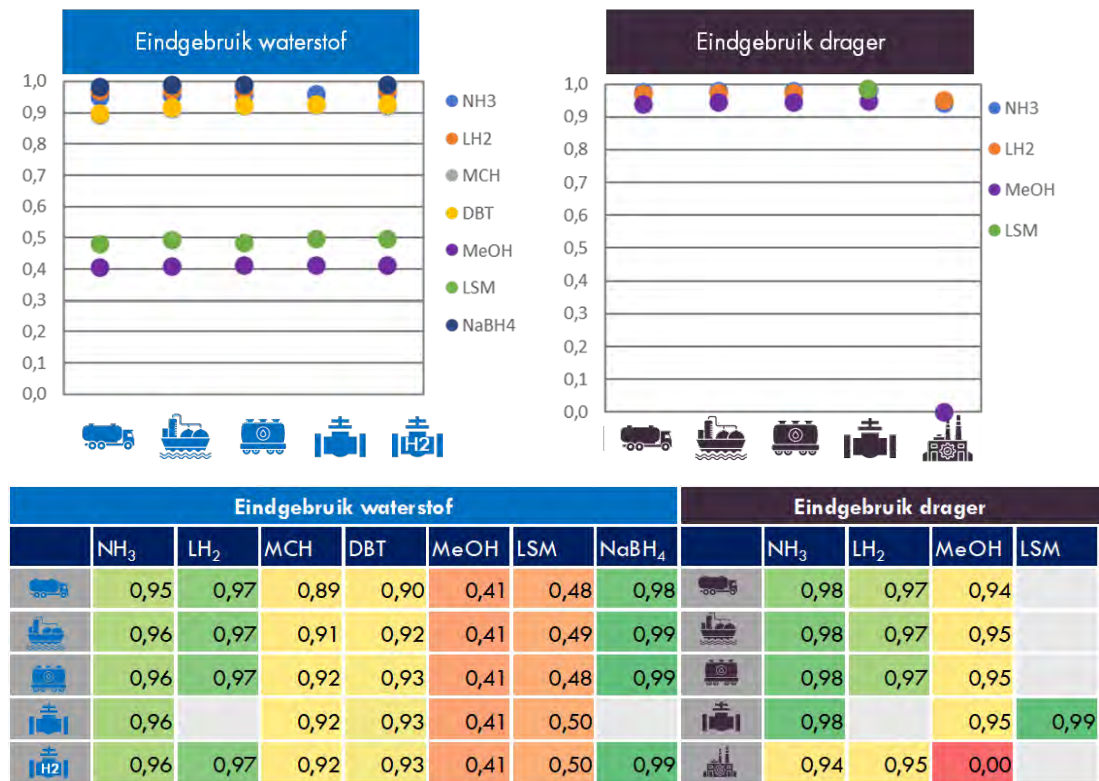


Figuur 40: Scores Duurzaam ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Broeikasgasemissies (deelindicator)

De ketens met de hoogste score op het gebied van broeikasgassen zijn de ketens waarbij tijdens de synthese en conversie geen CO₂-uitstoot en -verliezen optreden. Bij LSM en methanol is dat wel het geval, zoals hierboven beschreven (zonder extra maatregelen zoals CC(U)S). De laagste score op het gebied van broeikasgassen is de keten voor methanol met zowel conversie als decentrale synthese in Nederland met een CO₂-uitstoot van 18-19 kilogram CO₂ per kilogram waterstofequivalent. Ter vergelijking: dit is een hogere uitstoot dan bij *steam reforming* van fossiel aardgas (9 kg CO₂ per kg H₂-equivalent).

Ten opzichte van LSM en methanol met conversie naar waterstofgas (linkergrafiek) is de broeikasgasuitstoot van de andere alternatieven ‘klein’. Het gaat in totaal om zo’n 0,2 tot 2 kilogram CO₂-equivalent per kilogram waterstof. Deze broeikasgassen zijn het gevolg van lekkages en geventileerde dampen van waterstof en methaan en van de CO₂-uitstoot van de transportbewegingen en het elektriciteitsgebruik. Hierdoor hebben de LOHC’s een iets lagere score dan de ketens op basis van ammoniak en vloeibare waterstof. De uitstoot van lachgas in de ammoniakketens heeft een ondergeschikte impact.



Figuur 41: Scores broeikasgasemissies ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Energieverlies (deelindicator)

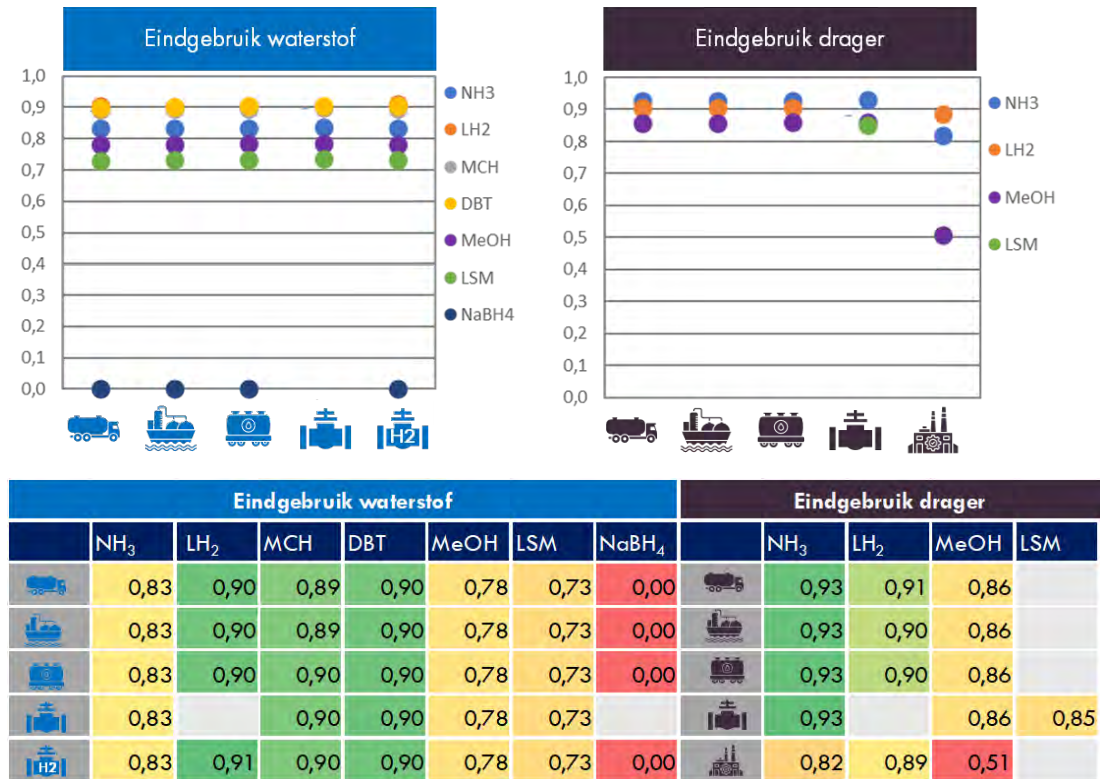
Het energieverlies voor een kilogram waterstofequivalent betreft energie voor elektrolyse, conversies, voor transport, en verliezen door lekkage en *boil-off*. In het geval van LSM en methanol is er ook energieverlies voor het afvangen en beschikbaar maken van CO₂ voor synthese van de drager. De energie kan bestaan uit toegevoerde elektriciteit of warmte, of uit het gebruik of verlies van de drager zelf. De score van 1 wordt toegekend aan de theoretisch meest efficiënte keten, waarvoor het totale energieverlies precies gelijk is aan de energie-inhoud van een kilogram waterstof. De keten met het hoogste energieverlies per kilogram waterstof krijgt een score van 0.

Een keten met transport van natriumboorhydride over de weg heeft het hoogste energieverlies. De totale input aan energie over de keten is hier ongeveer 10 keer zo hoog als de energie-inhoud van een kilogram waterstof; het aandeel van het transport in het totaal is overigens heel klein. Voor de productie van natriumboorhydride en de recycling ervan na het afgeven van de waterstof (*spent fuel*) is veel energie nodig. Een klein deel van deze energie komt vrij als warmte bij de conversie naar waterstof. Deze relatief kleine energieproductie (3%) is niet in mindering gebracht op het energieverlies.

Voor een hoge score op dit publieke belang is ook het conversieverlies bepalend: ketens met de minste conversies van waterstof naar waterstofdrager en vice versa hebben de hoogste score, zie ammoniak in Figuur 42 rechts.

Gebruik van de drager voor het conversieproces leidt tot lagere scores. Voor het kraken van ammoniak en het reformen van LSM en methanol wordt voor de conversie een deel van de waterstofdrager gebruikt. Dit telt door in het energieverlies van de keten omdat er een groter volume

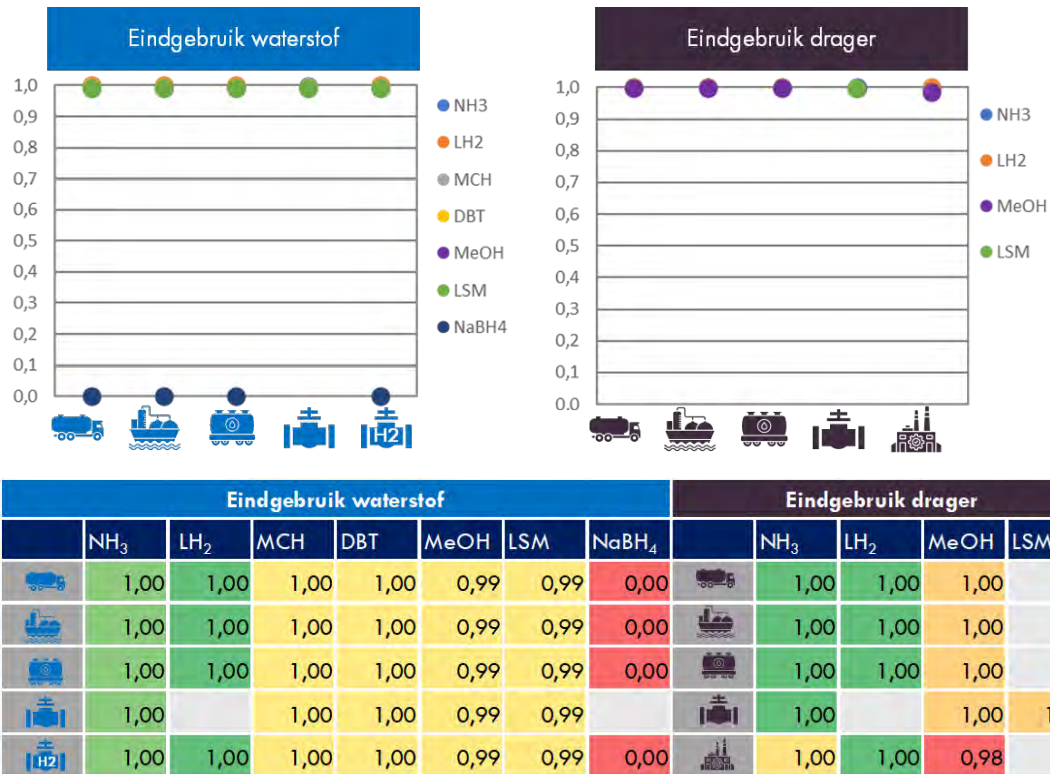
van de drager geproduceerd moet worden in de exportlanden voor een vergelijkbaar eindgebruik. Ketens waarin de drager niet gebruikt wordt als brandstof hebben hier geen last van. Dit zijn ketens waarbij de conversie warmte oplevert (natriumboorhydride, vloeibare waterstof) of waar gebruik van elektriciteit goed mogelijk is (DBT en MCH). Deze krijgen als gevolg een hogere score in Figuur 42.



Figuur 42: Scores energieverlies ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Materiaalgebruik (deelindicator)

De score voor materiaalgebruik gaat over de omvang van het beslag op schaarse materialen die nodig zijn voor de waterstofketen: katalysatoren en dragermateriaal. De score van 1 is voor ketens die geen beslag leggen op schaarse materialen. De score van 0 is gegeven aan ketens met het hoogste materiaalgebruik, dat wil zeggen ketens gebaseerd op natriumboorhydride, vanwege het gebruik van boor als bestanddeel (28 massa%). Deze ketens leggen het grootste beslag op kritische materialen uitgedrukt in de huidige marktprijs van deze materialen. Per kilogram waterstofequivalent is ongeveer 1,33 kilogram boor nodig. Dit kan opnieuw en in meerdere ‘cycles’ per jaar worden gebruikt maar vraagt een substantiële investering en zal op termijn toch vervangen / aangevuld moeten worden. De waarde hebben we op ruim 1,30 euro per kilogram waterstof begroot. Het materiaalgebruik van de andere ketens (€ 0,00 - € 0,02 per kg waterstof) die voortkomen uit verschillende behoeften aan edelmetalen als katalysatoren valt hiertegen weg.



Figuur 43: Scores materiaalgebruik ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

6.7 SCORES OP PUBLIEKE BELANG ADAPTIEF

De genormaliseerde scores voor het publieke belang Adaptief die volgen uit de expertsessie worden getoond in Figuur 44 voor de verschillende leveringsketens bij gebruik in het binnenland. Hoe hoger de score, hoe minder risicovolle investeringen er nodig zijn. De gebruikte bandbreedte is 26 (score 0) tot 0 euro (score 1) aan risicovolle investeringen per kilogram waterstofequivalent. Risicovol betekent dat investeringen additioneel moeten worden gedaan en dat ze geen andere toepassing hebben.

Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

Voor de score zijn de investeringen in conversie doorslaggevend. De laagste scores hebben ketens met één of meer conversiestappen omdat een conversie-installatie in principe niet zal worden hergebruikt voor een ander proces, en er evenmin bestaande installaties beschikbaar zijn die hiervoor kunnen worden ingezet (ze zijn niet aanwezig of ze zijn bezet zoals bestaande *steam methane reforming* installaties).

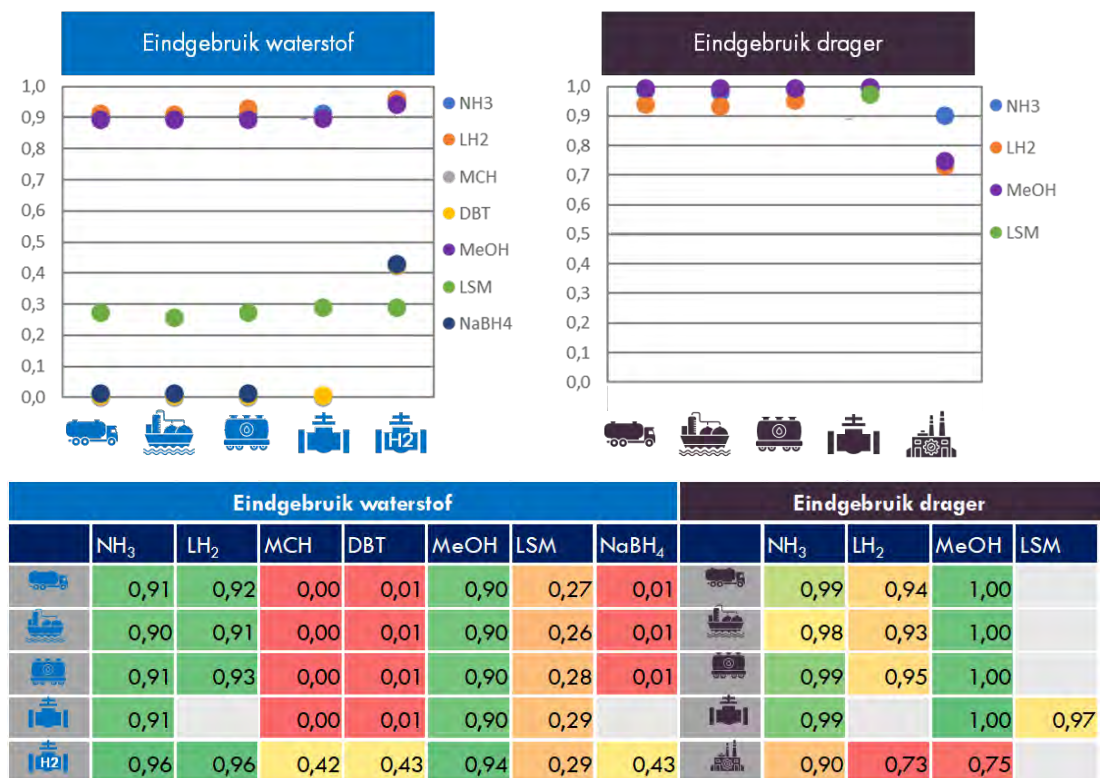
Op korte termijn valt van de *installed base* geen substantieel deel vrij. Hierdoor zijn veel additionele investeringen nodig. Bij de daadwerkelijke afbouw van fossiel kan dit veranderen. De investeringen die hiermee gemoeid zijn, zijn veel groter dan voor transportmiddelen of opslagvoorzieningen.

De LOHC's en natriumboorhydride hebben een voordeel met betrekking tot opslagtanks en transportmiddelen omdat deze assets meer dan bij andere dragers voor andere stoffen kunnen worden hergebruikt. Toch hebben deze ketens een lagere score omdat de investeringen per kilogram waterstof in niet-herbruikbare conversie-installaties veel groter zijn dan dit voordeel en dan

de investeringen in conversie-installaties voor andere dragers zoals ammoniak, vloeibare waterstof en methanol. Ook de LSM-installaties pakken duur uit vooral door de relatief hoge additionele investeringen voor conversie-installaties (centraal en decentraal). Er is weliswaar een grote *installed base* van *steam methane reforming*-installaties in Nederland maar we zijn voor een eerlijke vergelijking met andere ketens uitgegaan van de noodzaak voor nieuwbouw.

Het bestaande aardgasnet ligt er al en heeft voldoende capaciteit. Dit is gunstig voor de score van direct gebruik van methaangas uit LSM dat via het aardgasnet wordt geleverd (zie Figuur 44 rechts). Bij gebruik van waterstof na conversie van LSM beïnvloeden de dure cryogene LSM-installaties de score juist ongunstig (zie Figuur 44 links).

Aandachtspunt bij de scores op Adaptief is dat de mate van herbruikbaarheid van de investeringen gebaseerd is op *expert judgement* en dat de waarden voor de benodigde investeringen in de literatuur onzeker zijn. Voor de conversie van natriumboorhydride hebben we geen bruikbare data gevonden en dezelfde investeringen per kilogram waterstofequivalent als voor DBT verondersteld.



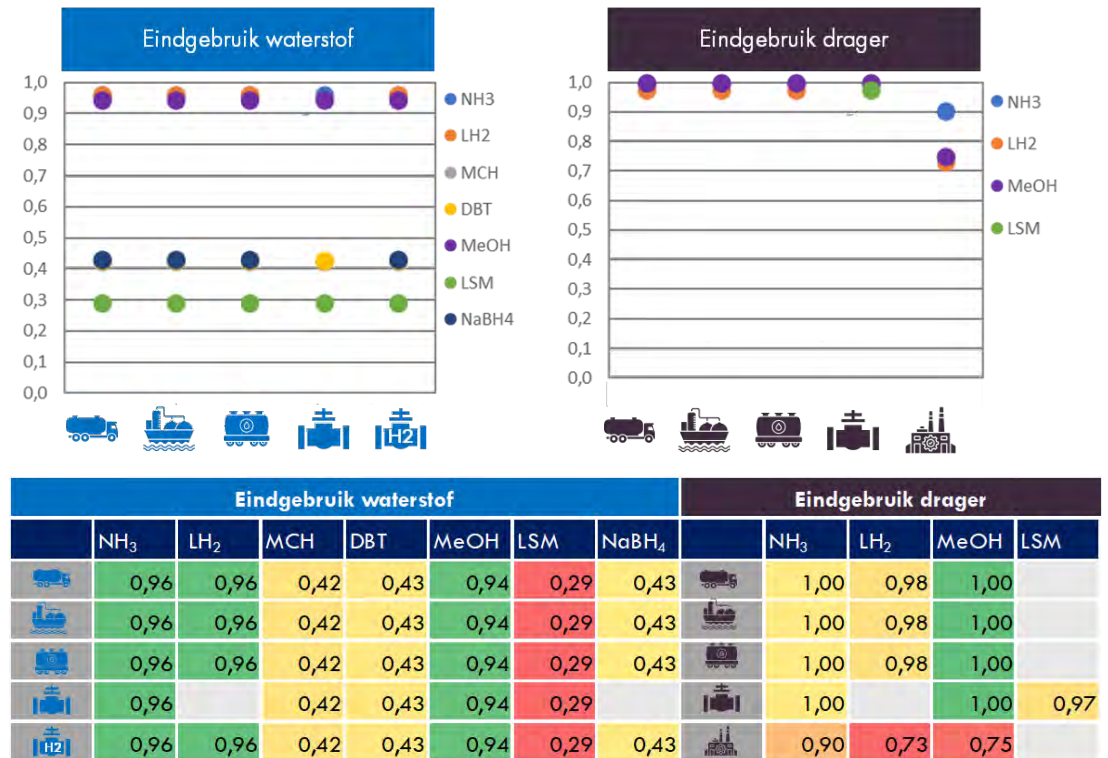
Figuur 44: Scores adaptiviteit ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Resultaten varianten

Importhaven

Bij eindgebruik in de importhaven verbetert de score op Adaptief iets ten opzichte van de basis-situatie. Dit komt omdat er geen risicovolle investeringen in transportmiddelen nodig zijn voor het binnenlands transport en omdat decentrale risicovolle investeringen van conversie meestal hoger zijn ingeschat dan als de conversie-installatie met schaalvoordelen centraal in de haven wordt aangelegd. Dit effect is het grootst voor de LOHC's en natriumboorhydride. Voor de LSM-installaties is er geen verschil in de hoogte van de veronderstelde investeringen tussen centraal en

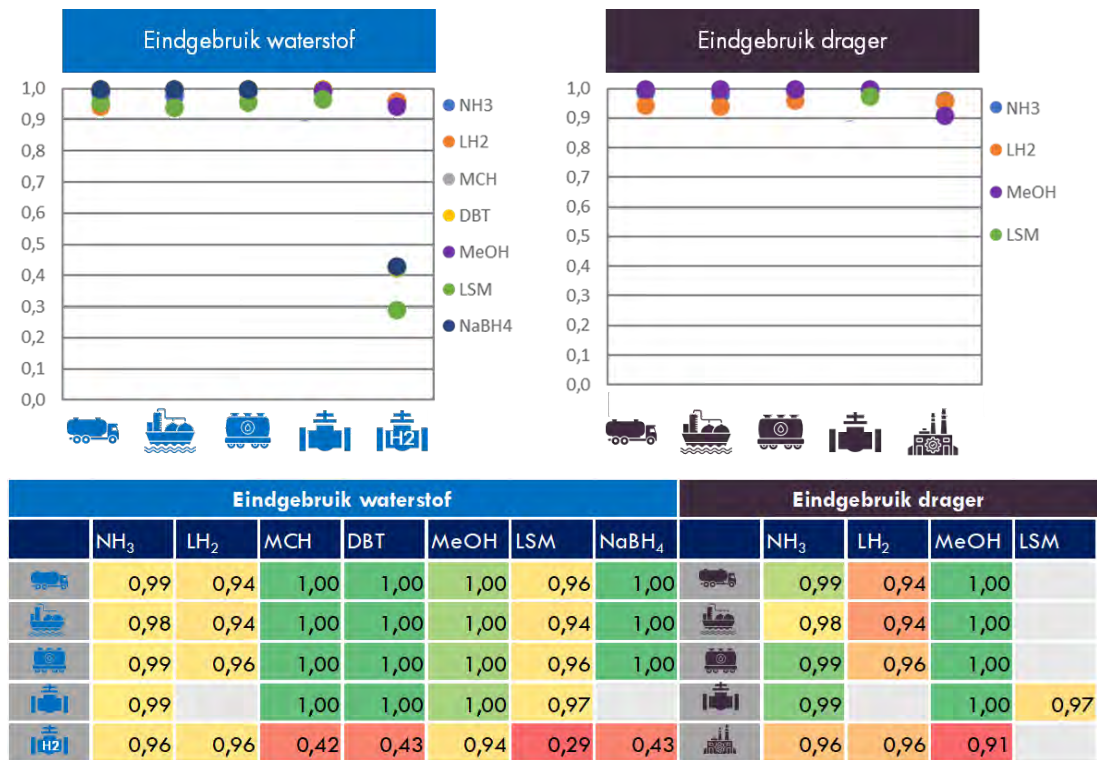
decentraal. Hierdoor verandert er minder aan de score voor LSM (alleen investeringen in transportmiddelen).



Figuur 45: Scores Adaptief ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Doorvoer en export

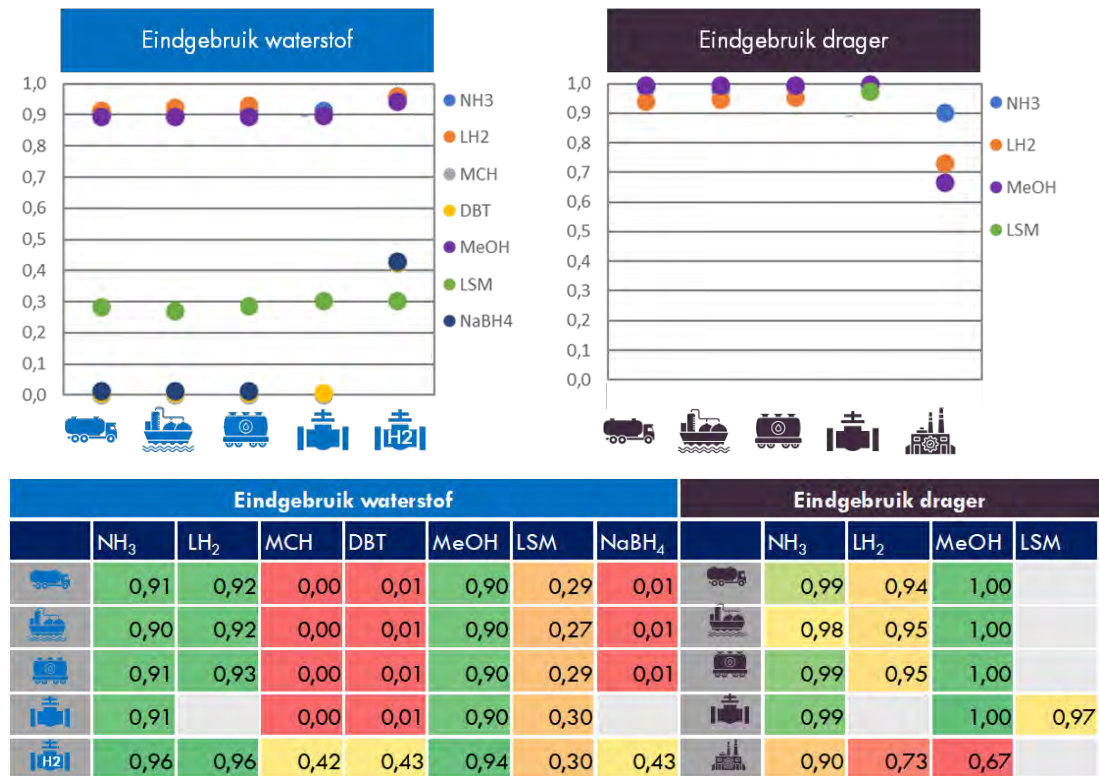
Bij eindgebruik in Duitsland of België vervallen de risicovolle investeringen verbonden aan de conversie en opslag bij de eindgebruiker. Hierdoor verbetert de score van de ketens met decentrale conversie of opslag ten opzichte van het eindgebruik in Nederland. Dit betreft alle ketens behalve de vijfde in de linkergrafiek en de vierde in de rechtergrafiek.



Figuur 46: Scores Adaptief ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Zichtjaar 2050

De scores op adaptiviteit zijn in 2050 bijna gelijk aan de scores in de basissituatie 2030. Dit komt doordat de investeringen in conversie-installaties bepalend zijn voor de score. Deze zijn ook in 2050 niet beschikbaar voor de groeiende vraag naar waterstof(dragers), noch zijn ze herbruikbaar. Wel zijn er kleine verschillen als gevolg van de gedaalde investeringskosten van binnenvaartschepen voor het transport van vloeibare waterstof, lagere volumes voor gebruik als brandstof bij conversie, en het gebruik van CO₂ uit DAC in plaats van industriële puntbronnen bij de synthese van methanol en LSM. Dit vraagt om grotere volumes van de dragers en dus meer installaties. De leveringsketen met synthese van methanol in Nederland (conversie en decentrale synthese in Nederland, kolom 5 rechts), krijgt hierdoor een lagere score.



Figuur 47: Scores Adaptief ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

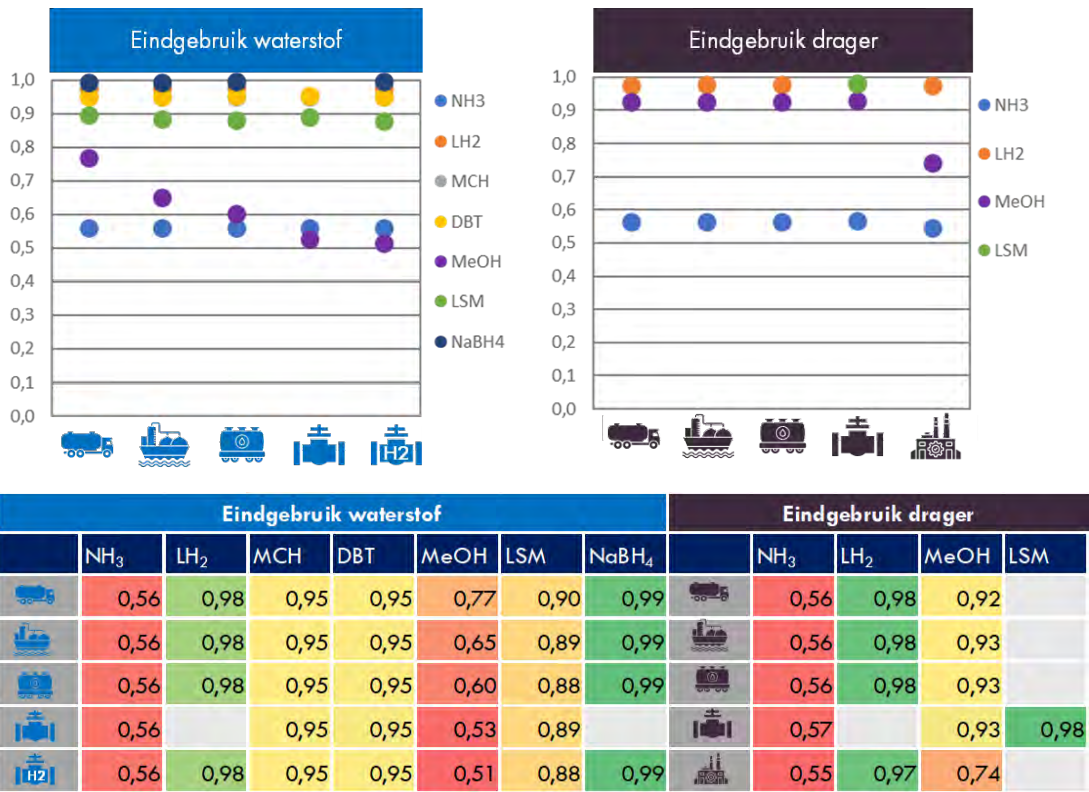
6.8 SCORES OP PUBLIEKE BELANG RECHTVAARDIG

De genormaliseerde scores voor het publieke belang Rechtvaardig zijn een combinatie van twee indicatoren: één voor rechtvaardigheid voor exportlanden en één voor rechtvaardigheid voor de omgeving in Nederland. Deze indicatoren zijn ongeveer even zwaar gewogen door de stakeholders. In deze paragraaf worden allereerst de samengevoegde en gewogen resultaten voor het publieke belang Rechtvaardig beschreven. Vervolgens wordt ingezoomd op de resultaten per indicator.

Hoe hoger de score, hoe kleiner het verschil is tussen de 'true price' en de in rekening gebrachte kosten. Een keten krijgt de score van 1 als er geen verschil is tussen de *true price* en de in rekening gebrachte kosten; de *true price* gedeeld door de in rekening gebrachte kosten is dan 100%. De keten met het grootste procentuele verschil krijgt de score 0.

Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

Het gewogen resultaat voor Rechtvaardig is te zien in Figuur 48. De tabel toont lagere scores voor ammoniak en voor methanol. Voor methanol is dit het gevolg van lage importkosten. De lagere score voor ammoniak is het gevolg van een combinatie van lage kostprijs en hogere milieukosten van vooral ammoniakemissies en lekkage.



Figuur 48: Scores Rechtvaardig ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Resultaten varianten

Importhaven

Bij eindgebruik in de importhaven vervalt het onderscheid als gevolg van binnenlands transport (rechtvaardigheid leveringsketen in Nederland). De scores voor rechtvaardigheid voor de producerende landen blijven gelijk.

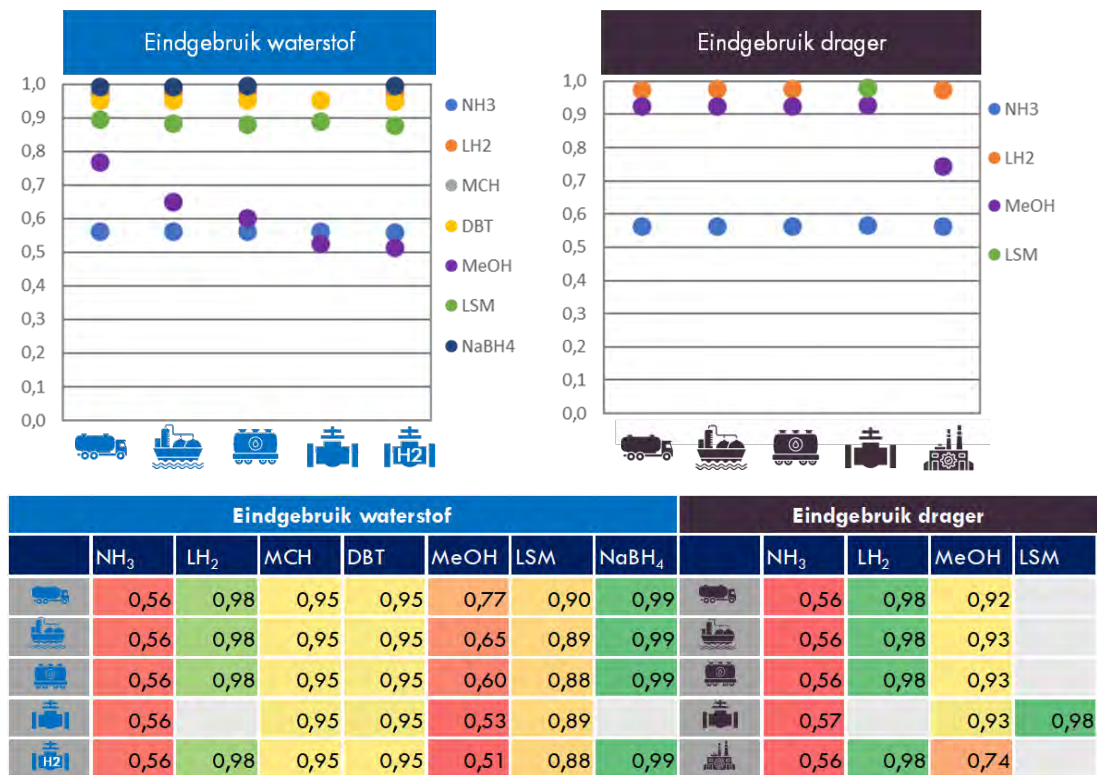
Per keten verschilt de impact van het wegvallen van binnenlands transport. Met name methanolketens over weg, water en spoor krijgen lagere scores doordat de kosten van de binnenlandse keten sterker afnemen dan de externaliteiten.



Figuur 49: Scores Rechtvaardig ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik draager

Doorvoer en export

Bij eindgebruik in Duitsland of België vervallen de bijdragen van decentrale opslag en conversie. Dit heeft invloed op de rechtvaardigheid van de leveringsketen in Nederland. De rechtvaardigheid voor de producerende landen blijft net als bij eindgebruik in de importhaven gelijk. Per keten verschilt de impact van het wegvallen van de bijdragen van decentrale opslag en conversie. Voor ketens zonder decentrale conversie of opslag verandert er niets (gebruik waterstofnet in linkergrafiek, vijfde kolom en gebruik buisleiding in rechtergrafiek, vierde kolom).



Figuur 50: Scores Rechtvaardig ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik dra-ger

Zichtjaar 2050

In 2050 hebben sommige ketens een hogere en andere een lagere of vrijwel gelijke score aan de basissituatie 2030. LSM en methanol krijgen een hogere score doordat de externe kosten (broeikasgassen) sterker afnemen dan de kosten voor import. Hierdoor wordt het verschil tussen de *true price* en de werkelijke kosten kleiner en volgt een hogere score. Ook voor de LOHC's is dit het geval en voor natriumboorhydride in beperkte mate. De effecten van zero-emissietransport in 2050 zorgen voor een grotere afname van de externe kosten dan van de in rekening gebrachte kosten. De score verbetert daardoor iets. Vloeibare waterstof en ammoniak krijgen juist een iets lagere score. Dit komt doordat de afname van de import- en conversiekosten groter is dan van de externe kosten. De externe kosten bestaan bij vloeibare waterstof vooral uit lekkage van waterstof en bij ammoniak uit lekverliezen van ammoniak bij synthese en een beperkte NO_x-uitstoot. Hierin zijn geen veranderingen verondersteld voor 2050.



Figuur 51: Scores Rechtvaardig ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Afwenteling van externe kosten op producerende landen

De hoogste scores hebben importketens waarbij het verschil tussen de *true price* en de berekende kostprijs dicht bij elkaar liggen: dit is het meest rechtvaardig. Dit is het geval voor natriumboorhydride, omdat dit een hoge kostprijs heeft en weinig externaliteiten veroorzaakt. Ammoniak en in mindere mate methanol veroorzaken meer broeikasgas- en milieuemissies in het buitenland en hebben juist een lagere importprijs. Hierdoor krijgen ze een lage score.



Figuur 52: Scores rechtvaardigheid producerende landen ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Afwenteling van externe kosten van ketens in Nederland

De score op Rechtvaardig voor de omgeving in Nederland wordt bepaald door de ketenstappen vanaf import en opslag in de importhaven tot en met de conversie bij de eindgebruiker. Opgeteld zijn de externe kosten van deze stappen het grootst voor LSM en methanol. Vervolgens komen de LOHC's en ammoniak en ten slotte natriumboorhydride en vloeibare waterstof.

De in rekening gebrachte kosten zijn het hoogst voor de LOHC's en vloeibare waterstof. De groep met gemiddelde kosten bestaat uit LSM en ammoniak. De groep met de laagste in rekening gebrachte kosten bevat de ketens met natriumboorhydride en methanol.

Methanol krijgt hier de laagste score. Dit komt door de hoge externe kosten (de teller) en de lage kosten voor leveringsketen in Nederland (de noemer). Natriumboorhydride heeft lage kosten in Nederland maar de externe kosten liggen veel lager. LSM heeft ook hoge externe kosten zoals methanol maar hogere in rekening gebrachte kosten voor de Nederlandse leveringsketen dan methanol.

Opvallend is het verloop van de scores op de verschillende modaliteiten bij methanol. Dit komt doordat de externe kosten in de ketens in de linkergrafiek ongeveer even hoog liggen, maar de totale kosten voor transport en opslag en conversie sterk variëren tussen wegtransport als duurste en transport via het waterstofnet als goedkoopste modaliteit. Ook bij de andere dragers variëren de kosten maar is de relatieve variatie veel kleiner. Voor methanol zijn de kosten voor transport meer dan 2,5 x zo hoog via de weg als de laagste kosten via het waterstofnet, voor LSM zijn de kosten via de weg slechts 25% hoger dan via het waterstofnet.



Figuur 53: Scores rechtvaardigheid ketenstappen in Nederland ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

6.9 SCORES OP PUBLIEKE BELANG TOEGANKELIJK

Het publieke belang Toegankelijk bestaat uit twee indicatoren: 1) een zoveel mogelijk gelijk kostenniveau in het achterland ten opzichte van de importhaven en 2) de nabijheid van de importketen voor het achterland. Een zoveel mogelijk gelijk en daardoor toegankelijk kostenniveau krijgt van de Delphi-groep het grootste gewicht van deze twee indicatoren. In deze paragraaf beschrijven we eerst het samengevoegde en gewogen resultaat voor het publieke belang Toegankelijk. Vervolgens lichten we de resultaten per indicator toe.

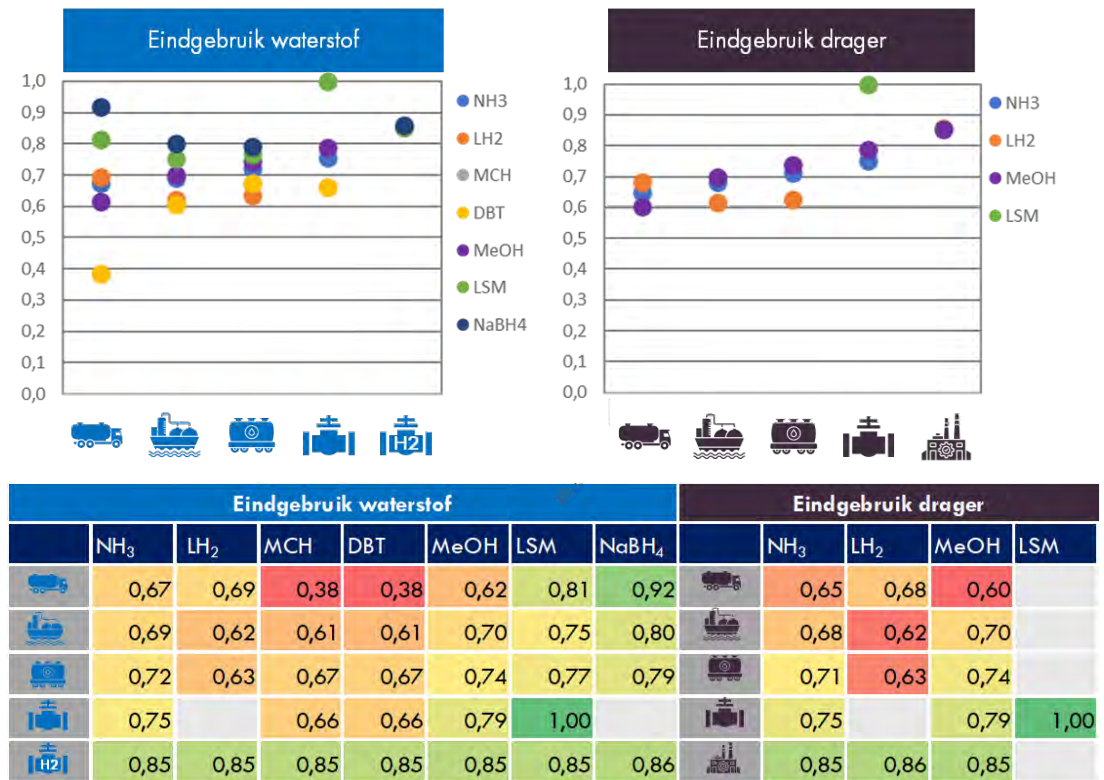
Een leveringsketen die voor alle bedrijven in het achterland toegankelijk is en waarvoor de kosten in het achterland even hoog liggen als voor bedrijven in de importhaven krijgt een score van 1. Een score van 0 krijgt een keten die voor 0% van de bedrijven in het achterland toegankelijk is en die de hoogste meerkosten (ongeveer 10%) heeft in deze analyse ten opzichte van een bedrijf in de importhaven.

Resultaten basissituatie(2030, eindgebruik in het binnenland)

Figuur 54 laat het gewogen resultaat zien voor het publiek belang Toegankelijk. De levering via het in Nederland wijdverbreide aardgasnet heeft de hoogste score (de vierde kolom in zowel grafiek links als rechts). Hoewel levering via de weg ook voor alle bedrijventerreinen mogelijk is, zorgt het nadeel qua kosten voor een lagere eindscore, met name voor DBT en MCH waarvoor de binnenlandse transportkosten relatief hoog zijn.

Door de lagere score op de indicator nabijheid is de samengestelde score van transport over water, spoor en buisleidingen lager dan voor transport over de weg. De score voor natriumboorhydride

is relatief hoog. Dit komt doordat de importkosten vrij hoog liggen en de meerkosten door het binnenlands transport voor een kleine kostentoeename zorgen.



Figuur 54: Scores Toegankelijk ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

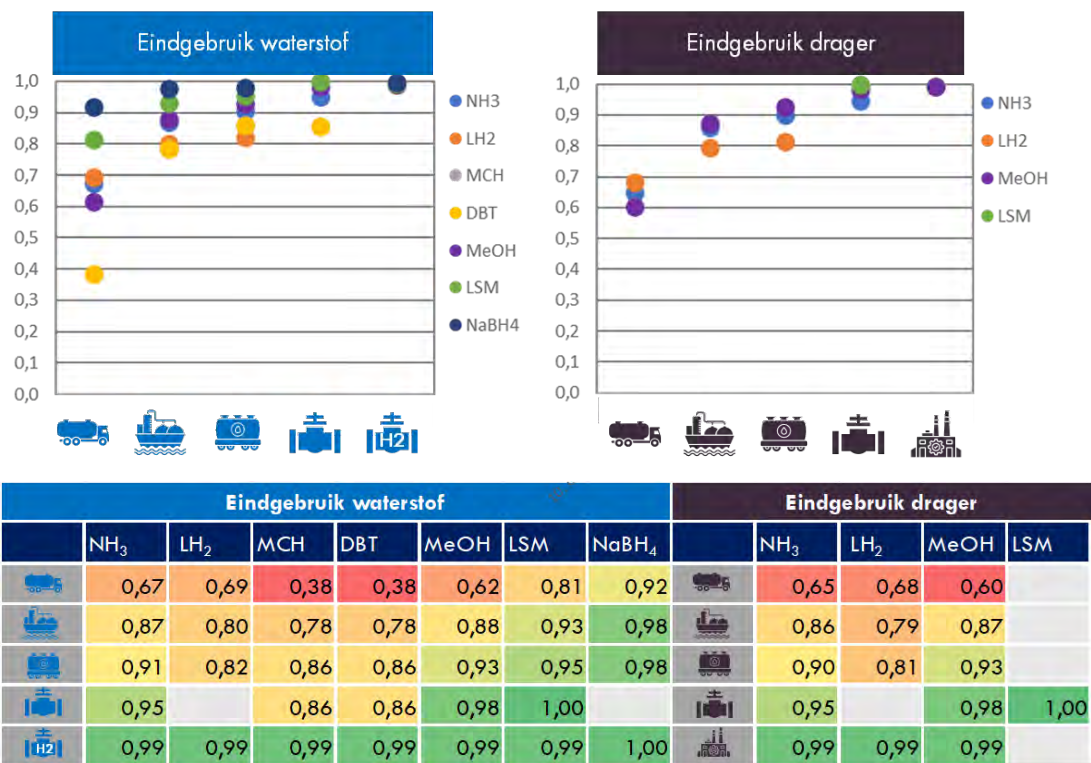
Resultaten varianten

Importhaven

Bij eindgebruik in de importhaven vervalt het binnenlands transport. Hierdoor is het publieke belang Toegankelijk niet onderscheidend. Het levert voor alle ketens dezelfde score op, namelijk 1. Alle bedrijven hebben toegang tot de importketen en hebben dezelfde kosten als in de importhaven.

Doorvoer en export

Bij eindgebruik in Duitsland of België is de indicator nabijheid in overleg met de opdrachtgever als niet relevant beschouwd. Het gaat immers om nabijheid voor in Nederland gevestigde bedrijven, en in deze variant spelen zij geen rol. In de modellering hebben we alle ketens daarom hiervoor de score 1 gegeven. Het totaalresultaat verbetert daardoor voor de ketens waarbij de score op nabijheid lager dan 100% was.



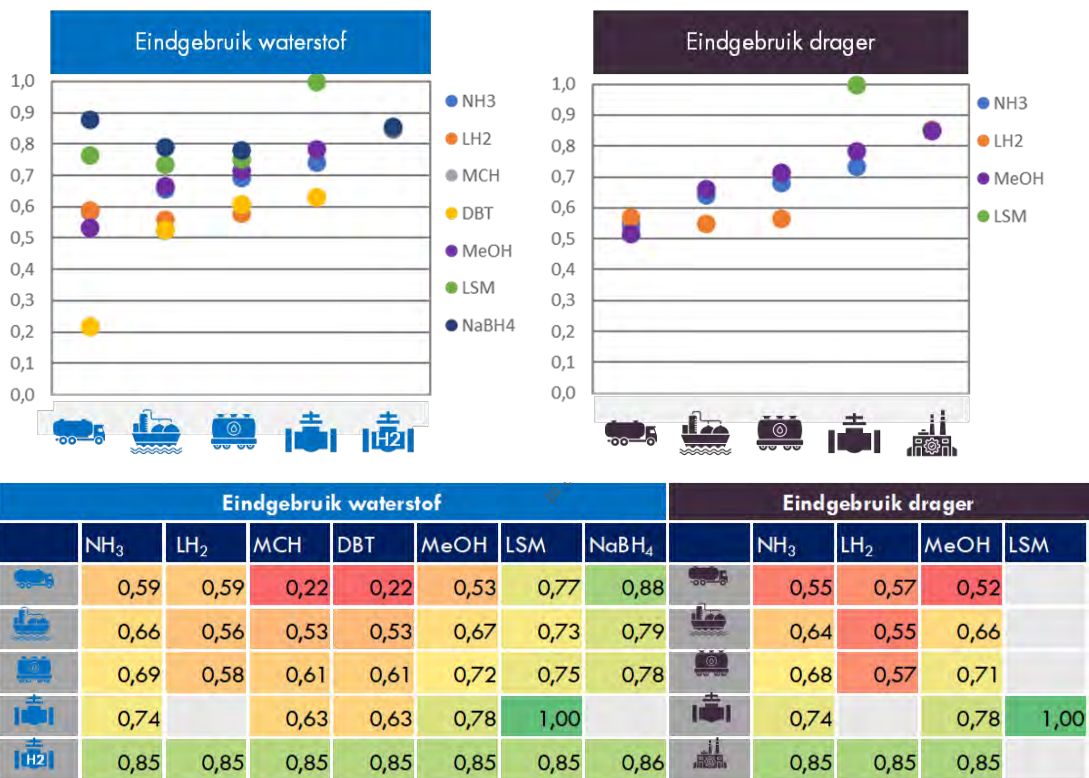
Figuur 55: Scores Toegankelijk ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Zichtjaar 2050

In 2050 vallen de scores op Toegankelijk voor bijna alle ketens iets lager uit dan in de basissituatie 2030. Dit komt door de lagere scores op de indicator vergelijkbare kosten. De scores op de indicator nabijheid blijven voor alle ketens gelijk aan de basissituatie

De scores op de indicator vergelijkbaar kostenniveau worden lager doordat de kosten voor binnenlands transport niet verbeteren ten opzichte van de basissituatie, maar de importkosten wel lager uitvallen. De meerkosten voor het achterland (de kosten voor binnenlands transport en decentrale opslag) ten opzichte van een eindgebruiker in de importhaven vormen daarom een grotere opslag op de kosten voor een eindgebruiker in de importhaven.

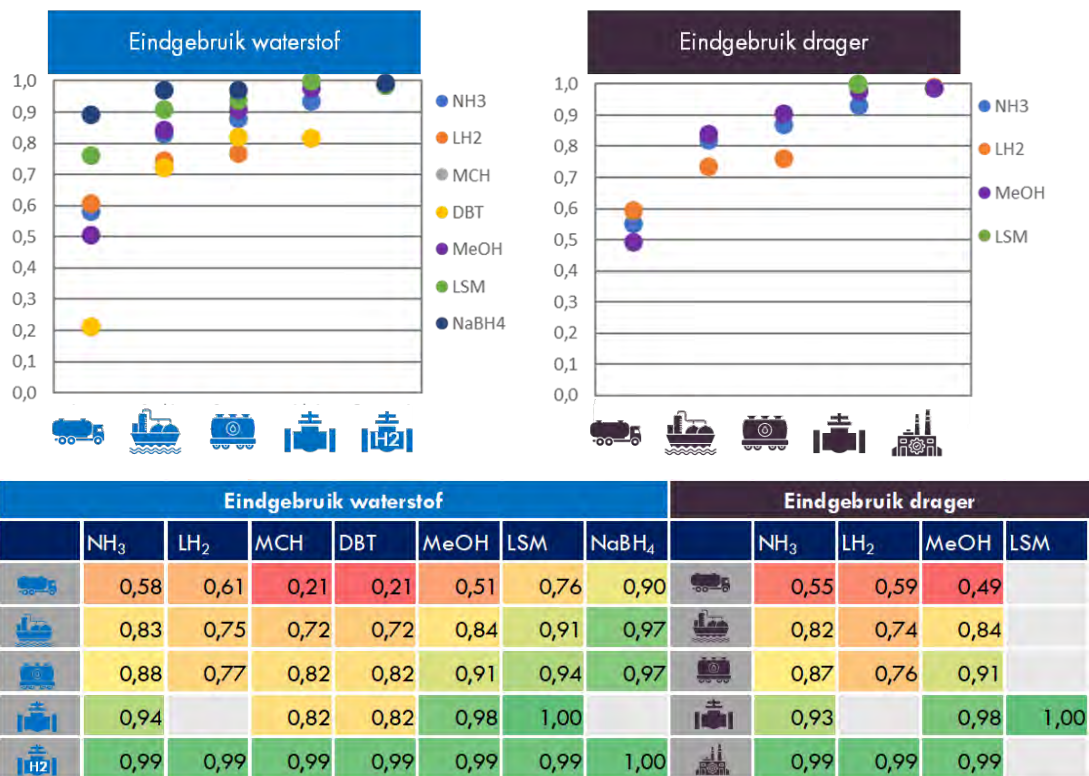
Alleen voor het transport via het waterstofnet zijn de meerkosten voor het achterland zo klein dat dit niet leidt tot een zichtbaar lagere score.



Figuur 56: Scores Toegankelijk ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Toegankelijk kostenniveau (gelijk speelveld)

De hoogste scores zien we voor ketens die een buisleiding gebruiken voor transport in Nederland. De laagste scores gelden voor ketens met hogere meerkosten voor het transport. De lagere score voor de LOHC's is het resultaat van hogere kosten voor transport en decentrale opslag. Methanol en ammoniak krijgen een wat lagere score doordat de importkosten lager liggen en de kosten voor transport en decentrale opslag in verhouding een grotere toename van de kosten veroorzaken. Het tegenovergestelde is het geval bij natriumboorhydride. De toename van de importkosten door het transport in Nederland is kleiner door de hoge importkosten.



Figuur 57: Scores toegankelijk kostenniveau van ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

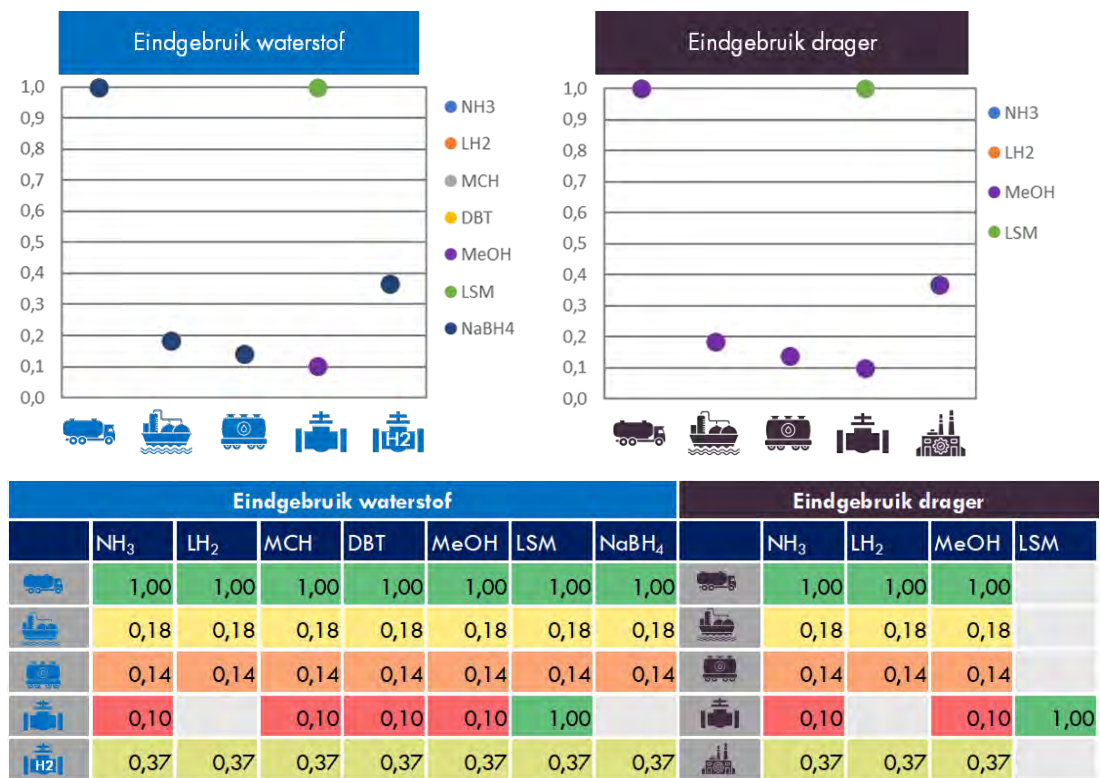
Nabijheid

De scores voor deze indicator hangen alleen af van de modaliteit. Per type leveringsketen zijn alle ketens daarom op dezelfde hoogte in de grafieken afgebeeld, behalve voor het transport per buisleiding waar de Delta-Rijn-Corridor en het aardgasnet in hetzelfde type keten zijn ingedeeld. Het aardgasnet krijgt hier een hogere waarde dan de overige buisleidingen voor ammoniak, de LOHC's en methanol.

De hoogste scores (1 = 100%) hebben de leveringsketens waarbij het binnenlands transport over de weg en via het aardgasnet plaatsvindt. De reden is dat ieder bedrijventerrein in Nederland directe toegang hiertoe heeft.

De laagste score vinden we voor een specifieke buisleiding zoals overwogen wordt voor ammoniak in de Delta-Rijn-Corridor of een soortgelijke buisleiding voor methanol of LOHC's. Een klein deel van de bedrijventerreinen in Nederland zal daar direct op aangesloten kunnen worden. Dit aandeel hebben we ingeschat op 10 procent, zie hiervoor Bijlage C. Een toegang voor 10 procent van de bedrijventerreinen leidt tot een score van 0,1.

Spoor, vervoer over water en de nabijheid van het landelijke waterstofnet krijgen tussenliggende scores, respectievelijk 0,14 (=14 procent), 0,18 (=18 procent) en 0,37 (=37 procent).



Figuur 58: Scores nabijheid van ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

6.10 SCORES OP PUBLIEKE BELANG RUIMTE

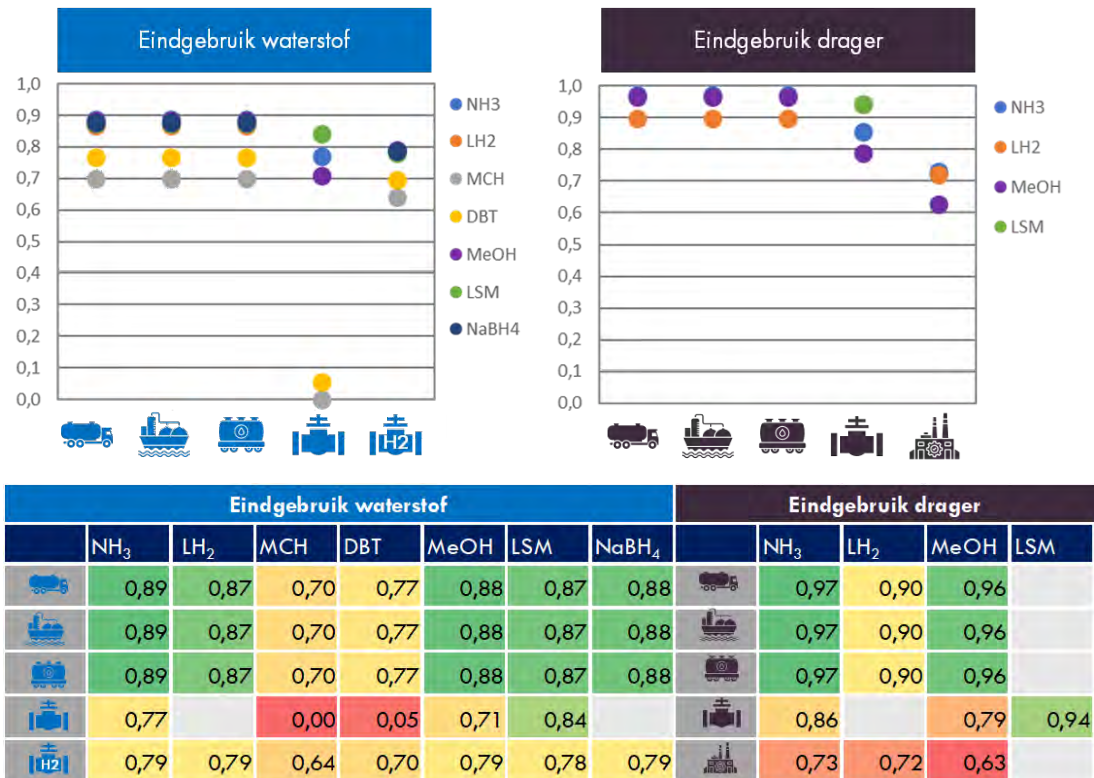
Bij het publieke belang Ruimte beoordelen we de fysieke ruimte die een keten in beslag neemt. Een keten die geen additioneel ruimtebeslag vraagt, krijgt een score van 1. Een score van 0 krijgt een keten die in deze analyse het grootste ruimtebeslag vraagt. In deze analyse is dat een LOHC-keten (MCH). Het ingeschatte ruimtebeslag (333 m² per kton waterstofequivalent) voor opslag en conversie-installaties is hoog door de dubbele opslag. Bepalend blijkt de inschatting voor het ruimtegebruik voor de buisleidingen. Dit komt uit op een strook van 61 meter breed en 200 km lang voor de veronderstelde volumes in 2030 ofwel ruim 7700 vierkante meter per kton.

Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

De alternatieven met de hoogste scores zijn alternatieven waarvoor geen grote hoeveelheden nieuwe buisleiding nodig zijn en een klein ruimtebeslag voor opslagvoorzieningen. De laagste score krijgen de LOHC's die per buisleiding worden getransporteerd. Er is namelijk een aanzienlijk aantal buisleidingen nodig om het volume te kunnen transporteren, en ook een retourbuisleiding. Bovendien vraagt de opslag meer ruimte. Voor methanol en ammoniak betekenen de nieuwe buisleidingen eveneens een iets lagere score.

Er zijn geen grote verschillen tussen de ketens door het ruimtegebruik voor conversie doordat we, bij gebrek aan data hierover, hebben aangenomen dat het ruimtegebruik voor conversie per waterstofdrager gelijk is (per waterstofequivalent gelijk ruimtegebruik). Alleen voor het verdampen van LSM en vloeibare waterstof veronderstellen we dat per kton waterstofequivalent minder ruimte nodig is. Voor de overige ketens ontstaat alleen verschil in ruimtegebruik voor conversie door de volumeverschillen (uitgedrukt in waterstofequivalent). De benodigde ruimte voor opslag

is na de LOHC's het grootst voor vloeibare waterstof; hierdoor krijgt vloeibare waterstof in de grafiek rechts een iets lagere score. Links wordt het nadeel gecompenseerd door het lagere ruimtegebruik voor conversie, waardoor vloeibare waterstof bij de ketens met de hoogste scores hoort.

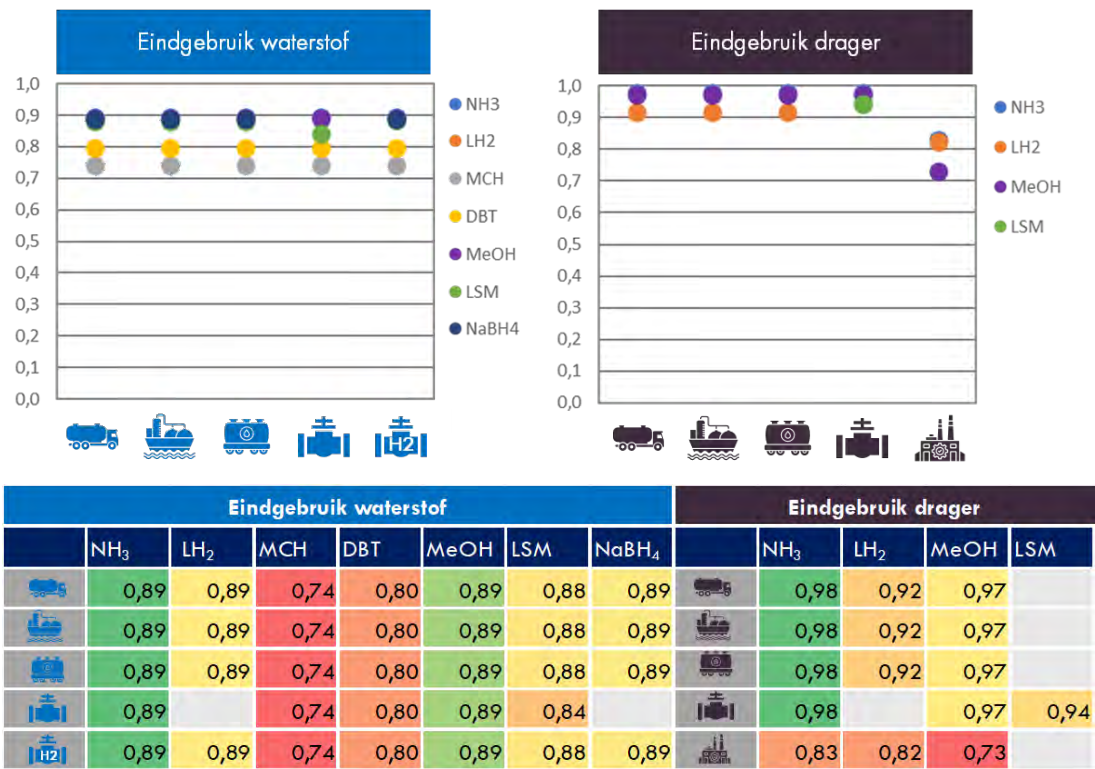


Figuur 59: Scores Ruimte ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Resultaten varianten

Importhaven

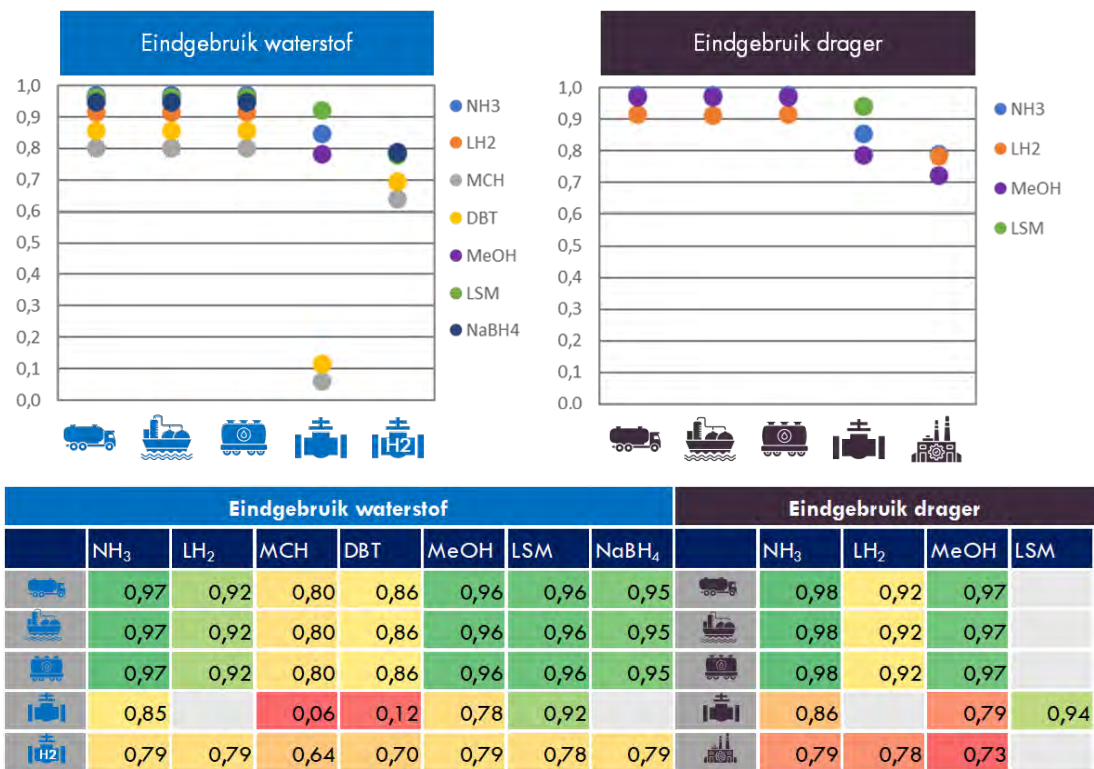
Bij eindgebruik in de importhaven neemt het ruimtebeslag af doordat er geen nieuwe buisleidingen nodig zijn voor binnenlands transport. Ook de decentrale opslag vervalt. Veel ketens krijgen nu min of meer dezelfde score, die vooral varieert met of het eindgebruik van waterstof betreft of van de drager, en hoeveel opslagruimte er nodig is. Bij eindgebruik van de drager heeft vloeibare waterstof een nadeel door het grotere ruimtegebruik voor opslag en LSM in mindere mate. Bij eindgebruik van waterstof hebben LSM en de LOHC's een nadeel door het grotere ruimtegebruik voor opslag.



Figuur 60: Scores Ruimte ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Doorvoer en export

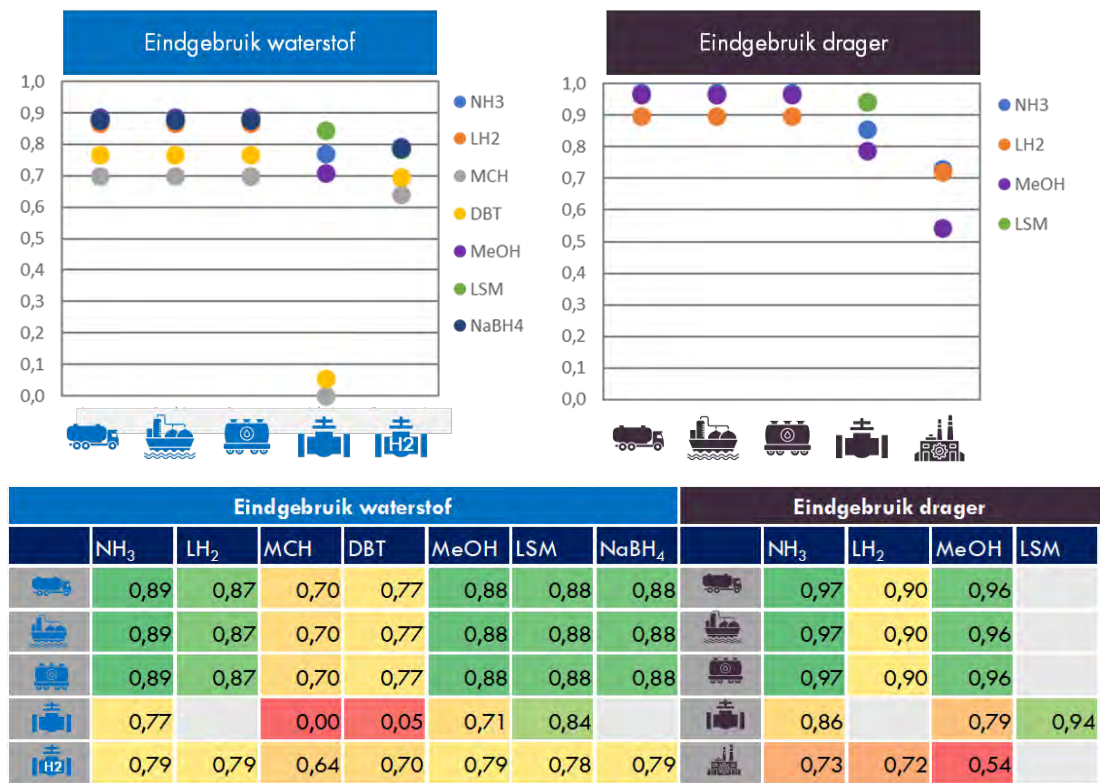
Bij eindgebruik in Duitsland of België vervalt het ruimtegebruik voor decentrale opslag en conversie. Hierdoor verbetert de score van de ketens met decentrale conversie iets ten opzichte van het eindgebruik in Nederland. De grote impact van het ruimtegebruik van de buisleidingen blijft bestaan.



Figuur 61: Scores Ruimte ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Zichtjaar 2050

In 2050 is het ruimtebeslag voor de verschillende ketens per kilogram waterstofequivalent soms iets veranderd ten opzichte van de basissituatie 2030. Voor waterstofdragers die deels gebruikt worden als brandstof voor conversie zijn de volumes en daarmee het ruimtebeslag iets kleiner doordat de efficiëntie van conversie verbetert (LSM, methanol en ammoniak bij eindgebruik van waterstofgas). Ondanks de efficiëntieverbetering van conversie en synthese is het benodigde volume hoger voor leveringsketens met decentrale synthese van methanol en LSM in Nederland omdat waterstof wordt gebruikt als energiebron voor DAC bij synthese, en om deze waterstof te maken moet extra methanol of LSM worden ingevoerd.



Figuur 62: Scores Ruimte ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

6.11 SCORES OP PUBLIEKE BELANG MILIEU

Bij het publieke belang Milieu worden verschillende elementen gecombineerd. Een theoretische keten die geen enkele milieuemissie veroorzaakt (methaan, NO_x, fijnstof, ammoniak) en geen geluidsoverlast, habitatschade of milieuschade bij calamiteiten, krijgt een score van 1.

Een score van 0 krijgt een keten die in deze analyse de grootste milieubelasting oplevert. Deze milieubelasting hebben we via bekende schaduwkosten gemonetariseerd. De verschillende emissies zijn daardoor onder één noemer gebracht. De laagste score komt overeen met milieukosten van ongeveer 50 eurocent per kilogram waterstofequivalent.

Resultaten basissituatie (2030, eindgebruik in het binnenland)

Figuur 63 laat de resultaten zien voor het publieke belang Milieu. Het meest bepalend blijkt de lekkage van ammoniak bij decentrale synthese met waterstof uit het landelijke net in Nederland. Die lekkage bij de synthese van ammoniak bedraagt zo'n 1,63 gram per kilogram ammoniak (JRC). Bij schaduwkosten van bijna 50 euro per kilogram ammoniak levert dit een milieubelasting van ruim 45 ct. per kilogram waterstofequivalent op voor de ammoniakketen met conversie en decentrale synthese in Nederland (helemaal rechts in Figuur). Hier bovenop komen nog de milieukosten van de beperkte uitstoot van NO_x; ongeveer 2 ct. per kilogram waterstofequivalent voor conversies (bij aangenomen toepassing van DeNO_x-installaties) en 3 ct. voor de NO_x-uitstoot van de gebruikte elektriciteit in Nederland.

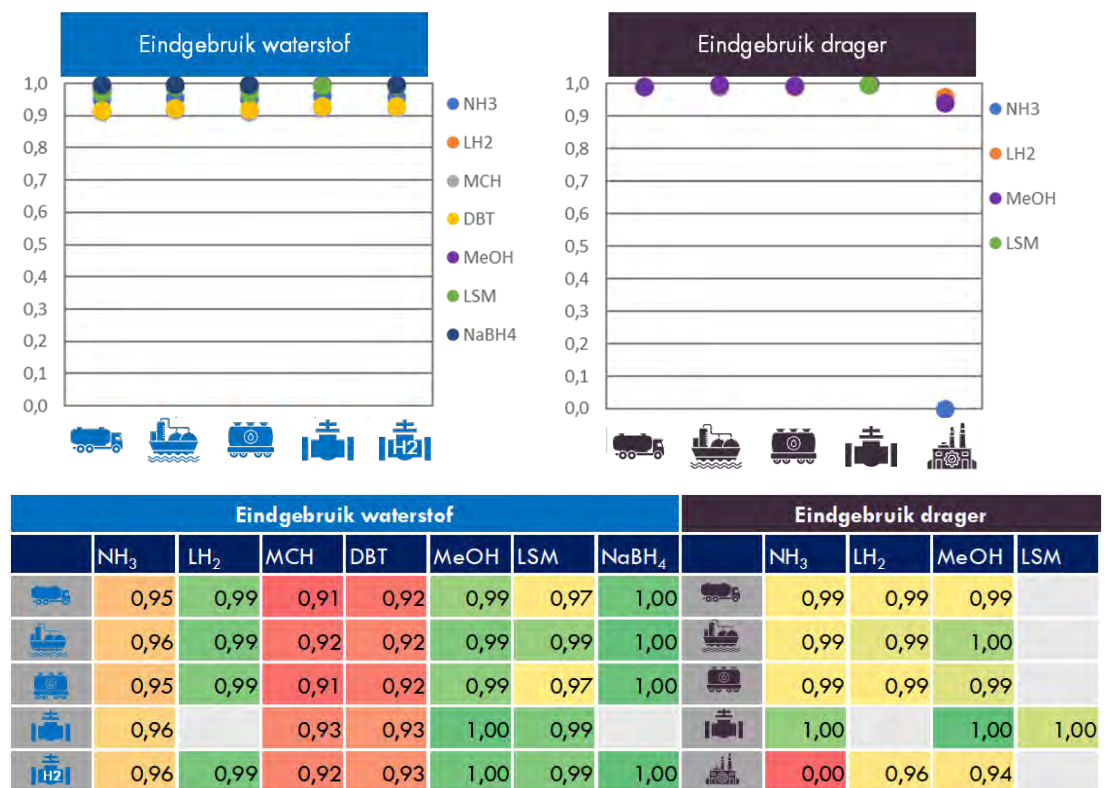
Hierbij moet worden opgemerkt dat deze emissie nu ook optreedt bij de bestaande productie van ammoniak uit aardgas voor kunstmestproductie. Als we uitgaan van gelijke omvang van kunst-

mestproductie treedt in dit geval dus geen verslechtering van uitstoot op als de bestaande productie wordt vervangen door ammoniaksynthese met waterstof uit het transportnet. Er is wel sprake van verslechtering als ammoniak wordt gebruikt voor elektriciteitsopwekking.

De NO_x-emissies bij transport zijn verwaarloosbaar, maar de NO_x-emissies van de gebruikte elektriciteit in Nederland veroorzaken wel onderscheidende milieukosten. Doordat we voor LOHC-dehydrogenering uitgaan van elektrische verwarming in plaats van waterstofverbranding en het elektriciteitsgebruik hiervoor in Nederland relatief hoog is, krijgen de LOHC's een iets lagere score.

Verschillen tussen de ketens als gevolg van de verschillen in geluidsproductie, fijnstof, habitat-schade of risico's van calamiteiten vallen in het niet bij de ammoniakemissies bij synthese en de NO_x-emissies bij conversie naar waterstofgas. Deze overige emissies bedragen maximaal 1 ct. per kilogram waterstofequivalent.

Voor de meeste andere waterstofdragers hebben we geen schadelijke milieu-emissies verondersteld. Alleen de LSM-ketens leveren een bijdrage aan smogvorming en milieubelasting vanwege methaanlekages (maximaal 1 ct. per kilogram waterstofequivalent). Broeikasgasemissies zijn onderdeel van het publieke belang Duurzaam.

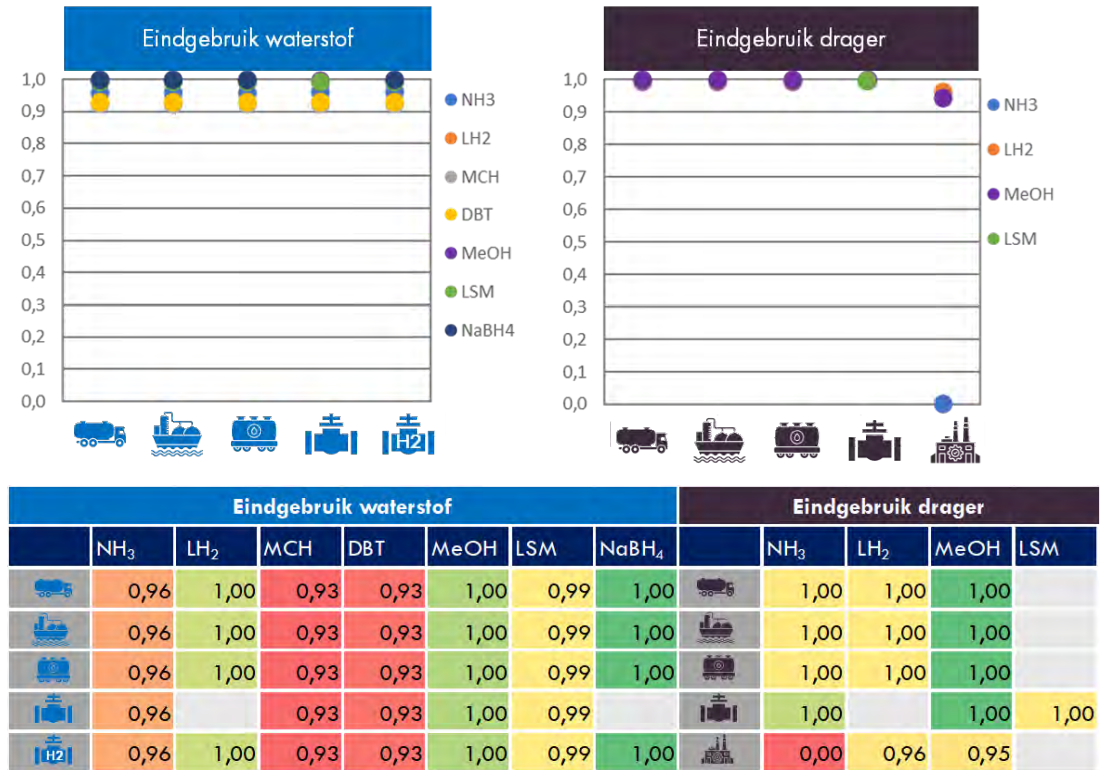


Figuur 63: Scores Milieu (natuur en mens) ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Resultaten varianten

Importhaven

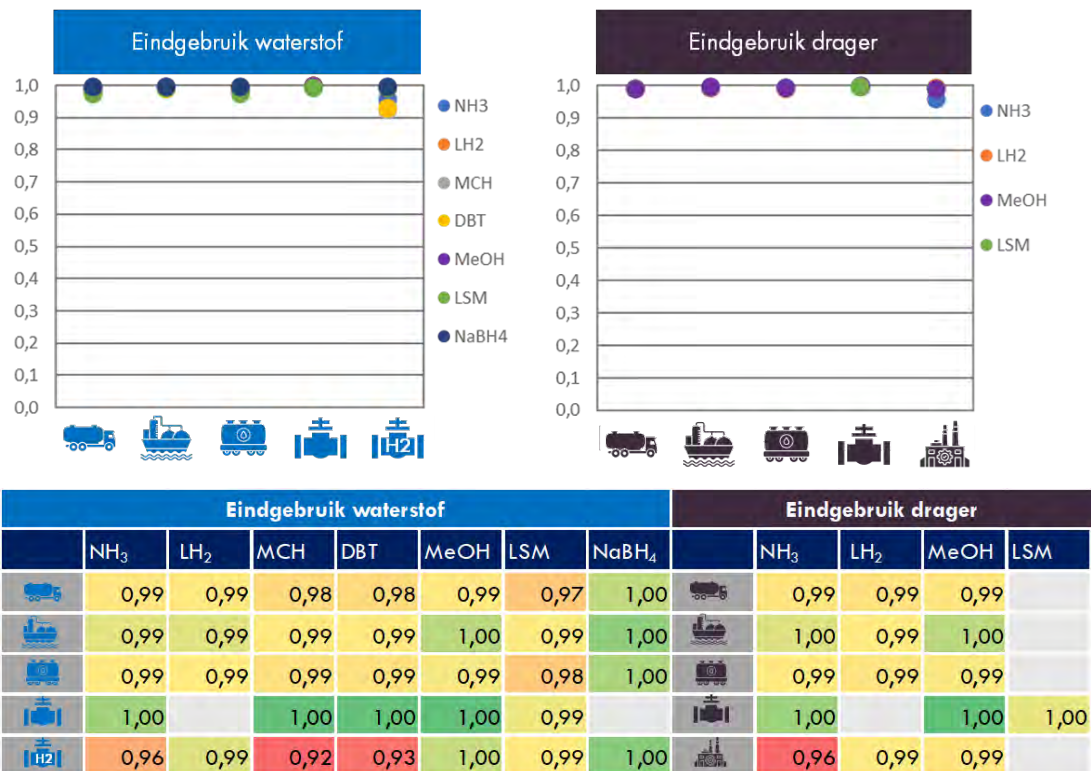
Bij eindgebruik in de importhaven verbetert de score op Milieu nauwelijks ten opzichte van de basissituatie. Dit komt doordat de milieubelasting van het transport zeer klein is ten opzichte van de milieuemissies bij conversie en synthese.



Figuur 64: Scores Milieu ketens gebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Doorvoer en export

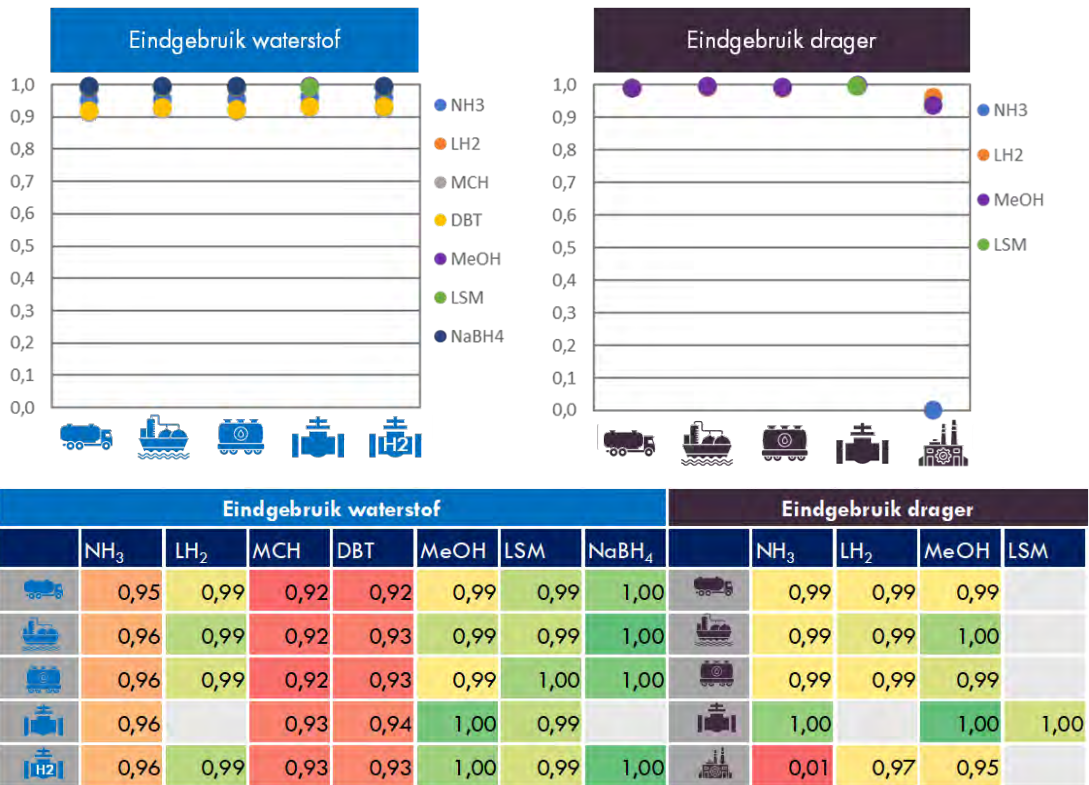
Bij eindgebruik in Duitsland of België vervallen milieuemissies verbonden aan de conversie en opslag bij de eindgebruiker. De score van ketens met decentrale conversie (de eerste vier kolommen in de linkergrafiek en de laatste in de rechtergrafiek) verbeteren ten opzichte van het eindgebruik in Nederland. Met name de ammoniakketen met zowel conversie als decentrale synthese krijgt een hogere score. Dit komt door het wegvallen van het effect van ammoniaklekkage bij synthese en het wegvallen van de NO_x-uitstoot bij de synthese. Deze emissies komen terecht in het buitenland.



Figuur 65: Scores Milieu ketens doorvoer en export 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Zichtjaar 2050

In 2050 veranderen de scores op Milieu nauwelijks (een fractie beter) ten opzichte van de basis-situatie 2030, terwijl de uitstoot van NO_x en van fijnstof bij transport en elektriciteitsgebruik vervallen. De reden dat deze verbeteringen nauwelijks zichtbaar zijn is dat de milieu-impact van de ammoniaklekkage in de leveringsketens en van de NO_x-uitstoot bij ammoniaksynthese en in mindere mate bij ammoniakconversie gelijk blijft. Vergeleken met de milieu-impact hiervan zijn de overige verbeteringen klein.



Figuur 66: Scores Milieu ketens binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Dit hoofdstuk beschrijft de eindscores in vier situaties; eerst de basissituatie voor 2030 en vervolgens drie varianten hierop. Het gaat tweemaal om een andere locatie en één keer om een ander zichtjaar.

- *Basissituatie*: Dit betreft de situatie voor eindgebruikersgroepen in het binnenland, op 200 km afstand van de importhaven (de lengte van het representatieve tracé).
- *Importhaven*: De eerste variant op de basissituatie met een andere locatie is de situatie voor eindgebruikers die de waterstof(drager) in de importhaven gebruiken. In dit geval vervalt het binnenlands transport en de decentrale opslag.
- *Doorvoer en export*: De tweede variant is de situatie waarin de waterstof(drager) wordt doorgevoerd door Nederland voor gebruik van de waterstof(drager) in Duitsland of België. In dit geval vervallen de ketenonderdelen decentrale opslag, conversie en synthese.
- *2050*: De laatste variant gaat om een doorkijk naar 2050. Voor een deel van de publieke belangen zullen de scores veranderen door de veranderende omstandigheden ten opzichte van 2030.

Tot slot zijn in dit hoofdstuk de resultaten voor enkele gevoeligheidsanalyses opgenomen.

7.1 EINDSCORES BASISITUATIE

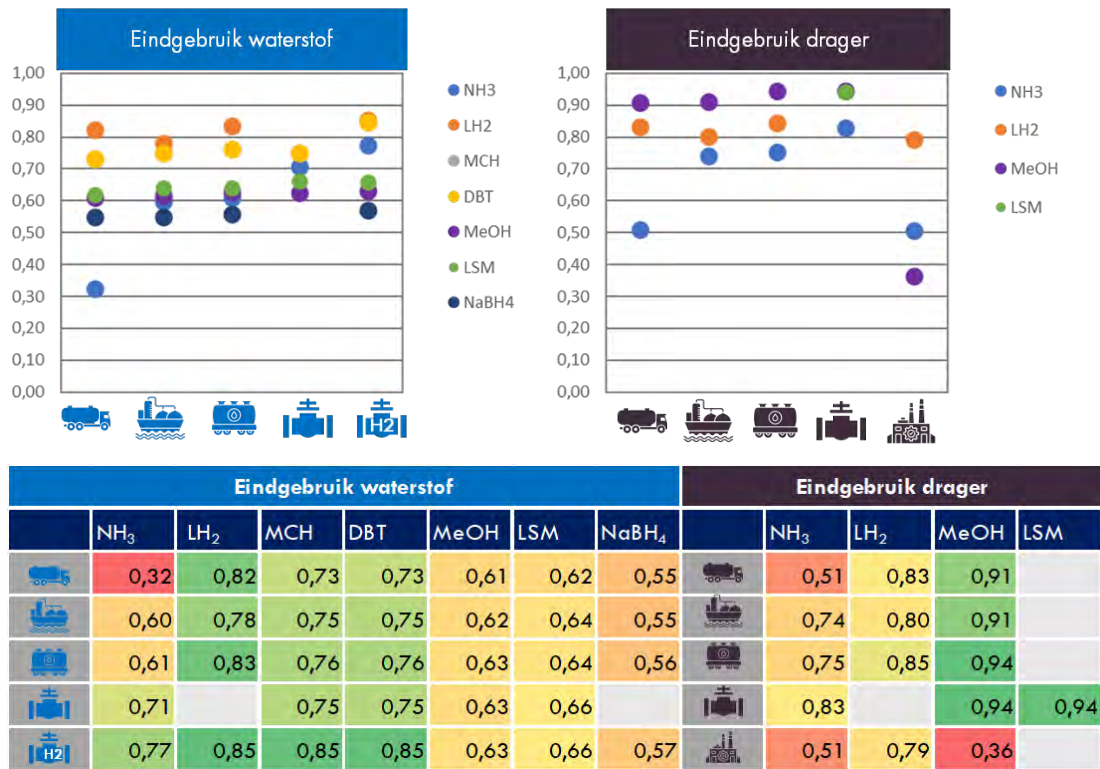
De resultaten voor de publieke belangen (Hoofdstuk 6) hebben we gecombineerd op basis van de weegfactoren uit de Delphi-sessie (Hoofdstuk 5). Het resultaat staat in Figuur 67, links voor de ketens met waterstof als eindgebruik, rechts voor de ketens met een waterstofdrager als eindgebruik.

Eindgebruik waterstof (linkergrafiek)

De alternatieven met de hoogste scores voor eindgebruik als waterstof (top 5) zijn:

1. Vloeibare waterstof na verdamping via waterstofnet
2. MCH na dehydrogenering via waterstofnet
3. DBT na dehydrogenering via waterstofnet
4. Vloeibare waterstof via spoor en decentrale verdamping
5. Vloeibare waterstof via weg en decentrale verdamping

De verschillen tussen de hoogste scores zijn klein. Over het algemeen zien we dat de ketens met vloeibare waterstof en de twee LOHC's de kopgroep vormen die wordt gevolgd door de overige vier dragers, meestal in de volgorde eerst methanol en LSM, daarna ammoniak en dan natriumboorhydride. Bij ketens met buisleidingvervoer in combinatie met decentrale conversie zitten de dragers zeer dicht bij elkaar.



Figuur 67: Eindscores ketens binnenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Vloeibare waterstof komt goed uit de vergelijking door een hoge score op Duurzaam vanwege de lage broeikasgasuitstoot en het lage energieverlies, een hoge score op Milieu, op Adaptief en op Rechtvaardig. Deze scores compenseren lagere scores op de publieke belangen Betaalbaar, Economisch Krachtig en Betrouwbaar. Het lage energieverlies bij conversie van vloeibare waterstof zorgt voor een laag energieverlies over de gehele keten ondanks het extra energieverlies door *boil-off* bij opslag en transport. Van de ketens met vloeibare waterstof krijgt transport via het waterstofnet de beste beoordeling.

De LOHC's komen ook goed uit de beoordeling, met name met levering via het waterstofnet. De LOHC's hebben een gunstigere score op Betaalbaar, Economisch Krachtig en Betrouwbaar dan vloeibare waterstof. Ze hebben vanwege het grote te transporteren, op te slaan en te converteren volume een lagere score op Ruimte, Toegankelijk (door meerkosten van transport) en Adaptief (vanwege grote investeringen in opslag en conversie-installaties). Figuur 67 laat zien dat de verschillen tussen DBT en MCH erg klein zijn. Dit wordt o.a. veroorzaakt doordat het voor de modellering nodig was een hybride dataset samen te stellen: als voor één van beide dragers voor bepaalde aspecten geen gegevens beschikbaar waren, hebben we data van de andere LOHC genomen (ook in de gebruikte bronnen is dit soms gebeurd). Hierdoor zijn de onderlinge verschillen mogelijk groter dan in dit rapport inzichtelijk kon worden gemaakt. In de conclusies over de resultaten nemen we de twee LOHC's daarom als één drager mee.

LSM en methanol hebben een lagere score dan vloeibare waterstof en de LOHC's door de lagere score op Duurzaam, met name door de indicator broeikasgassenuitstoot (fossiel CO₂ dat wordt gebruikt voor de synthese in het exportland komt in Nederland weer vrij), en de impact hiervan op Rechtvaardigheid.

LSM behaalt in 2030 een hoge score op het publieke belang Betrouwbaar en op Toegankelijk voor wat betreft de aardgasleiding. Lagere scores heeft LSM ten opzichte van de andere ketens op de belangen Betaalbaar en Economisch Krachtig, Duurzaam, Adaptief en Veilig. Methanol zit op alle publieke belangen behalve Duurzaam (broeikasgas maar ook energieverlies) bij de dragers met de hoogste scores. De stof is Betaalbaar en heeft een hoge score op de publieke belangen Veilig, Milieu, Betrouwbaar en Adaptief. Van LSM en methanol hebben de ketens met conversie in de importhaven en transport per buisleiding de hoogste scores. De reden is dat het waterstofnet en transport per buisleiding gunstiger beoordeeld worden op de publieke belangen Veilig, Betaalbaar, Milieu, Duurzaam en Rechtvaardig dan andere modaliteiten (weg, spoor, binnenvaart).

Ammoniak heeft een lagere eindscore vanwege de lage score op de publieke belangen Veilig, Milieu en Rechtvaardig. Veilig en Milieu worden zwaar gewogen, de hoge score op het belang Betaalbaar kan dit niet compenseren. De keten met ammoniakvervoer over de weg heeft de laagste score van alle ketens. Daarentegen horen de ammoniakketens tot de ketens met de hoogste scores – kort na vloeibare waterstof en de LOHC's – als het gaat om vervoer via buisleiding en via het waterstofnet.

Natriumboorhydride komt bij de gebruikte aannames meestal met de laagste score uit de analyse (alleen de keten met ammoniakvervoer over de weg heeft een lagere score). Dit komt door de lage score op de publieke belangen Betaalbaar, Betrouwbaar, en Duurzaam (materiaalgebruik en energieverlies). Hoge scores op Veilig en Rechtvaardig compenseren dit niet genoeg.

Eindgebruik van waterstofdrager (rechtergrafiek)

De alternatieven met de hoogste scores voor eindgebruik als drager (top 6) zijn:

1. Methanol via buisleiding
2. Methanol via spoor
3. Methaangas uit LSM via aardgasnet
4. Methanol via binnenvaart
5. Methanol via weg
6. Vloeibare waterstof via spoor.

Methanol presteert zeer goed bij direct eindgebruik omdat deze drager op alle publieke belangen bij de dragers met hoogste scores zit. Direct eindgebruik van methanol via buisleiding of transport per spoor komt hier als beste naar voren. Conversie naar waterstof in de importhaven en een decentrale synthese van methanol met waterstof uit het landelijke net krijgt een lagere score vanwege het extra energieverlies en de meerkosten van conversie én synthese in de leveringsketen.

Vloeibare waterstof komt ook goed uit de analyse. De lagere score ten opzichte van methanol is vooral het resultaat van een lagere score op Betaalbaar door met name de hogere importkosten, Economisch Krachtig eveneens door de hogere importkosten, en Betrouwbaar door de lagere TRL voor grootschalige conversies, opslag, zeetransport en binnenvaart.

Synthetisch methaan komt in deze vergelijking alleen voor na verdamping in de importhaven en transport via het aardgasnet. Per waterstofequivalent neemt het de derde plek in na methanol via buis of spoor. Deze positie is het resultaat van een hoge score op de publieke belangen Betrouwbaar (TRL9 voor alle ketenonderdelen) en Toegankelijk. Alle potentiële eindgebruikers hebben toegang tot de keten (aansluiting op het aardgasnet) en transport via het aardgasnet voegt weinig kosten toe voor het achterland aan de prijs in een importhaven.

Ammoniak heeft ook hier, net als bij de ketens voor eindgebruik als waterstof, een lagere eindscore vanwege de lagere scores op de publieke belangen Veilig door het risico op ontstaan van een gifwolk, Milieu door met name ammoniaklekkages en Rechtvaardig door de hoge externe kosten ten opzichte van de veronderstelde marktprijs. De hoge score op het belang Betaalbaar dankzij de lage importkosten helpt niet aan een overall gunstig resultaat. De uitzondering op voorgaande conclusie is de keten met ammoniakvervoer per buisleiding, die een vergelijkbare score krijgt als de ketens met vloeibare waterstof voor direct eindgebruik. Het nadeel ten opzichte van vloeibare waterstof op het publieke belang Veilig is namelijk bij buistransport en zonder conversie naar waterstofgas een stuk lager vanwege het directe gebruik van de ammoniak. De hogere score op Betaalbaar zorgt daarom voor een vergelijkbare score met direct gebruik van vloeibare waterstof.

7.2 EINDScores PER EINDGEBRUIKER 2030

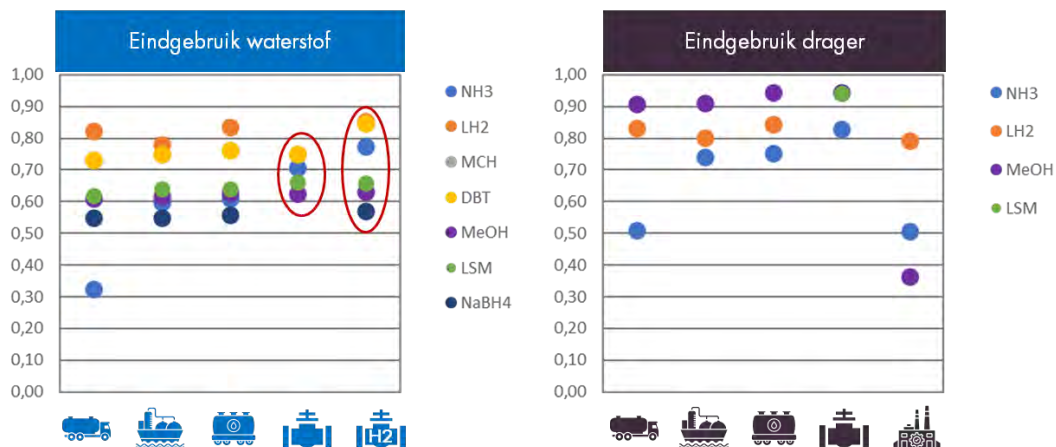
In Tabel 3 (Hoofdstuk 3) zijn de 48 onderzochte leveringsketens gepresenteerd. Niet elke keten is relevant voor elk type eindgebruiker. We onderscheiden zes typen eindgebruikers. In deze paragraaf bespreken we per type eindgebruiker de ketens met de hoogste scores. De hiervoor gepresenteerde scores zijn niet afhankelijk van het type eindgebruiker, maar wat verschilt, is uit welke ketens de eindgebruiker een keuze kan maken. De relevante ketens worden besproken per type eindgebruiker. Hiervoor worden de voorgaande afbeeldingen herhaald en wordt met omlijning aangegeven welke bolletjes in de vergelijking worden meegenomen.

Industrieclusters

Bedrijven in de vijf industrieclusters met een waterstofvraag zullen kunnen aansluiten op het landelijke waterstofnet. In Figuur 68 staat deze optie omcirkeld in kolom 5 van de linkergrafiek. Dit betreft de eindscores voor de basissituatie in 2030. Uit oogpunt van gewogen publieke belangen is de voorkeursvolgorde indien de waterstof uit het waterstofnet komt: vloeibare waterstof, de LOHC's, ammoniak, LSM, methanol en natriumboorhydride.

Voor een industriecluster in het binnenland dat langs een buisleiding voor waterstofdragers ligt is decentrale conversie naar waterstof ook een reële optie (kolom 4 in linkergrafiek, omcirkeld). Dit leidt in het geval van LSM (via het aardgasnet vervoerd naar een *steam reformer* in het binnenland) tot een miniem voordeel ten opzichte van conversie van LSM in de importhaven en transport via het waterstofnet. De reden hiervoor is een hogere score op Toegankelijk dan bij transport via het waterstofnet vanwege de lage extra kosten voor gebruik van het aardgasnet en het feit dat alle eindgebruikers al een aansluiting op het aardgasnet hebben. Voor ammoniak en de LOHC's is de score voor decentrale conversie na buisleidingvervoer iets lager dan de leveringsketens via het waterstofnet, voor methanol bijna gelijk.

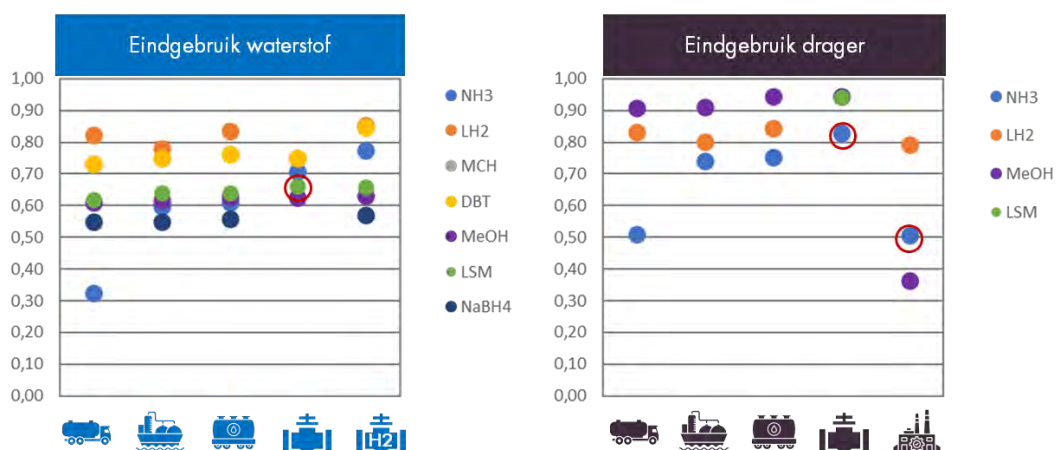
Behalve eindgebruik van waterstof kan in de industrieclusters ook vraag zijn naar direct eindgebruik van specifieke dragers, als grondstof of als brandstof om aan specifieke proceseisen te voldoen. Als grondstof is de vergelijking met alle andere dragers niet relevant omdat de rol van de drager in het productieproces doorslaggevend is voor de keuze. Als het gaat om gebruik als brandstof hebben gebruikers wel enige flexibiliteit om te kiezen tussen methaan, ammoniak en eventueel zelfs methanol.



Figuur 68: Eindscores 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Kunstmestindustrie

De Nederlandse kunstmestfabrieken kunnen in beginsel kiezen uit drie alternatieven: import en directe aanvoer van ammoniak, decentrale synthese van ammoniak met waterstof uit het waterstofnet, of ammoniaksynthese met waterstof uit *steam reforming* van methaangas uit LSM dat zij via het aardgasnet ontvangen. In Figuur 69 zijn de eerste twee alternatieven omcirkeld in kolommen 9 en 10, rechts. Dit betreft de eindscores voor de basissituatie 2030. Hieruit blijkt dat levering van ammoniak via een buisleiding (zonder conversie voordat de grondstof de fabriek bereikt) een hogere score heeft op de gewogen publieke belangen dan synthese van ammoniak met waterstof uit het waterstofnet (met zowel conversie als decentrale synthese in de leveringsketen). De conversie en synthese verhogen de kosten, het energieverlies, de emissies, het ruimtegebruik en de omgevingsrisico's van de betreffende keten.



Figuur 69: Eindscores alternatieven kunstmestindustrie 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

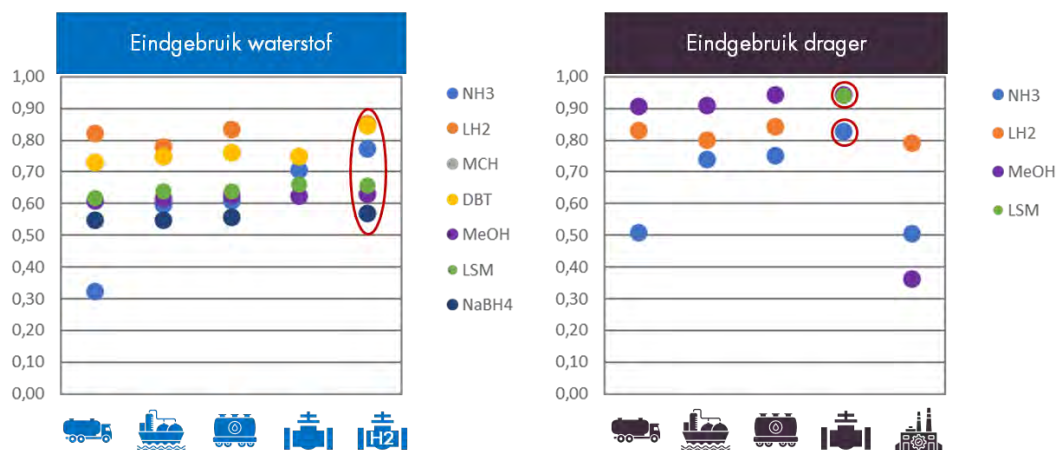
De optie ammoniaksynthese met waterstof uit *steam reforming* van LSM is niet aangegeven in Figuur 69. In de vierde kolom in de linkergrafiek staat wel de keten voor waterstof afkomstig van *steam reforming* van methaangas uit LSM via het aardgasnet, maar hier moet nog het effect van

de ammoniaksynthese bij worden opgeteld. Ook zonder deze decentrale synthese heeft waterstofgas uit methaan al een lagere score dan de levering van ammoniak via schip, spoor of buisleiding (rechtergrafiek), met een extra synthesestap komt de score nog lager uit.

Elektriciteitscentrale

Om CO₂-vrij regelbaar vermogen op te bouwen beschouwen we drie opties: gebruik van synthetisch methaan in de centrales, gebruik van waterstof in aangepaste centrales, en gebruik van ammoniak in bestaande of aangepaste centrales. In Figuur 70 zijn deze alternatieven omcirkeld in kolommen 5 en 9. Dit betreft de eindscores voor basissituatie 2030.

De hoogste score heeft direct gebruik van methaangas uit LSM via het aardgasnet, gevolgd door gebruik van waterstof via het waterstofnet, mits deze waterstof uit centrale conversie van vloeibare waterstof of de LOHC's komt. Net als is beschreven bij industrieclusters is de voorkeursvolgorde voor de gebruikte waterstof vanuit oogpunt van gewogen publiek belangen vloeibare waterstof, de LOHC's, ammoniak (mits per buis of waterstofnet getransporteerd), LSM, methanol en natriumboorhydride. Direct gebruik van ammoniak na buisleidingvervoer heeft een hogere score dan gebruik van waterstof uit ammoniak na centrale conversie, maar minder hoog dan van waterstof uit centraal geconverteerde vloeibare waterstof en de LOHC's. Gebruik van LSM, via het aardgasnet vervoerd naar een *steam reformer* in het binnenland, levert een klein voordeel op ten opzichte van conversie van LSM in de importhaven en transport via het waterstofnet.



Figuur 70: Eindscores alternatieven elektriciteitscentrales 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Cluster-6-industrie

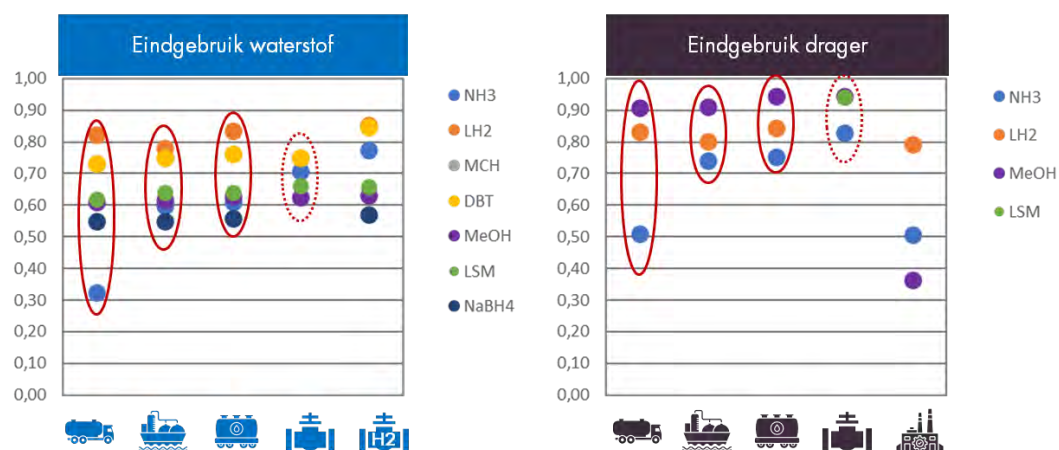
De cluster-6-bedrijven die in de buurt van het landelijke waterstofnet liggen kunnen hierop aansluiten, en dan is de bij industrieclusters beschreven vergelijking van toepassing. De andere cluster-6-bedrijven zullen via weg, water, spoor of buisleiding van waterstofdragers moeten worden voorzien. In Figuur 71 zijn de mogelijke alternatieven omcirkeld in de kolommen 1 tot en met 4 in de linkergrafiek (als een bedrijf waterstof voor eindgebruik nodig heeft) en de kolommen 1 tot en met 4 in de rechtergrafiek (als een bedrijf de drager zelf voor eindgebruik nodig heeft). Dit betreft de eindscores in de basissituatie in 2030.

Als bedrijven de keuze hebben, heeft centrale conversie en transport via het waterstofnet in vrijwel alle gevallen een hogere score. De mate waarin verschilt per drager. Bij ammoniak en de LOHC's

zijn de verschillen relatief groot, bij andere dragers zijn die verschillen kleiner. Geen toegang hebben tot het waterstofnet is dus uit oogpunt van de gewogen publiek belangen een nadeel. Als gunstigste opties voor cluster-6-bedrijven zonder aansluiting op het waterstofnet komen vloeibare waterstof en de LOHC's uit de bus op enige afstand gevolgd door LSM en methanol, ammoniak en natriumboorhydride.

Voor direct eindgebruik van de drager is de vergelijking met andere dragers niet relevant in geval van gebruik als grondstof omdat de rol van de drager in het productieproces doorslaggevend is voor de keuze, zie bij industriecusters.

Hier valt op dat levering van vloeibare waterstof via de weg en spoor een iets hogere score heeft dan via binnenvaart, wat verklaard kan worden door de verwachte hoge CAPEX voor de (nog te bouwen) transportschepen en de lagere score op Betrouwbaar. De kosten kunnen met toeneemende ervaring wel dalen, maar het nadelige effect van laag- en hoogwatersituaties op het publieke belang Betrouwbaar blijft.



Figuur 71: Eindscores alternatieven cluster 6 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Wegtankstations

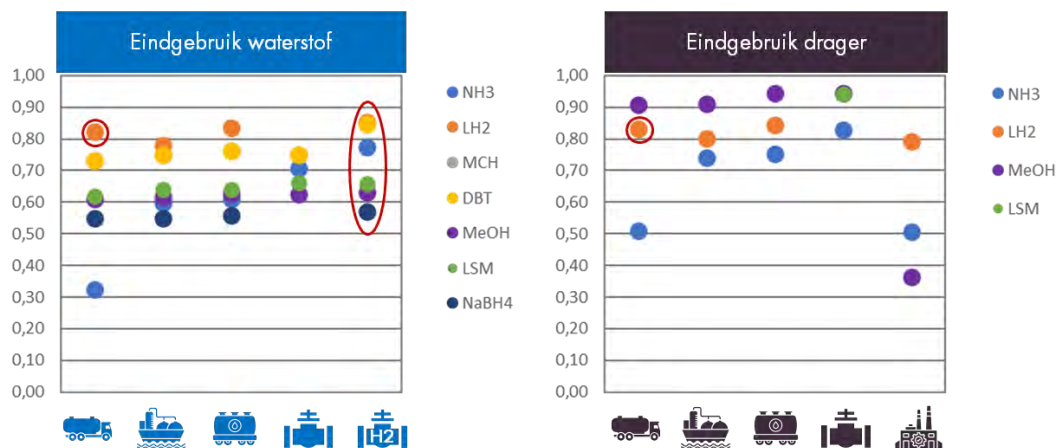
Binnen de scope van deze studie kunnen tankstations bevoorraden worden door levering van vloeibare waterstof aan het tankstation met tankwagens over de weg en door aansluiting van het tankstation op het waterstofnet (zoals het tankstation in Rhooen). In Figuur 72 zijn deze alternatieven omcirkeld. Dit betreft de eindscores in de basissituatie in 2030. Als voertuigen vloeibare waterstof tanken, is sprake van kolom 1 in het rechterdeel van Figuur 72, als vloeibare waterstof op het tankstation eerst door verdamping naar gecomprimeerde toestand wordt gebracht (350-700 bar) betreft het kolom 1 in het linkerdeel. Beide varianten kunnen op een tankstation samengaan.

Als een tankstation op het waterstofnet wordt aangesloten zal ter plekke nog een zuiveringsstap nodig zijn om de geleverde waterstof op de benodigde kwaliteit voor brandstofcellen te brengen. Als we met gegevens van JRC deze stap toevoegen, zakten de scores in kolom 5 links met maximaal een honderdste punt.⁶² Bij levering van vloeibare waterstof is geen extra zuivering nodig.

⁶² Volgens JRC1 bedragen de meerkosten door een extra investering van € 500.000 in PSA-zuivering voor een tankstation met 1 ton H₂ per dag capaciteit. Aafgeschreven over 20 jaar komt dit neer op € 0,068 per kgH₂. De extra energievraag is 3.6 MJ/kg H₂, en de zuiveringsstap leidt tot 1% extra verlies van waterstof (emissie).

Uit de vergelijking blijkt dat de route via het waterstofnet, als we rekening houden met de extra zuiveringsstap, alleen gunstiger is dan vloeibare waterstof via de weg als de waterstof in het netwerk afkomstig is van vloeibare waterstof of LOHC's. Het is ongunstiger als de waterstof in het net afkomstig is van LSM, methanol, ammoniak of natriumboorhydride. Op veel plekken in Nederland zal er geen keuze zijn omdat het waterstofnet te ver weg ligt om hierop aan te sluiten. Waar de afstand klein is, zullen de kosten van aansluiting in veel gevallen prohibitief zijn. In de meeste gevallen is levering in de vorm van vloeibare waterstof daarom een beter alternatief.

Tankstations zouden ook waterstof kunnen leveren uit lokale dehydrogenering van LOHC of natriumboorhydride, uit decentrale *steam reforming* van LSM of methanol, of decentraal kraken van ammoniak. Dit heeft echter, zoals te zien in Figuur 72, geen hogere score dan levering van vloeibare waterstof, en is bovendien technisch veel complexer, vraagt meer ruimte op of bij het tankstation, en bedient niet de klanten die vloeibare waterstof willen tanken. Dat laatste geldt ook voor tankstations met aansluiting op het waterstofnet.



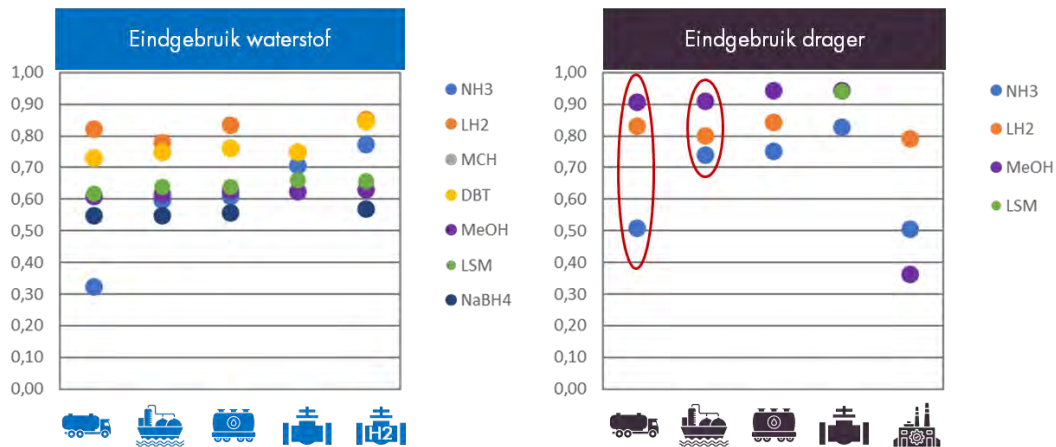
Figuur 72: Eindscores alternatieven wegtankstations 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

Bunkerstations scheepvaart

De scheepvaartsector verkent verschillende duurzame alternatieven voor de huidige brandstoffen, zoals vloeibare waterstof, methanol, ammoniak, LSM en natriumboorhydride. Levering van deze energiedragers aan schepen kan plaatsvinden vanuit tankwagens, bunkerschepen of vaste bunkerstations. Omdat de bunkerstations bevoorraad worden met schepen, vergelijken we alleen twee groeperingen van ketens: weg en binnenvaart. In Figuur 73 rechterdeel zijn deze alternatieven omcirkeld in kolommen 1 en 2.

Hieruit blijkt dat levering van methanol en vloeibare waterstof met tankwagens of bunkerschepen een hogere score heeft op de gewogen publieke belangen dan levering van ammoniak met tankwagens of bunkerschepen. Voor vergunbaarheid heeft methanol wel een duidelijk voordeel: DNV concludeert in een studie voor Port of Amsterdam dat in het geval van *ship-to-ship-bunkering* de

veiligheidsafstanden voor methanol 3-5 maal kleiner zijn dan voor LNG, en dat de veiligheidsafstanden voor ammoniak en vloeibare waterstof vergelijkbaar zijn met die voor LNG.⁶³ De studie gaat niet in op bunkeren aan een bunkerstation maar die situatie is in principe vergelijkbaar.



Figuur 73: Eindscores alternatieven bunkerstations 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

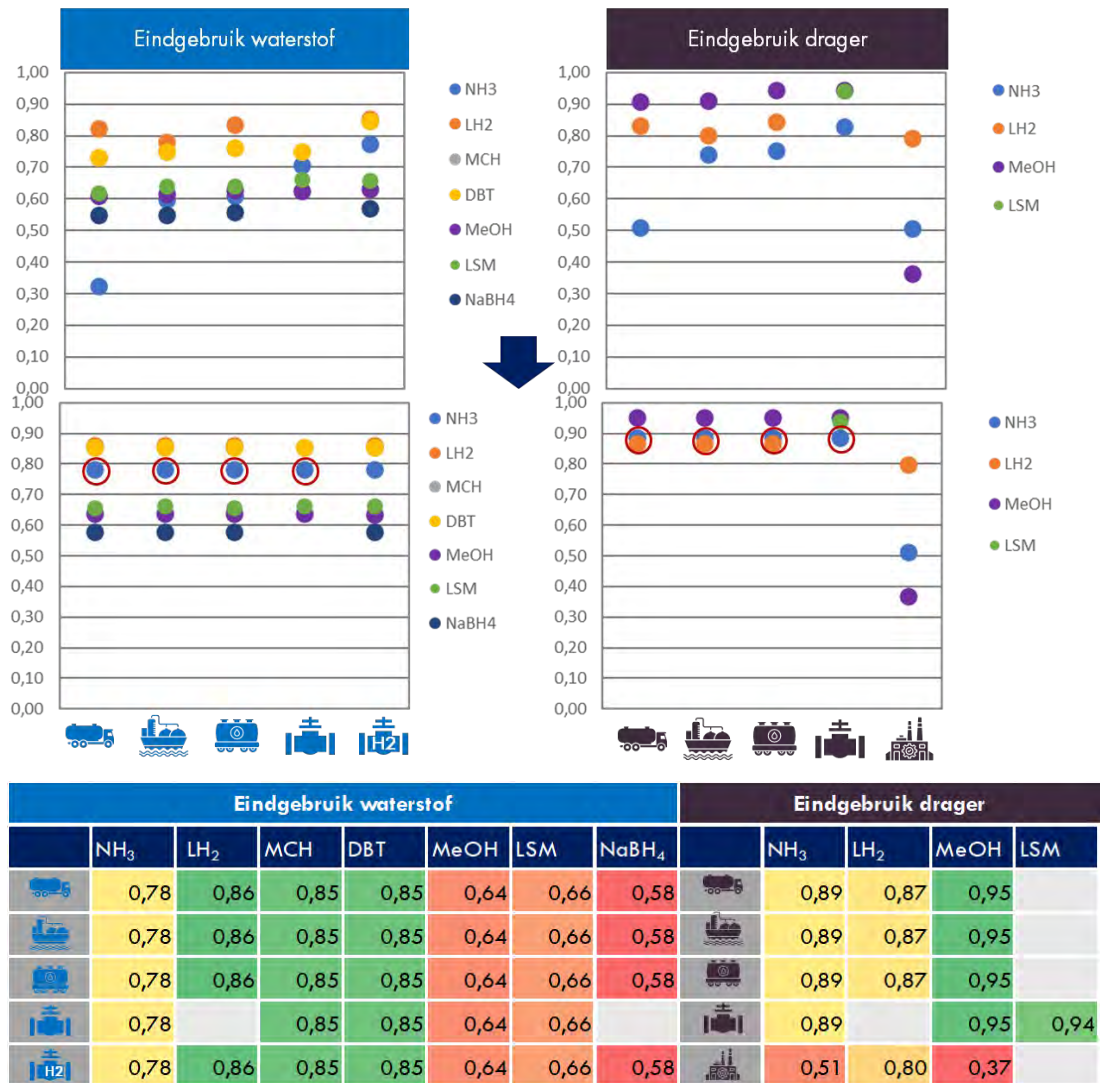
7.3 EINDGEBRUIK IN IMPORTHAVENS 2030

Als variant is de situatie beoordeeld waarin eindgebruik van waterstof en waterstofdragers plaatsvindt in de importhavens. Dat betekent dat in de basissituatie 2030 de effecten van de ketenstappen voor binnenlands transport en de decentrale conversie en opslag worden uitgeschakeld.

Het gevolg hiervan is dat de verschillen als gevolg van de transportmodaliteiten verdwijnen. De eindscore is iets hoger door het wegvallen van de kosten, het energieverlies en de investeringen in transportmiddelen en externaliteiten van transport. De dragers met de hoogste scores blijven vloeibare waterstof en de LOHC's (DBT en MCH) voor eindgebruik van waterstof en methanol voor eindgebruik als drager. Ammoniak heeft nu een duidelijk hogere score dan in de basissituatie.

De ketens met zowel conversie als synthese in Nederland staan wel vermeld in de Figuur 74, maar zijn over het algemeen niet realistisch in een importhaven waar de waterstofdrager zelf goed beschikbaar kan komen. Een uitzondering kan zijn om een waterstofdrager te importeren, te converteren naar waterstof, en vervolgens door liquefactie vloeibare waterstof te maken voor eindgebruikers in de transportsector (vrachtwagens, scheepvaart). Rechtstreekse distributie van ingevoerde vloeibare waterstof is uit oogpunt van publieke belangen aantrekkelijker.

⁶³ "The results for the location-specific individual risk show that the external safety distances (10-6/year) for bunkering of methanol and gaseous hydrogen are much smaller (a factor of 3-5) than those for LNG. For refrigerated ammonia and liquid hydrogen, the safety distances are similar to those for LNG. (...)." DNV (2021), [Onderzoek externe veiligheid bunkeren van alternatieve brandstoffen voor de zeescheepvaart](#).



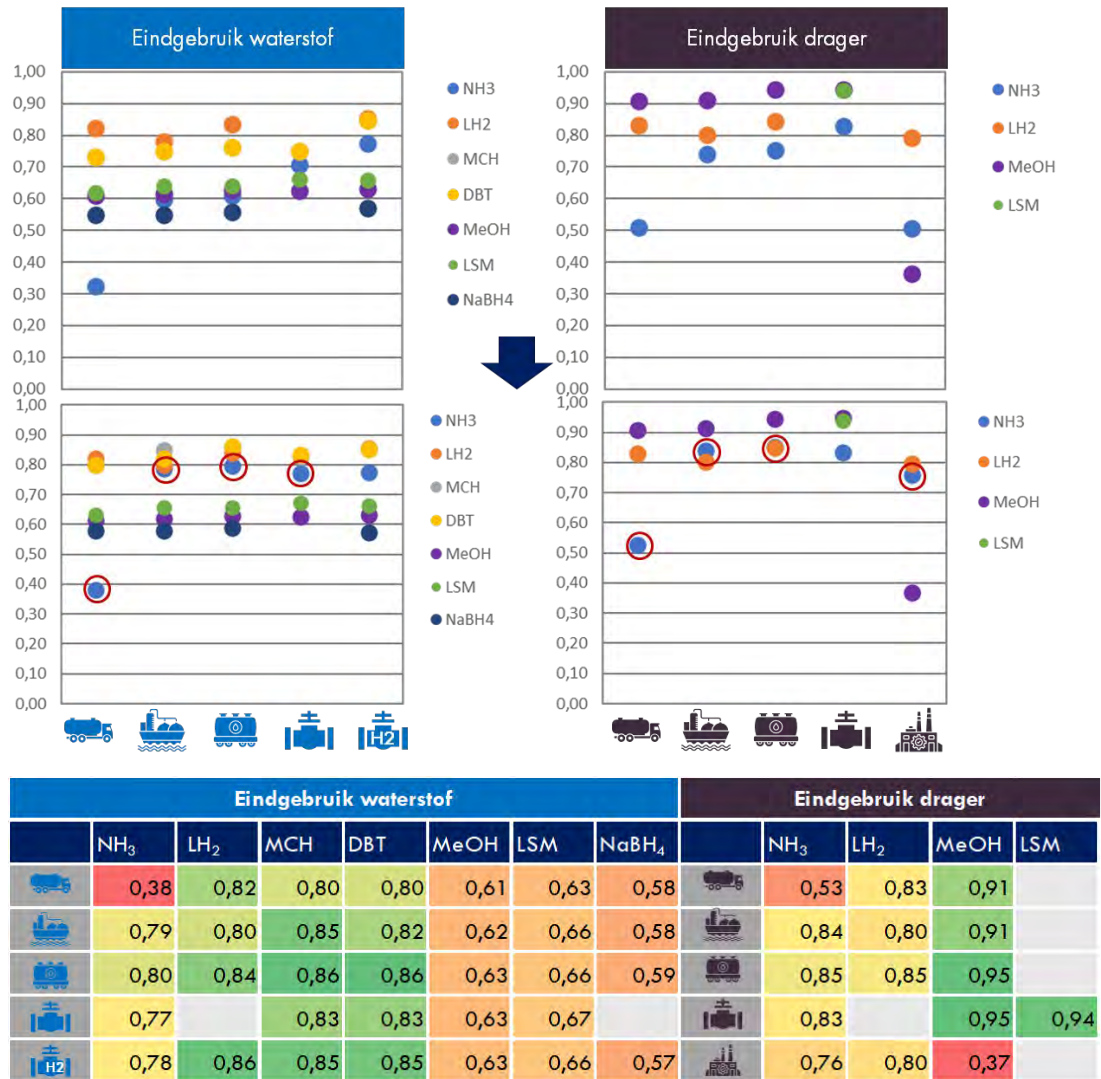
Figuur 74: Verschuiving eindscores variant eindgebruik importhaven 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

7.4 DOORVOER EN EXPORT NAAR BUITENLAND 2030

Als volgende variant is de situatie beoordeeld waarin waterstof en waterstofdragers worden doorgevoerd naar het buitenland waar het eindgebruik plaatsvindt. Bij doorvoer naar het buitenland vervallen de effecten van de ketenstappen decentrale conversie en opslag bij de eindgebruiker ten opzichte van de basissituatie 2030.

Het resultaat hiervan is dat er minder milieueffecten, ruimtebeslag, en veiligheidsrisico's zijn in Nederland. Ook zijn er minder risicovolle investeringen in Nederland nodig (publiek belang Adaptief). De toegevoegde waarde voor Nederland neemt af (publiek belang Economisch krachtig).

Als gevolg wordt de score voor ammoniak gunstiger in ketens waar het veiligheidsrisico en de milieu-emissies deels in het buitenland terecht komen (alle kolommen behalve kolom 5 in linkergrafiek en kolom 4 in rechtergrafiek). Voor de andere dragers is er weinig verschil met de basissituatie.



Figuur 75: Verschuiving eindscores variant eindgebruik buitenland 2030; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

7.5 SITUATIE IN 2050

Als derde variant is de mogelijke situatie in 2050 vergeleken. Daartoe is de dataset voor 2030 op een aantal aspecten aangepast voor 2050. We hebben conservatieve verbeteringen als gevolg van innovatie meegenomen, o.a. door het gebruik van kosteninschattingen van HyDelta voor 2040 (HyDelta richtte zich niet op 2050).

Aanpassingen input voor situatie 2050

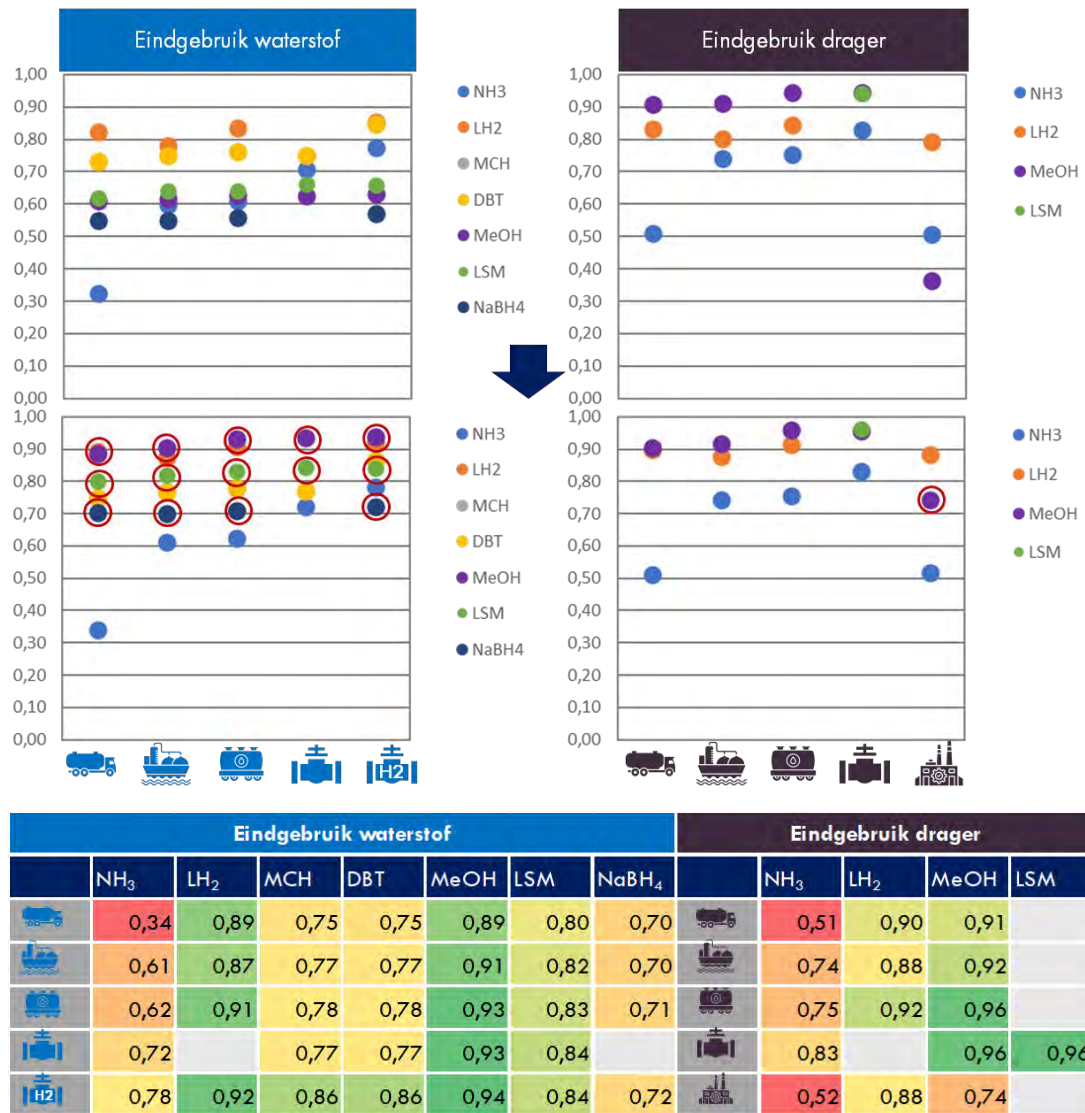
- Gebruik van CO₂: *direct air capture* in plaats van industriële puntbron voor synthese van methanol en LSM in Nederland en exportland.
- Volume: verviervoudiging ten opzichte van 2030, op grond van het hoge scenario (voor 2030) uit de volumestudie door Berenschot, Arcadis en TNO, gecorrigeerd voor efficiëntieverbetering van conversies.
- Betaalbaar: HyDelta dataset voor import uit Marokko in 2040 (lagere importkosten dan in 2030). Elektriteitsprijs in Nederland volgens de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) € 98 per MWh in 2050; CO₂-prijs in 2050 € 176 per ton.
- Betrouwbaar: technieken met lagere TRL's in 2030 hebben in 2050 hogere TRL's, meestal 9.
- Emissies: zeetransport is *net-zero*⁶⁴ CO₂ in 2050 volgens IMO-doelstelling (mix van schepen op methanol, ammoniak en vloeibare waterstof); binnenlands transport zero-emissie (elektrisch of waterstof).
- Energieverlies: voor sommige conversies is er een verbetering in efficiëntie aangenomen in de orde van 5-7%; binnenlands transport is zuiniger door elektrische aandrijving, zeetransport ongewijzigd.

Zie bijlage D voor een uitgebreid overzicht van de gewijzigde aannames, zowel voor de variant 2050 met conservatieve aannames, als voor de gevoeligheidsanalyse 2050 met progressieve aannames.

Het gebruik van CO₂ uit *direct air capture* in plaats van uit een industriële puntbron bij synthese zorgt voor een grote verbetering van de scores van methanol en LSM. Als de CO₂-uitstoot van deze dragers vervalt, verandert methanol met een vrij lage eindscore in de basissituatie in de drager met de hoogste score, en LSM wordt de nummer 3 na vloeibare waterstof bij eindgebruik van waterstofgas en de nummer 2 bij direct eindgebruik. Methanol heeft over alle publieke belangen in 2050 een gemiddelde of relatief hoge score. Hetzelfde geldt min of meer voor LSM, zij het dat de scores net iets lager liggen dan voor methanolketens.

Procesverbeteringen (energie-efficiëntie, kostenniveau) treden voor meeste dragers op, dit leidt niet tot significante veranderingen in rangorde. Het hogere volume in 2050 heeft geen effect op de eindscore. De score voor natriumboorhydride verbetert door een veronderstelde lagere energieprijzen in het exportland in 2050. De uitstoot van zeetransport en binnenlands transport neemt af, maar de kosten van transport niet. Het effect hiervan op de scores is voor de route Marokko-Nederland beperkt.

⁶⁴ *Net-zero* verwijst naar een situatie waarin de uitstoot van broeikasgassen in evenwicht is met de emissiereducties. Er kunnen nog steeds CO₂-emissies worden uitgestoten bij transport, maar er wordt evenveel CO₂ uit de atmosfeer verwijderd als erin wordt uitgestoten.



Figuur 76: Eindscores verschuiving alternatieven binnenland 2050; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

7.6 GEVOELIGHEIDSANALYSES WEEGFACTOREN

Om de invloed van de weegfactoren op de eindscores te bestuderen zijn gevoeligheidsanalyses gedaan met drie andere sets van weegfactoren dan de set die in de Delphi-sessie is vastgesteld:

- Neutrale weging: alle publieke belangen even belangrijk (elk 10%);
- Zwaardere weging Betaalbaar: de uitkomst van de Delphi-sessie aangepast door Betaalbaar te verdubbelen, Veilig en Milieu te halveren, en resterende procenten proportioneel te verdelen;
- 100-puntenverdeling: deelnemers aan de Delphi-sessie verdeelden elk 100 punten over de publieke belangen (zie paragraaf 5.3).

7.6.1 Neutrale weging

Figuur 77 geeft de verdeling van weegfactoren volgens neutrale weging in een taartdiagram. De neutrale weging verschilt ten opzichte van de Delphi-weging als volgt: een hogere weging van de publieke belangen Economisch Krachtig, Betrouwbaar, Adaptief, Rechtvaardig, Toegankelijk en Ruimte; een lagere weging van Milieu, Veilig, en Duurzaam; en Betaalbaar blijft ongeveer gelijk.

Eindgebruik waterstof

Het resultaat is te zien in Figuur 78. Vloeibare waterstof zakt van de eerste naar de derde plek (behalve per schip – dan plek vier). De lagere eindscore voor vloeibare waterstof dan bij de Delphi-weging is met name het resultaat van de zwaardere weging van Betrouwbaar en Ruimte en de lichtere weging van Duurzaam en Milieu. Op de eerste twee publieke belangen heeft vloeibare waterstof een lagere score dan gemiddeld omdat het TRL-niveau nog niet voor alle ketenonderdelen op 9 wordt ingeschat in 2050 en omdat de op- en overslag veel ruimte inneemt. Op Duurzaam en Milieu haalt vloeibare waterstof een hogere score dan gemiddeld vanwege het lage energieverlies in de keten en de lage emissies. Transport per binnenvaartschip krijgt een lagere score vanwege de lagere score op Betrouwbaar als gevolg van hoog- en laagwatersituaties.

Bij deze neutrale weging krijgen de LOHC's een lagere score. Ze zakken in de rangorde van de tweede/derde plek bij de Delphi-weging naar de vijfde/zesde bij neutrale weging. De lagere score is vooral het gevolg van de zwaardere weging van Betrouwbaar, Adaptief en Ruimte. De LOHC's hebben veel ruimte nodig door het lage waterstofgehalte voor conversie en de retourstromen per buisleiding en daardoor ook meer risicovolle investeringen (dubbele opslag en meer buisleidingen). Ook ligt het TRL-niveau op enkele ketenonderdelen lager (Betrouwbaar).

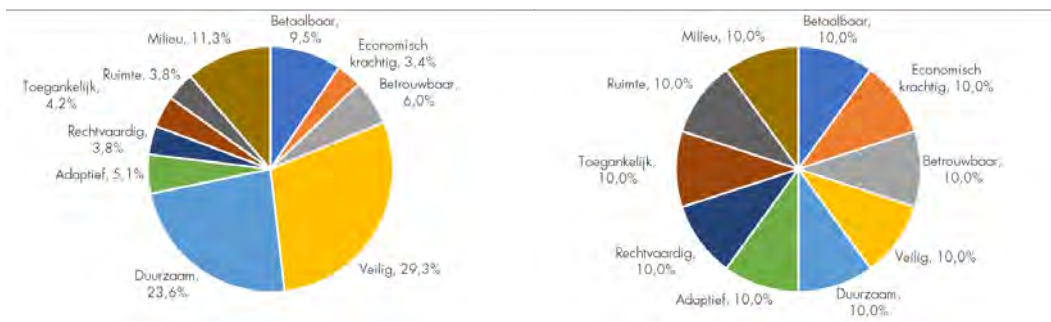
Methanol krijgt een hogere score bij eindgebruik van waterstof en komt op de eerste plek, iets gunstiger dan ammoniak die bij de neutrale weging op plek twee terecht komt. De hoge score voor methanol komt door de relatief hoge eindscore op alle publieke belangen behalve Duurzaam (broeikasgassen en energieverlies). In de Delphi-weging wordt de lage score op Duurzaam zwaar aangerekend, maar bij gelijke weging wordt de lage score meer dan gecompenseerd door de scores op de andere publieke belangen.

Ammoniak behaalt ook een hoge score doordat de lage score op Veilig (gifwolk) en Milieu (ammoniaklekkage) minder zwaar gewogen wordt. Natriumboorhydride houdt de laagste score.

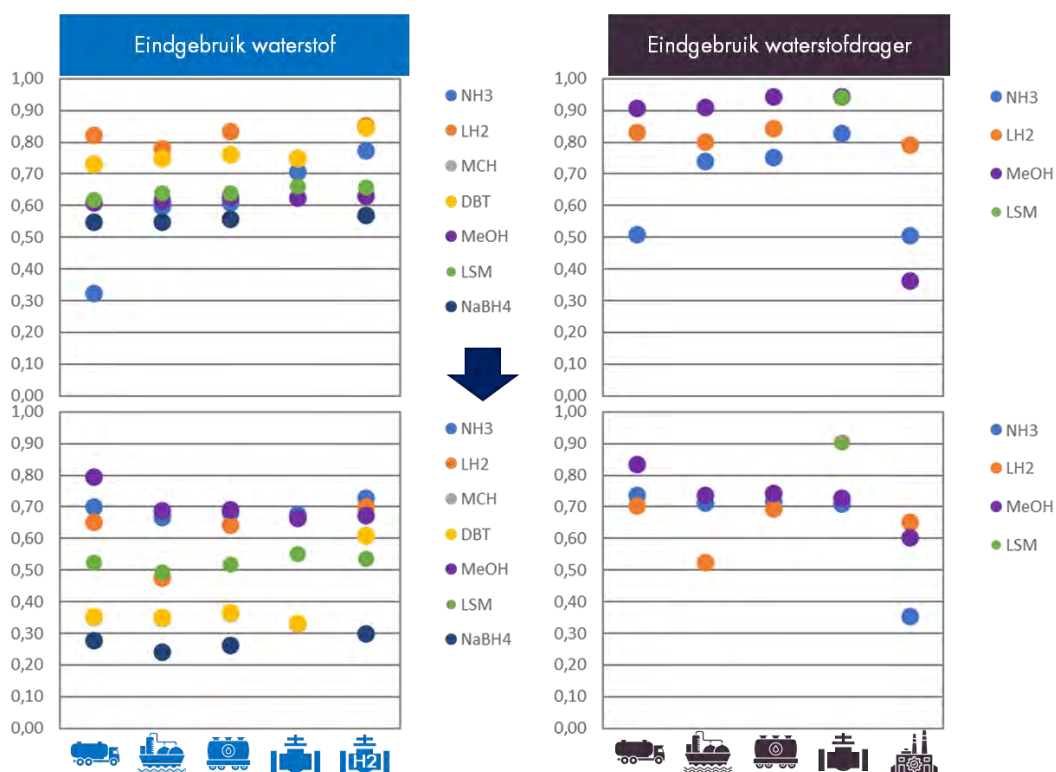
Eindgebruik drager

Bij eindgebruik van de drager krijgt LSM via het aardgasnet een iets hogere score dan methanol en neemt de eerste plek in door de hogere weging van Rechtvaardig en Toegankelijk. Het wijdvertakte aardgasnet is beter toegankelijk dan methanol per buis en ook de externe kosten ten opzichte van de kostprijs vallen gunstiger uit (Rechtvaardig).

Methanol en vloeibare waterstof krijgen een iets lagere score als gevolg van de neutrale weging. Ammoniaktransport via de weg krijgt een iets hogere score omdat met name Toegankelijk een zwaardere weging krijgt en Veilig een lagere.



Figuur 77: Visualisatie van de verandering in weging; links Delphi-weging van basissituatie, rechts gelijke weging

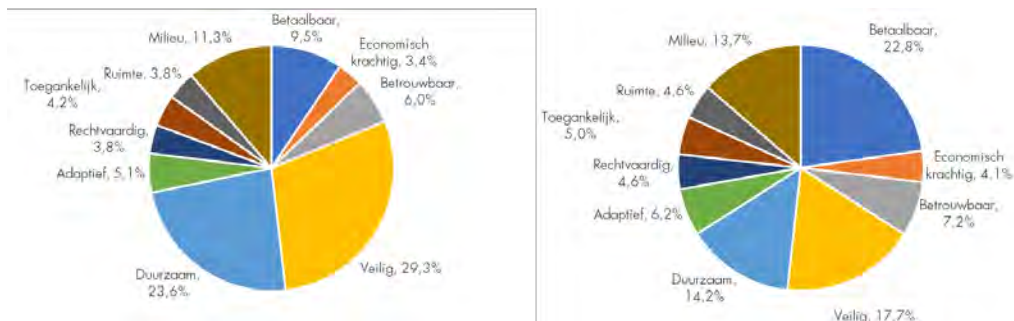


	Eindgebruik waterstof							Eindgebruik drager			
	NH ₃	LH ₂	MCH	DBT	MeOH	LSM	NaBH ₄	NH ₃	LH ₂	MeOH	LSM
	0,70	0,65	0,35	0,36	0,80	0,53	0,28	0,74	0,71	0,84	
	0,67	0,48	0,35	0,35	0,69	0,50	0,24	0,71	0,53	0,74	
	0,68	0,64	0,37	0,37	0,69	0,52	0,26	0,72	0,70	0,74	
	0,68		0,33	0,33	0,67	0,55		0,71		0,73	0,91
	0,73	0,70	0,61	0,61	0,67	0,54	0,30	0,36	0,65	0,60	

Figuur 78: Gevoeligheidsanalyse gelijke weegfactoren; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager (onder) ten opzichte van basissituatie 2030 (boven)

7.6.2 Aanpassing weegfactoren: zwaardere weging betaalbaar

In de volgende gevoeligheidsanalyse hebben we een set weegfactoren doorgerekend waarin een veel zwaardere weging is toegekend aan het publieke belang Betaalbaar. De gekozen verdeling van weegfactoren staat in het taartdiagram in Figuur 79. Het aandeel van Betaalbaar wordt verdubbeld, van Veilig en Duurzaam wordt gehalveerd, waarna de resterende procentpunten proportioneel zijn verdeeld over de publieke belangen.



Figuur 79: Visualisatie van de verandering in weging; links Delphi-weging van basissituatie, rechts weegfactoren bij aangepaste weging

Eindgebruik waterstof

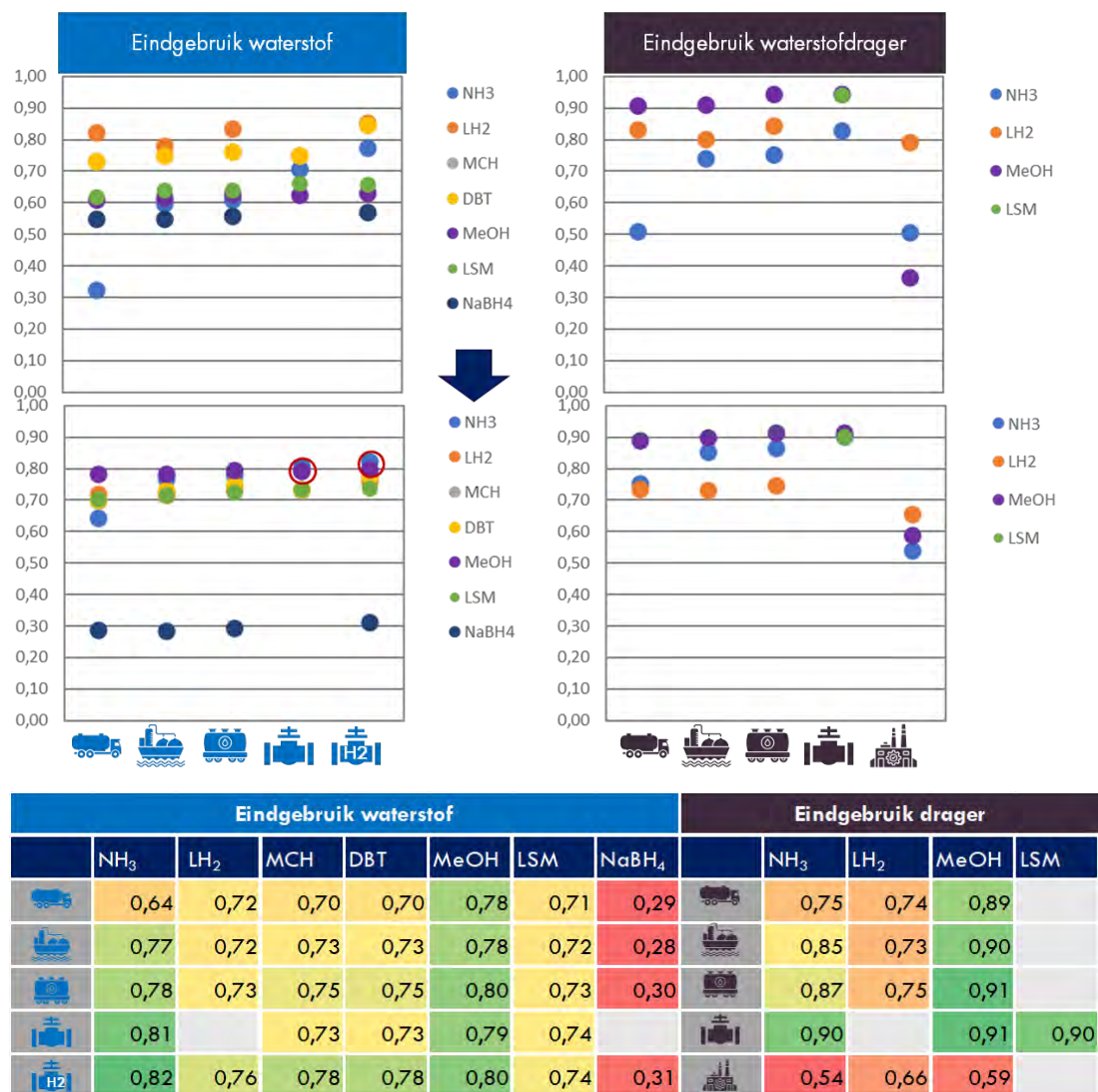
Het resultaat is dat de meeste dragers dicht bij elkaar komen te liggen. Bij eindgebruik van waterstof heeft ammoniak zelfs de hoogste score bij transport via een buisleiding of na conversie en transport via het waterstofnet. De hogere weging van Betaalbaar en de lagere weging van Veilig resulteren voor ammoniak in een veel hogere eindscore dan in de basissituatie. Dit is omdat ammoniak juist op Betaalbaar een hoge score heeft door de lage importkosten en op Veilig een lage vanwege het risico op het ontstaan van een gifwolk. Bij transport via buisleiding of na centrale conversie is het veiligheidsrisico het laagst en krijgt ammoniak de hoogste score.

Bij andere transportmodaliteiten en direct gebruik is methanol iets gunstiger. Dit komt door het grotere verschil in de score op Veilig voor transport per weg, water of spoor tussen methanol en ammoniak. De ingeschatte veiligheidsrisico's voor dit transport zijn voor ammoniak veel groter dan voor methanol in vergelijking met het verschil bij transport per buisleiding van de drager en transport van waterstofgas via het waterstofnet. Hierdoor wordt het nadeel van ammoniak ten opzichte van methanol op het publieke belang Veilig groter, terwijl het voordeel op het publieke belang Duurzaam (broeikasgassen) min of meer gelijk blijft.

Eindgebruik drager

Bij het eindgebruik van de drager blijft methanol de meest gunstige score houden, behalve in geval van decentrale synthese: hier heeft ammoniaksynthese uit het waterstofnet een hogere score dan methanol. De reden voor de hoge score van methanol is dat bij direct gebruik er geen nadeel voor methanol is op het publieke belang Duurzaam (broeikasgassen). Door het ontbreken van conversie blijft de CO₂-uitstoot hierbij achterwege. In de meeste rechtse kolom is sprake van conversie én synthese. Hierdoor is de CO₂-uitstoot juist hoog, en krijgt methanol een veel lagere score. Vloeibare waterstof heeft in deze kolom de hoogste score. De wat hogere importkosten voor vloeibare waterstof (Betaalbaar) worden hier gecompenseerd door het voordeel ten opzichte van ammoniak op Veilig (risico gifwolk), Rechtvaardig (hogere importkosten en minder externe kosten) en Milieu (ammoniakemissies) en het voordeel ten opzichte van methanol op Duurzaam

(CO₂-emissies) en Rechtvaardig (veel minder externe effecten in buitenland en Nederland, terwijl de kosten niet lager liggen).



Figuur 80: Gevoeligheidsanalyse andere weegfactoren; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager (onder) ten opzichte van basissituatie 2030 (boven)

7.6.3 Aanpassing weegfactoren: weging 100-puntenverdeling

Om het effect van de weging op de eindscore te bekijken hebben we ook de weging volgens de 100-puntenverdeling toegepast. Deze weging is door de deelnemers aan de Delphi-sessie gegeven (zie 5.3). Verschillen tussen deze weging en de uitkomsten van het Delphi-proces zijn dat er in de 100-puntenverdeling iets meer gewicht is toegekend aan Betaalbaar (+3 procentpunten), Rechtvaardig (+5 procentpunten) en Toegankelijk (+3 procentpunten) en minder aan Milieu (-4 procentpunten) en Veilig (-9 procentpunten). De weging van Duurzaam blijft min of meer gelijk (< 2 procentpunten verschil).

Eindgebruik waterstof

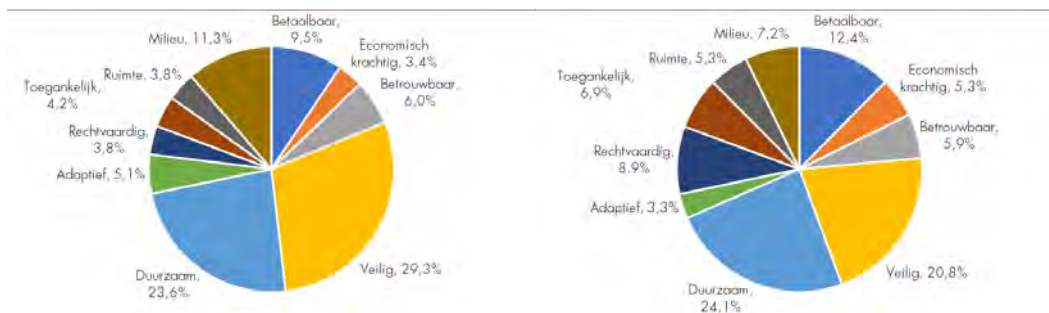
De aangepaste weging leidt ertoe dat ammoniak gunstiger en natriumboorhydride ongunstiger worden beoordeeld vanwege de iets hogere weging van Betaalbaar en de lagere weging van Veilig en Milieu ten opzichte van de Delphi-wegingsfactoren. Ook vloeibare waterstof, methanol en LSM krijgen een iets lagere score. Voor de LOHC's hangt het af van de modaliteit.

Bij eindgebruik van waterstof krijgt ammoniak samen met de LOHC's de hoogste score. Dit is in geval van decentrale conversie en transport via het waterstofnet. De gedeelde eerste plek bij eindgebruik van waterstof is het gevolg van de iets hogere weging van Betaalbaar, maar meer nog van de veel lagere weging van Veilig en Milieu. Ammoniak heeft op beide publieke belangen de laagste score en komt vanwege de gebruikte methodiek daardoor in de basissituatie uit op een extra lage score. Alleen de score van ammoniak bij transport over de weg blijft laag. De scores van ammoniak bij transport via water of spoor sluiten ook aan bij de ketens met de hoogste scores.

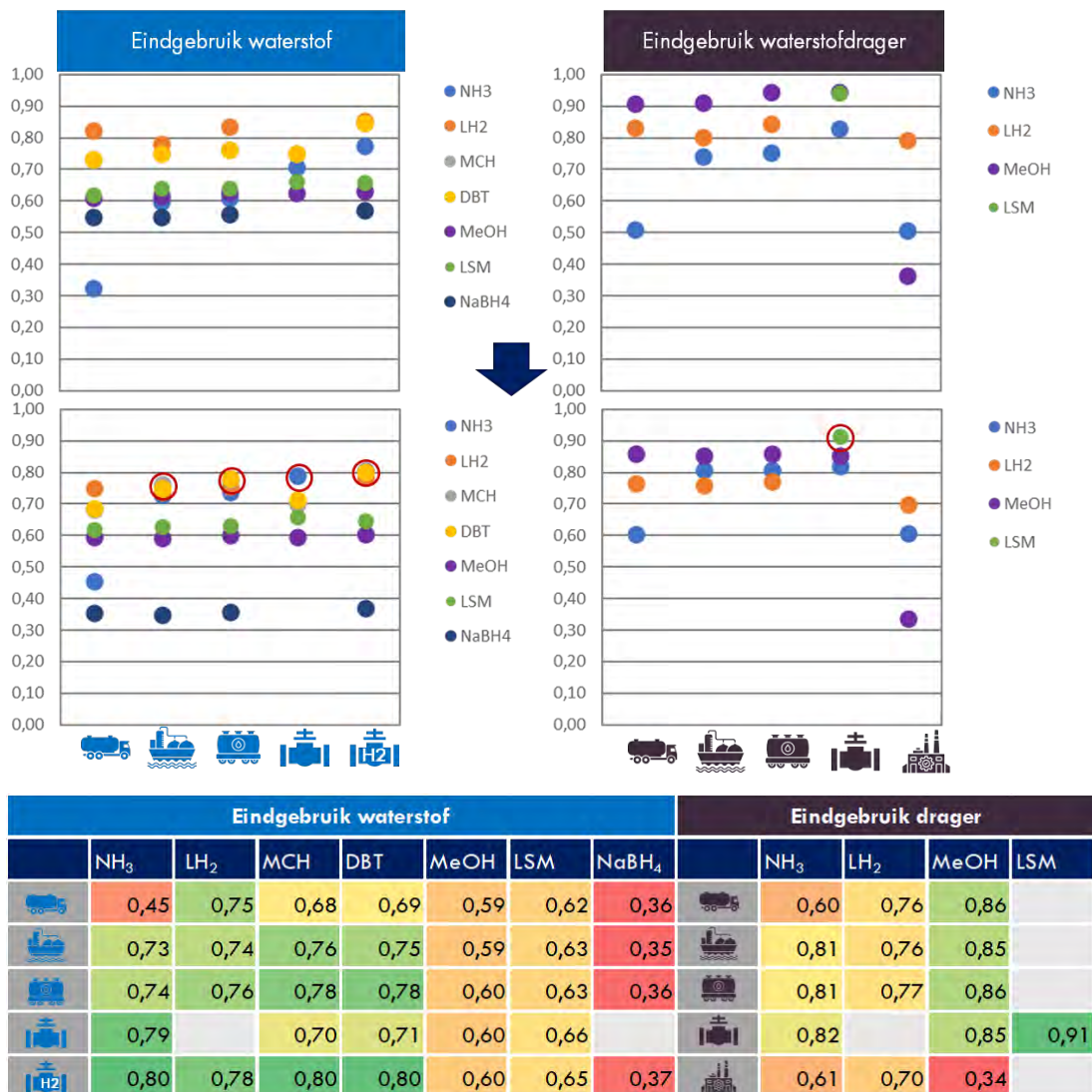
De LOHC's krijgen een iets hogere score dan vloeibare waterstof bij transport over water, spoor en gebruik van het waterstofnet bij eindgebruik van waterstof. De reden is vooral de lagere score van vloeibare waterstof. Deze lagere score is te wijten aan de zwaardere weging van Betaalbaar en de hogere importkosten van vloeibare waterstof. De LOHC's krijgen een iets lagere score bij transport over de weg vanwege de hogere weging van de deelindicator transportveiligheid (Veilig) en de vele transportbewegingen voor de LOHC's vanwege het lagere waterstofgehalte voor conversie en vanwege de hogere weging van Rechtvaardig. Het transport van de LOHC's via buisleiding krijgt een lagere beoordeling omdat een buisleidingnet veel ruimtebeslag vraagt door het aantal buisleidingen en een lage score heeft op Toegankelijk.

Eindgebruik drager

LSM komt gunstiger uit dan methanol bij eindgebruik van de drager in deze 100-puntenweging, doordat LSM een hogere score heeft dan methanol op met name Toegankelijk. Het aardgasnet is toegankelijker dan een buisleiding voor methanol en voegt weinig kosten toe voor het achterland. Door de lagere kosten in Nederland van het aardgasnet verdwijnt bovendien een nadeel in importkosten ten opzichte van methanol (Betaalbaar). Methanol krijgt een iets lagere score dan in de basissituatie vanwege de lagere weging van Veilig en Milieu in combinatie met een relatief hoge score op Veilig en Milieu en de hogere weging van Rechtvaardig en Toegankelijk. Methanol heeft een lage score op Rechtvaardig door de hoge externe kosten (CO₂-emissies - Duurzaam) en de lage kostprijs.



Figuur 81: Visualisatie van de verandering in weging; links Delphi-weging van basissituatie, rechts weegfactoren bij 100-puntenverdeling



Figuur 82: Gevoeligheidsanalyse weegfactoren 100-puntenverdeling (onder) ten opzichte van basissituatie 2030 (boven)

7.7 OVERIGE GEVOELIGHEIDSANALYSES

7.7.1 2050 progressieve aannames

In paragraaf 7.5 is de mogelijke situatie in 2050 doorgerkend met conservatieve aannames. Daartoe is de dataset voor 2030 op een aantal aspecten aangepast voor 2050. Voor de gevoeligheidsanalyse is ook een variant doorgerkend met progressieve aannames.

Aanpassingen input voor situatie 2050: progressief

- Aannames voor Volume, Betaalbaar, Betrouwbaar, Energiegebruik voor transport en Emissies gelijk aan conservatieve doorrekening, alleen sterkere kostendaling vloeibare-waterstoftankschip.
- Energieverlies: voor de meeste conversies (zie Tabel 51 bijlage) is een veel grotere verbetering in efficiëntie aangenomen in de orde van tientallen procenten. Dit is verwerkt in de correctie van het volume dat geïmporteerd moet worden.

Zie bijlage D voor een uitgebreid overzicht van de gewijzigde aannames, zowel voor de variant 2050 met conservatieve aannames, als voor de gevoeligheidsanalyse 2050 met progressieve aannames.

Als de wijzigingen worden doorgevoerd zijn er verbeteringen zichtbaar wanneer de drager gebruikt wordt als brandstof. Dit betreft ammoniak, methanol en LSM. Door het efficiëntere energiegebruik nemen de geïmporteerde volumes af en krijgen deze ketens op de meeste publieke belangen een iets hogere score. Minder volume zorgt voor lagere kosten voor opslag, conversie en transport en voor minder externe effecten. Voor de overige dragers neemt het energiegebruik (elektrisch) wel af, maar leidt dat niet tot lagere te transporteren volumes. Omdat de deelindicator energieverlies binnen Duurzaam niet heel zwaar gewogen wordt is het effect van een lager energieverlies in de keten te klein om zichtbaar te zijn in de scores (kleiner dan 0,01).



Figuur 83: Gevoeligheidsanalyse 2050 progressieve aannames (onder) vs. conservatieve aannames (boven); waterstof eindgebruik en eindgebruik drager

7.7.2 Opslag en conversie buitengaats

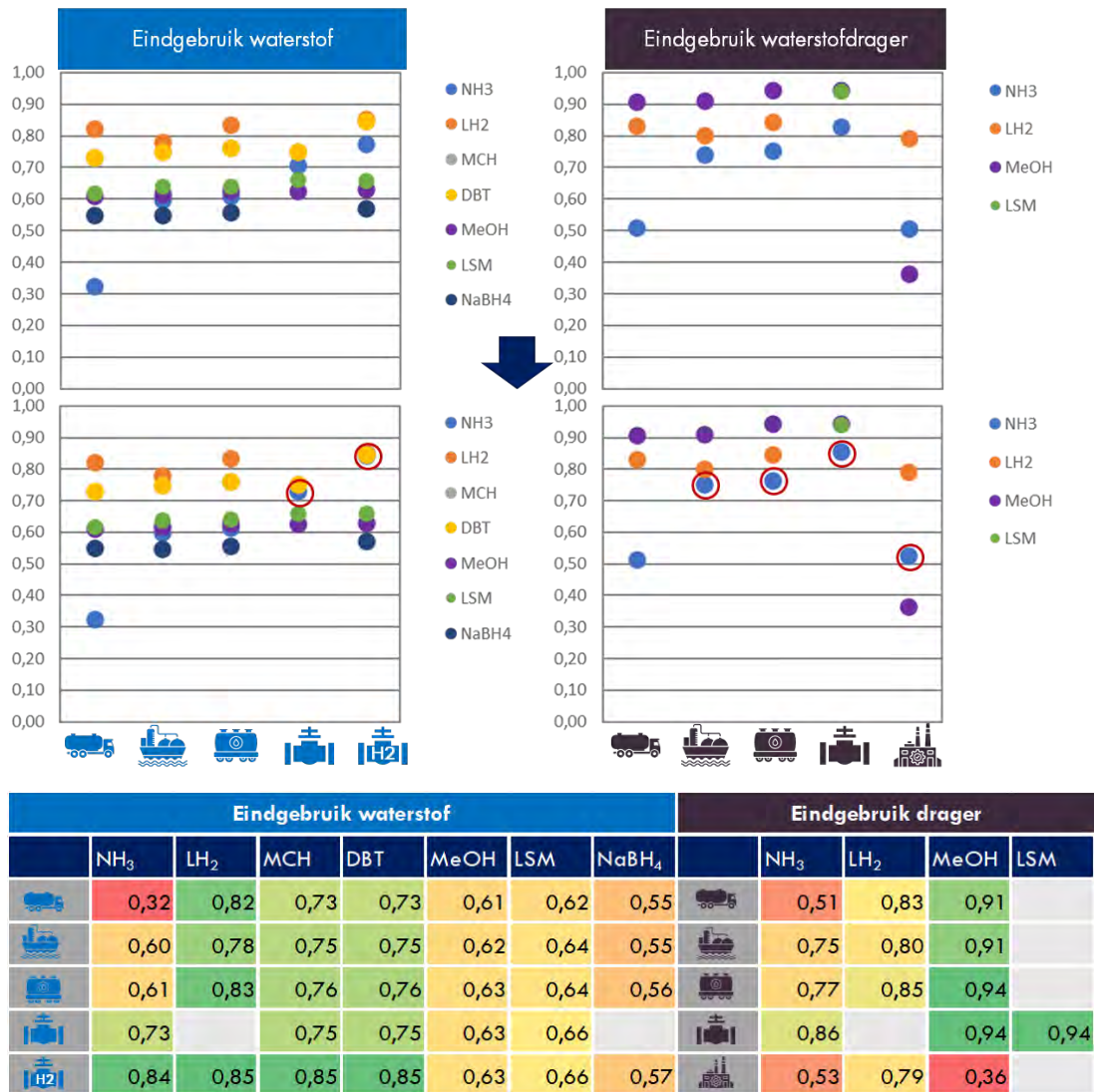
Bij opslag en conversie op zee nemen veiligheidsrisico's en milieueffecten af. We onderzoeken daarom het effect van conversie en opslag op een 'decommissioned' olie- of gasplatform, een aan te leggen energie-eiland of een *floating production storage and offloading (FPSO)*⁶⁵ op de Noordzee in plaats van in de importhaven.

Aanpassingen voor gevoeligheidsanalyse conversie en opslag buitengaats

- Halvering van de impact van calamiteiten ten opzichte van basissituatie, gelijke kans op optreden.
- Lagere milieueffecten: de NO_x-schaduwprijs op zee is lager dan op land; aanname dat ook de NH₃-schaduwprijs lager ligt evenals de schaduwprijs van milieueffecten van methaan.
- Drager of waterstof wordt met een buisleiding naar land vervoerd, geen extra tracélengte aangenomen.
- Geen wijzigingen in de aannames voor kosten in de keten (geen kosten voor platform, eiland, FPSO).
- Geen aanpassingen voor de mogelijke vermindering van de synergie in operatie bij splitsing van locaties over zee en vaste land.

Het effect van deze wijzigingen op de resultaten is beperkt. Wel is er een zichtbaar positief effect op ammoniakketens met centrale conversie. Ook ketens waar het risico van centrale opslag zwaar weegt, verbeteren hierdoor.

⁶⁵ In het Duitse Lublin wordt een waterstofimportterminal gepland waar aangelande ammoniak met een drijvende kraakinstallatie wordt omgezet naar 30 kton/jaar waterstof. Habibic, Ajsa (2024), Höegh LNG and Deutsche ReGas join forces for world's first floating hydrogen import terminal, *Offshore Energy*, July 1.



Figuur 84: Gevoeligheidsanalyse conversie en opslag buitengaats in plaats van in importhaven; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager (onder) ten opzichte van basissituatie 2030 (boven)

7.7.3 Langere afstand over zee

In plaats van productie in Marokko veronderstellen we dat de drager uit Argentinië komt om te zien wat het effect is van een langere transportafstand vanuit exportlanden.

Aanpassingen model voor gevoeligheidsanalyse afstand over zee

- Aanpassing transportafstand van 3000 km naar 15.000 km.
- Transportkosten over zee nemen toe; *shipping* kosten volgens HyDelta voor Argentinië naar Nederland in plaats van Marokko-Nederland gebruikt.
- CO₂-, NO_x- en fijnstof-uitstoot tijdens zeetransport neemt toe (geschaald met afstand).
- Energieverlies en *boil-off*-verliezen tijdens zeetransport nemen toe (geschaald met afstand).
- Schepen zijn langer onderweg, zodat het aantal cycli per jaar van een LOHC of van natriumboorhydride afneemt; er is meer dragermateriaal nodig zodat het materiaalgebruik toeneemt.

Het resultaat is dat de meeste scores iets dalen door de hogere kosten en emissies van het langere scheepstransport. Ook de scores op Rechtvaardig vallen lager uit. Vloeibare waterstof en de LOHC's hebben het meeste last van de sterkere toename van de transportkosten als gevolg van de lage energiedichtheid (vloeibare waterstof) respectievelijk laag waterstofgehalte (opgeslagen waterstof in de LOHC's).

De extra CO₂-uitstoot van zeeschepen als gevolg van de langere transportafstanden zorgt voor een verlaging van de scores voor alle dragers, maar meer voor de methanol en LSM-ketens. Dit komt omdat deze ketens op de indicator broeikasgassen het minste presteren en de wegingsmethodiek dit deze ketens zwaarder aanrekent (zie bijlage G). De methanolketens krijgen ook een iets grotere verlaging omdat de score op Rechtvaardig al laag is en alle ketens hierop ook een lagere score krijgen. De relatieve toename van de externe kosten (door emissies) is groter dan de relatieve toename van de kosten. Dit zorgt voor een iets lagere score op Rechtvaardig (afwenteling buiten Nederland) voor de methanol- en LSM-ketens.

Op de verhoudingen tussen de verschillende ketens hebben de aanpassingen weinig effect. Het gaat ook om kleine veranderingen.



Figuur 85: Gevoeligheidsanalyse langere transportafstand; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager (onder) ten opzichte van basissituatie 2030 (boven)

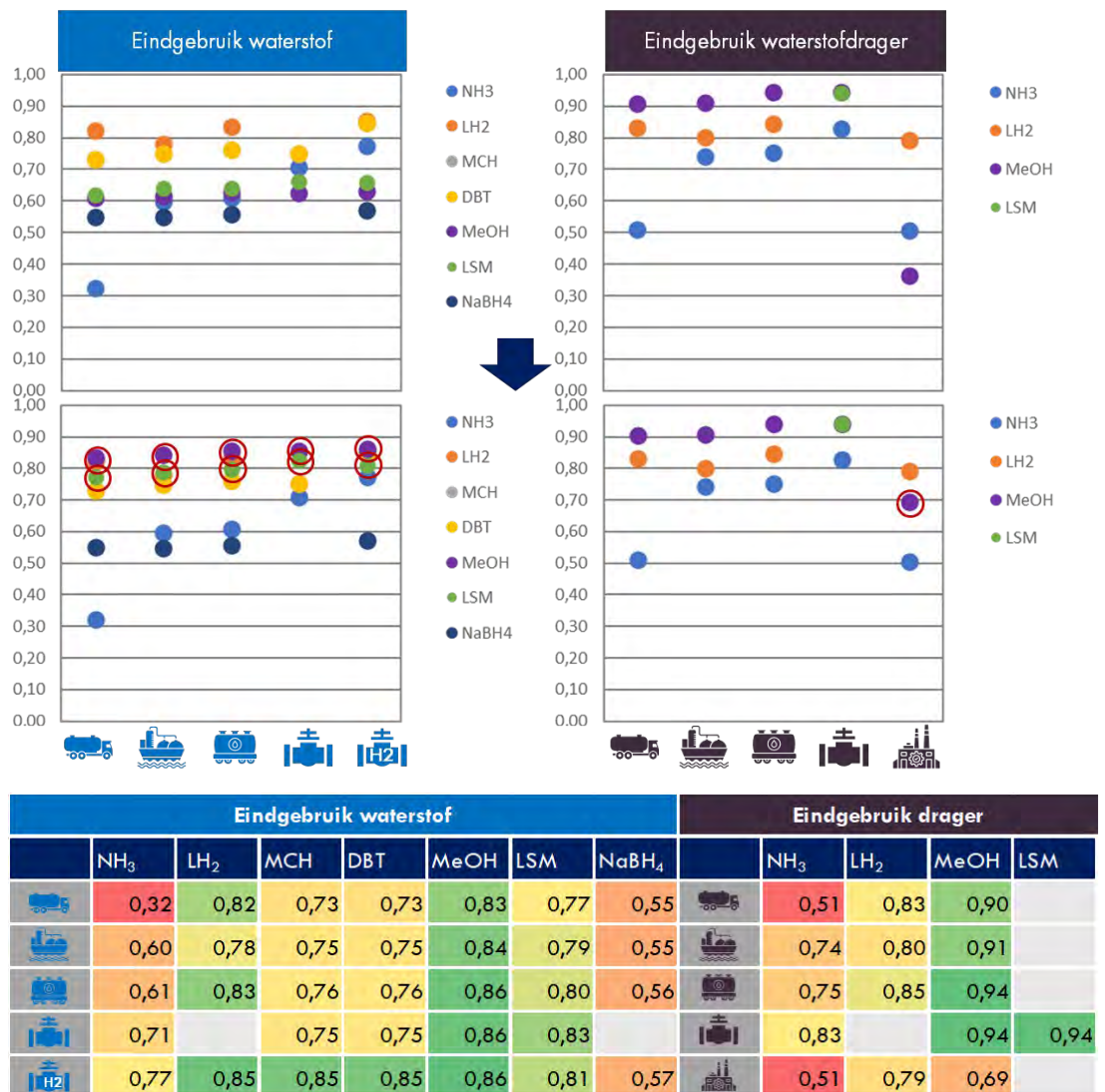
7.7.4 CCS

In deze gevoeligheidsanalyse kijken we naar het effect van CCS in de ketens met conversie van koolstofhoudende waterstofdragers, dat wil zeggen methanol en LSM (methaan). Bij het proces van *steam reforming* wordt de drager samen met stoom omgezet in waterstof en CO₂. In de basis-situatie wordt deze CO₂ niet afgevangen, in deze gevoeligheidsanalyse wel.

Aanpassingen voor gevoeligheidsanalyse CCS:

- In Nederland veronderstellen we CO₂-afvang op conversie-installaties (reforming van methanol en LSM).
- Veronderstelde effectiviteit van afvang van CO₂: 90%.
- Kosten voor afvanginstallatie, transport en ondergrondse opslag: 110 euro per ton CO₂.
- Energieverlies voor compressie CO₂ (175 kWh per ton CO₂) en voor warmte (300 kWh per ton CO₂).
- Aanname: CCS-installatie gebruikt elektrische energie voor compressie en warmte.

Uitgangspunt van deze gevoeligheidsanalyse is dat de CO₂ voor synthese van methanol en LSM afkomstig is uit industriële puntbronnen, net als in de basissituatie. In de variant 2050 is de CO₂ afkomstig van *direct air capture*. Het effect van CCS in combinatie met CO₂ uit een industriële puntbron lijkt op het effect van het gebruik van DAC zoals verondersteld in de variant 2050 (paragraaf 7.5). In het laatste geval is alle CO₂ die verloren gaat klimaatneutraal, terwijl bij CCS ongeveer 90% afgevangen wordt. Ook nemen we aan dat bij de synthese geen CCS wordt toegepast. De kleine CO₂-verliezen die hierbij optreden worden opgeteld bij de verliezen bij CCS. Bij CCS blijft dus nog sprake van enige CO₂-emissies. Bij gebruik van DAC leveren conversie en synthese geen CO₂-uitstoot op.



Figuur 86: Gevoeligheidsanalyse gebruik CCS bij steam reforming-installaties; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager (onder) ten opzichte van basissituatie 2030 (boven)

Als gevolg van de afvang en ondergrondse opslag van CO₂ verbeteren de scores van methanol en LSM sterk als het gaat om ketens met eindgebruik van waterstof. De hogere kosten en het extra energieverlies worden in de scores meer dan goedgemaakt door de lagere CO₂-emissie. De overige scores veranderen niet ten opzichte van de basissituatie. Methanol wordt door de CCS de eerste

in de rangorde, net voor vloeibare waterstof. LSM volgt daarna, voor de LOHC's, behalve in het geval van centrale conversie. Dan hebben de LOHC's nog een hogere score. Ammoniak en natriumboorhydride volgen daarna.

In de ketens voor eindgebruik als drager verandert bij toepassing van CCS alleen iets bij de combinatie van conversie en decentrale synthese van methanol. Dit is de enige keten waarbij sprake is van *steam reforming*.

7.7.5 Alternatieve kostendata (JRC1)

Voor de basissituatie is gekozen voor de kostendataset van HyDelta. Deze wijkt af van de kostenset van JRC1, die bestaat uit een hoog en een laag scenario. Het verschil tussen de JRC-scenario's is de energieprijis waarmee gerekend is. In bijlage C paragraaf Betaalbaar worden verschillen tussen de HyDelta en JRC-datasets besproken. De bedragen van HyDelta en hoge JRC-scenario lopen het meest uiteen, daarom hebben we met de kosten van het JRC1 'hoog'-scenario een gevoeligheidsanalyse gedaan.

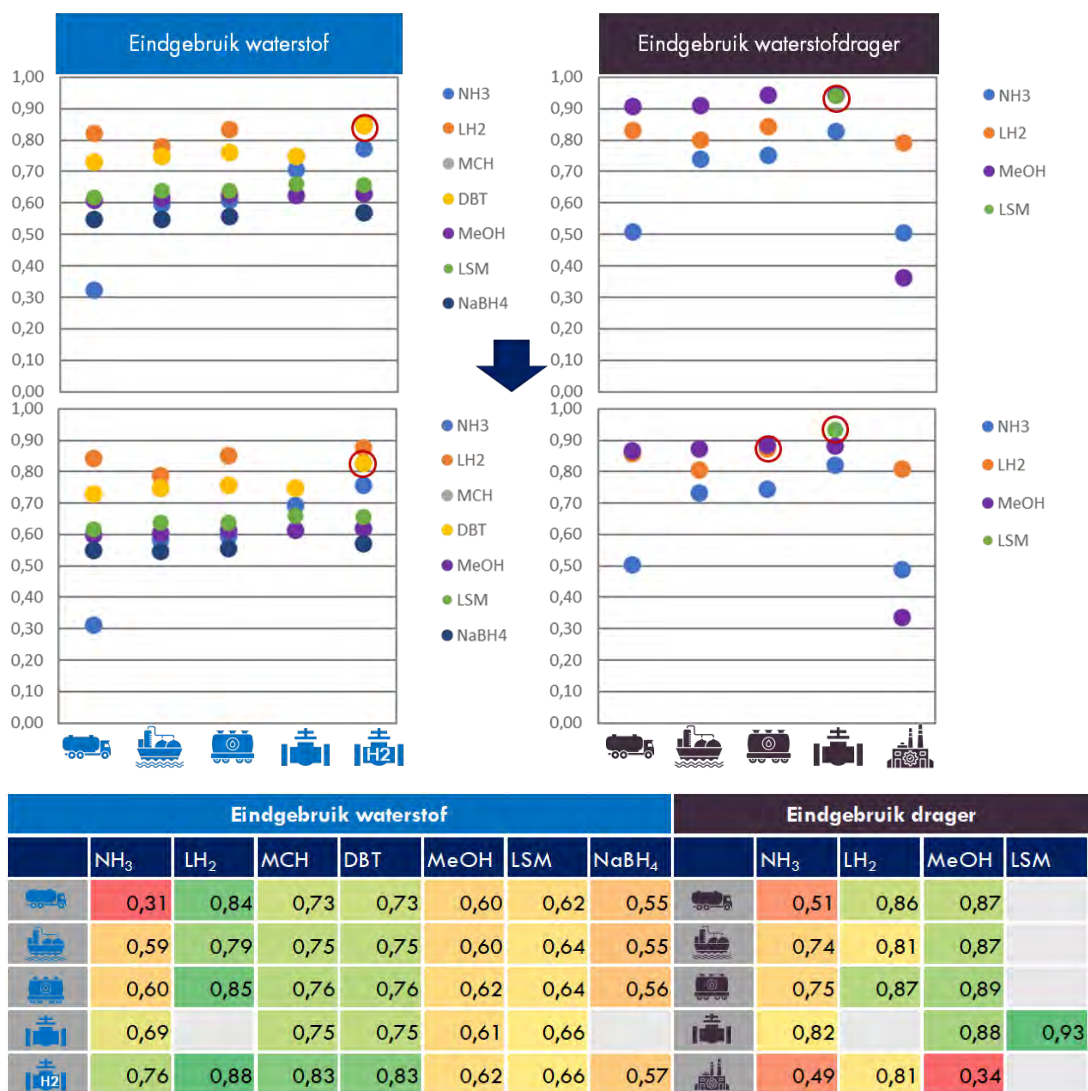
Aanpassingen voor gevoeligheidsanalyse kosten

- In plaats van kostendata voor import en conversie van HyDelta gebruiken we de data van het hoge scenario van JRC1 voor vloeibare waterstof, ammoniak, methanol en de LOHC's.
- De methanoldata zijn gecorrigeerd voor de kosten van DAC. Er wordt voor de synthese in 2030 uitgegaan van CO₂ uit een industriële puntbron.
- Voor LSM en natriumboorhydride zijn de kostencijfers niet aangepast.
- De JRC-kosten voor dragers liggen veel hoger voor methanol (ong. 90%) en ammoniak (ruim 60%), iets hoger voor LOHC (ong. 15% hoger) en voor vloeibare waterstof ruim 10% lager.

Het effect van de wijziging van kosten op de overall score is tamelijk beperkt. Vloeibare waterstof krijgt iets hogere en de LOHC's, methanol en ammoniak krijgen iets lagere scores vanwege de lagere respectievelijk hogere kostprijs. De scores van LSM en natriumboorhydride blijven gelijk.

Bij eindgebruik van waterstof zakken de scores van de ketens met de LOHC's vanwege de hogere kostprijs en liggen niet meer op gelijke hoogte met vloeibare waterstof in geval van centrale conversie (kolom 5 linkergrafiek). Vloeibare waterstof krijgt in alle situaties een hogere positie door de 10% lagere veronderstelde kostprijs.

Bij eindgebruik van de drager haalt LSM de hoogste score in plaats van methanol via buisleidingen omdat de kostprijs van methanol is gestegen en die van LSM gelijk gebleven. Verder stijgt vloeibare waterstof en daalt methanol door de veranderingen in kostprijs. Voor de modaliteit weg en spoor komen vloeibare waterstof en methanol nu op ongeveer hetzelfde niveau uit.



Figuur 87: Gevoeligheidsanalyse alternatieve kostendata; waterstof eindgebruik en eindgebruik drager (onder) ten opzichte van basissituatie 2030 (boven)

VERGELIJKING WATERSTOFDRAGERS
DEEL D: CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

HOOFDSTUK 8 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk trekken we conclusies uit de in het vorige hoofdstuk gepresenteerde resultaten voor de basissituatie, de varianten eindgebruik in de importhaven, doorvoer en export naar buurlanden en basissituatie 2050, en de gevoeligheidsanalyses. Ook trekken we conclusies voor de onderscheiden type gebruikers en gaan we in op mogelijke knelpunten voor inpassing van de leveringsketens in Nederland. Tenslotte doen we aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

8.1 CONCLUSIES

De resultaten laten zien dat er meerdere leveringsketens zijn met een goede eindscore. Verschillen zijn vaak klein (honderdsten op de schaal van 0 tot 1) en worden beïnvloed door de weging van de publieke belangen, de aannames voor de modellering en de, ondanks diepgaande analyse van de literatuur, aangetroffen onzekerheden in de datasets. Op termijn kunnen de eindscores en de rangordes door o.a. innovaties veranderen. Welk alternatief de hoogste score krijgt, hangt ook af van het soort eindgebruik dat wordt beoogd en van de locatie van de eindgebruiker. Als zich een brede waterstofmarkt ontwikkelt, lijkt er daarom ruimte te zijn voor verschillende soorten dragers en verschillende leveringsketens.

8.1.1 *Conclusies voor gebruik waterstofgas of direct gebruik drager*

Direct eindgebruik van de waterstofdrager krijgt over het algemeen een hogere score dan gebruik van waterstof na conversie van de drager. Dit geldt met name voor methanol en LSM omdat bij eindgebruik als drager geen uitstoot van broeikasgassen bij *steam reforming* plaatsvindt. NB. Bij het buiten scope van dit onderzoek geplaatste eindgebruik kunnen alsnog broeikasgassen vrijkomen.

Direct gebruik van een waterstofdrager waarvoor decentrale synthese bij de eindgebruiker plaatsvindt met waterstof uit het landelijke net heeft een lagere score dan de andere leveringsketens voor direct eindgebruik.

8.1.2 *Conclusies voor locatie conversie*

Centrale conversie in de importhaven heeft een voordeel boven decentrale conversie in het binnenland. Centrale conversie voorkomt kosten, energieverlies en emissies tijdens transport, en de omgevingsrisico's van het transport. Centrale conversie van dragers naar waterstof in de importhaven en transport via het waterstofnet levert daarom een hogere score op dan leveringsketens met decentrale conversie in het binnenland.

Leveringsketens op basis van decentrale synthese met waterstof uit het waterstofnet krijgen de laagste eindscores, behalve in het geval van vloeibare waterstof. De lage eindscore komt door de kosten en externaliteiten van de extra ketenstap synthese; in het geval van de vloeibare waterstof zijn die beperkt.

8.1.3 *Conclusies voor locatie eindgebruik*

Uit de vergelijking van de basissituatie met de variant importhaven, de variant doorvoer en export en de gevoeligheidsanalyse opslag en conversie buitengaats blijkt dat de locatie van eindgebruik invloed heeft op de hoogte van de score en op de rangorde. Zowel bij eindgebruik in de haven als bij eindgebruik in het buitenland liggen de scores hoger dan bij gebruik in Nederland op 200 km afstand van de

importhaven (de basissituatie). Dit komt doordat de nadelige effecten van de leveringsketen (het transport en decentrale conversie) deels wegvallen. Bij opslag en conversie buitengaats zijn de scores van enkele ammoniakketens hoger dan in de basissituatie doordat de blootstelling aan veiligheidsrisico's vermindert.

De rangorde van de verschillende dragers blijft min of meer gelijk ongeacht of de eindgebruiker in de haven, op 200 km afstand of in de buurlanden zit. De dragers met de hoogste scores blijven vloeibare waterstof en de twee LOHC's voor eindgebruik van waterstofgas, en methanol en LSM voor eindgebruik van de drager.

Importhaven

Eindgebruik in de haven heeft de hoogste scores door het (vrijwel) wegvallen van kosten en externaliteiten van binnenlands transport. De distributie in de haven naar eindgebruikers verloopt immers over zeer korte afstanden zodat dit minimale effecten (in het rekenmodel op nul afgerond) heeft op de scores.

De scores van de verschillende dragers worden beperkt beïnvloed door de modaliteit. Hierdoor leidt het wegvallen van de effecten van binnenlands transport bij eindgebruik in de haven niet tot een grote verschuiving. Hierop zijn twee uitzonderingen.

- Het binnenlands transport is sterk bepalend voor de score op Veilig. De ammoniakketens met binnenlandse transport van ammoniak krijgen daarom een lagere score door het risico op een incident met een gifwolk. Als deze ketenstap wegvalt verbetert de score voor ammoniak meer dan voor andere dragers.
- De tweede uitzondering betreft de twee LOHC's. Door het grotere aantal transportbewegingen vanwege het lage waterstofgehalte voor conversie en de noodzaak voor een dubbele set buisleidingen vanwege de retourstroom is de invloed van het binnenlands transport voor deze dragers groter. Het wegvallen hiervan zorgt voor een relatief grote verbetering voor het transport per buis, spoor, weg en water.

Doorvoer en export naar Duitsland

Bij eindgebruik in buurlanden na doorvoer en export vallen de effecten van de ketenstappen decentrale opslag bij de eindgebruiker en conversie in Nederland weg (indien van toepassing). Hierdoor krijgen verschillende leveringsketens een iets hogere score. Dit heeft het grootste effect voor de ammoniakketens en de LOHC's. De score voor ammoniak wordt gunstiger omdat het veiligheidsrisico, de milieu-emissies en het ruimtebeslag afnemen (voor de decentrale opslag en conversie komen deze in het buitenland terecht).

Andere effecten zijn dat er minder risicovolle investeringen (Adaptief) in Nederland nodig zijn dan in de basissituatie en dat de toegevoegde waarde (Economische Krachtig) voor Nederland afneemt. De lagere toegevoegde waarde veroorzaakt een lagere score, maar de hogere score op de andere publieke belangen zorgt per saldo voor een hogere score dan in de basissituatie. Ook de LOHC's krijgen bij doorvoer en export een hogere score dan bij eindgebruik in Nederland. Vooral het lagere ruimtebeslag in Nederland (Ruimte) en de lagere risicovolle investeringen (Adaptief) zijn hiervoor verantwoordelijk.

De scores voor leveringsketens waarbij geen sprake is van decentrale conversie en opslag verschillen in principe⁶⁶ niet van de basissituatie. Dit is bij eindgebruik van waterstof het geval voor de leveringsketens met centrale conversie en bij direct eindgebruik van de drager voor transport via buisleiding

Opslag en conversie buitengaats

Als opslag en conversie buitengaats plaatsvinden op een olie- of gasplatform, energie-eiland of drijvende installatie op de Noordzee verbetert de eindscore voor de ammoniakketens. De keten met buitengaats conversie krijgt een bijna even hoge score als de ketens van vloeibare waterstof en de LOHC's met centrale conversie. Dit komt doordat er minder impact is in geval van incidenten (omgevings- en cyberveiligheid en terrorisme), en minder impact van milieu-emissies. Er is geen noemenswaardig netto effect op de resultaten voor de andere dragers: de effecten op die scores zijn hiervoor te klein. De conclusie is dat buitengaats opslag en conversie zinvol kan zijn voor dragers met een hoog veiligheidsrisico.

8.1.4 Conclusies voor gebruik modaliteit

De resultaten tonen een voordeel voor leveringsketens die gebruik maken van het waterstofnet na conversie in de importhaven. De volgorde van modaliteiten per waterstofdrager is over het algemeen dat ketens via het waterstofnet de hoogste scores hebben, gevolgd door ketens met buistransport van de drager. Daarna komen doorgaans ketens met vervoer per spoor of schip, en tenslotte wegtransport.⁶⁷ Deze volgorde geldt ook voor ketens met eindgebruik van de drager.

De keuze voor de modaliteit heeft een beperkte impact op de uitkomsten, behalve voor de publieke belangen Veilig, Betrouwbaar en Toegankelijk. Daarom is er voor ammoniak wel een sterk voordeel voor transport met een buisleiding (eindgebruik als drager) of het waterstofnet (eindgebruik als waterstof). Voor het publieke belang Betrouwbaar heeft transport over water een lagere score door het risico op verstoringen als gevolg van hoog- of laagwater. Op het belang Toegankelijk krijgt transport van methaangas uit LSM via het aardgasnet een hogere score dan transport van dragers via andere buisleidingen of het waterstofnet vanwege het fijnmazige netwerk en de lage transportkosten van het aardgasnet.

8.1.5 Conclusies voor typen eindgebruikers

Per type eindgebruiker worden alleen de van toepassing zijnde leveringsketens vergeleken.

Industrieclusters

Bedrijven in de vier industrieclusters in de importhavens, Chemelot in het binnenland en in industrieclusters in Duitsland krijgen in de komende jaren toegang tot het waterstofnet. Daarmee worden alle ketens waarin het waterstofnet een rol speelt toepasbaar. Als het gaat om de herkomst van de waterstof

⁶⁶ De reden dat er toch een kleine verbetering zichtbaar is bij ammoniak en vloeibare waterstof, is de hogere score voor de indicator nabijheid (Toegankelijk). In overleg met opdrachtgever is deze indicator bij doorvoer en export naar Duitsland niet relevant bevonden. In het model hebben alle ketens hiervoor de score 1 gekregen. Dit veroorzaakt een minieme verhoging van de eindscores.

⁶⁷ Bij vloeibare waterstof heeft transport over water een lagere score dan over de weg. De reden is de lagere score op Betrouwbaar vanwege hoog- en laagwatersituaties, de lagere score vanwege de hogere investeringen per binnenvaartschip (Adaptief) en de lagere score op Toegankelijk doordat transport over de weg voor meer eindgebruikers een optie is dan per binnenvaartschip. In geval van een andere waterstofdrager is de score op Betrouwbaar meestal hoger. Hierdoor wordt de lagere score minder zwaar aangerekend.

in het netwerk, dan is de voorkeursvolgorde uit oogpunt van gewogen publieke belangen als de waterstof uit het waterstofnet komt: vloeibare waterstof, de LOHC's, ammoniak, LSM, methanol en natriumboorhydride.

Voor een industriecluster in het binnenland of Duitsland dat langs een buisleiding voor dragers ligt is *decentrale* conversie naar waterstof ook een optie. Dit leidt in het geval van methanol- en LSM-import tot een vergelijkbare score als voor conversie in de importhaven en transport via het waterstofnet. Echter de scores zijn voor LSM en methanol beduidend lager dan voor centrale conversie van vloeibare waterstof en de LOHC's en transport via het waterstofnet. Dit komt vooral door de broeikasgasemissies in de methanol- en LSM-ketens. Oplossing van het probleem van de CO₂-uitstoot door toepassing van *direct air capture* (DAC, CO₂-afvang uit de atmosfeer) of carbon capture and storage (CCS, CO₂-afvang en opslag) kan dit veranderen. Voor ammoniak en de LOHC's is de score voor decentrale conversie na buisleidingvervoer lager dan voor de leveringsketens via het waterstofnet.

Direct eindgebruik van dragers kan nodig zijn vanwege proceseisen van de eindgebruiker (bijv. als grondstof of om bepaalde vlameigenschappen te bereiken). De mate waarin eindgebruikers flexibel zijn bij een keuze tussen meerdere dragers, verschilt per eindgebruiker. Als het gaat om gebruik als brandstof hebben gebruikers wel enige flexibiliteit om te kiezen tussen methaan, ammoniak en eventueel zelfs methanol.

Cluster-6-industrie

In tegenstelling tot de industrieclusters zullen de cluster-6-bedrijven veelal niet op korte termijn aan het waterstofnet aansluiten. Deze bedrijven zullen via weg, water, spoor of buisleiding van dragers moeten worden voorzien.

Als cluster-6-bedrijven de keuze hebben, heeft centrale conversie en transport via het waterstofnet in vrijwel alle gevallen een hogere score. Geen toegang hebben tot het waterstofnet is dus uit oogpunt van de gewogen publieke belangen een nadeel. Als gunstigste opties voor cluster-6-bedrijven zonder aansluiting op het waterstofnet komen vloeibare waterstof en de LOHC's uit de bus, op enige afstand gevolgd door LSM en methanol, ammoniak en natriumboorhydride. De modaliteit met de hoogste scores na het waterstofnet is de (meestal evenmin beschikbare) buisleiding, gevolgd door transport via spoor, water en weg.

Voor direct eindgebruik van de drager is de vergelijking met andere dragers niet relevant in geval van gebruik als grondstof omdat de rol van de drager in het productieproces doorslaggevend is voor de keuze, zie bij industrieclusters.

Kunstmestindustrie

Voor de kunstmestindustrie die ammoniak nodig heeft, krijgen direct gebruik in de haven, aanvoer van ammoniak met een buisleiding en aanvoer per binnenvaart (zonder conversie voordat de grondstof de fabriek bereikt) een hogere score op de gewogen publieke belangen dan ammoniaksynthese uit het waterstofnet (met zowel conversie als decentrale synthese in Nederland). De conversies verhogen de kosten, het energieverlies, de emissies, het ruimtegebruik en de omgevingsrisico's van de betreffende leveringsketen. Ammoniaksynthese met waterstof uit *steam reforming* van methaangas uit LSM zal (hoewel als samengestelde keten niet expliciet onderzocht) waarschijnlijk ook een lagere score krijgen omdat sprake is van meerdere conversiestappen.

Elektriciteitscentrales

Voor CO₂-vrije flexibele elektriciteitsopwekking heeft direct gebruik van methaangas uit LSM – met transport via het aardgasnet – in een elektriciteitscentrale de hoogste score op de gewogen publieke belangen, gevolgd door gebruik van waterstof via het waterstofnet afkomstig uit vloeibare waterstof en de twee LOHC's.

Direct gebruik in een elektriciteitscentrale van ammoniak na buisleidingvervoer heeft een hogere score dan gebruik van waterstof uit ammoniak na centraal kraken, maar een lagere score dan van waterstof uit centraal verdampte vloeibare waterstof en de twee LOHC's. De aanvoer van ammoniak per binnenvaartschip heeft een lagere score dan gebruik van waterstof uit ammoniak na centrale conversie. Hierbij gaan we uit van een vergelijkbaar energierendement bij verbranding van waterstof, methaan en ammoniak. Decentraal eindgebruik van ammoniak na transport via weg, water of spoor levert aanmerkelijk lagere scores op dan direct gebruik na buisleidingtransport, met name door de lagere score van deze modaliteiten op het publieke belang Veilig (vanwege het risico op een gifwolk en het risico van verkeersongevallen).

Wegtankstations

Voor levering aan wegtankstations is vloeibare waterstof met tankauto's meestal het alternatief met de hoogste score, voor klanten van zowel vloeibare als gecomprimeerde waterstof. De route via het waterstofnet, als we rekening houden met een extra zuiveringsstap, is alleen gunstiger dan vloeibare waterstof via de weg als de waterstof in het netwerk afkomstig is van vloeibare waterstof of de LOHC's. Op veel plekken in Nederland zal het waterstofnet te ver weg liggen om tankstations hierop aan te sluiten. Waar de afstand klein is, zullen de kosten van aansluiting vaak prohibitief zijn. In de meeste gevallen is levering in de vorm van vloeibare waterstof daarom een beter alternatief.

Bunkerstations

Voor bunkeren van de scheepvaart is de conclusie dat levering van methanol en vloeibare waterstof met tankwagens of bunkerschepen (eventueel aan vaste bunkerstations) een hogere score heeft op de gewogen publieke belangen dan soortgelijke levering van ammoniak.

8.1.6 Conclusies voor verschillen zichtjaren

In de variant 2050 profiteren LSM en methanol sterk van de vermindering van CO₂-uitstoot door het gebruik van DAC in plaats van een industriële puntbron als bron voor CO₂ bij de synthese. Hierdoor verandert de rangorde in 2050 ten opzichte van de basissituatie in 2030. Methanolketens krijgen ook bij eindgebruik van waterstof de hoogste scores en LSM-ketens krijgen aan de LOHC's vergelijkbare scores. Over de hele linie vallen de scores iets hoger uit. Dit komt door de verwachte procesverbeteringen (energie-efficiëntie, kostenniveau) en doorontwikkeling van de *technology readiness levels*. De aanname van *net-zero*-emissietransport voor de zeevaart verbetert de positie van alle ketens, en vooral die met veel transportvolume zoals voor de LOHC's. Leveringsketens van natriumboorhydride krijgen een hogere score door lagere energiekosten dan in de basissituatie.

De verwachte toename van het (import)volumen leidt niet tot een verandering in rangordes, maar is wel relevant in de fysieke leefomgeving in verband met grenzen aan de capaciteit van weg, spoor en binnenvaart en beschikbare ruimte. Dit aspect valt buiten scope van deze studie.

8.1.7 Conclusies voor dominante factoren eindscores

Dominante factoren voor de eindscores zijn de stoffeigenschappen, de importkosten van de drager, de weegfactoren, en voor LSM en methanol het toepassen van CCS of DAC. De modaliteitskeuze en de

kosten van de ketenstappen in Nederland hebben een kleinere invloed op de totale score, net als de transportafstand over zee en het gebruik van progressievere aannames voor de ontwikkeling van de energie-efficiëntie van conversie- en syntheseprocessen.

Effect van stofeigenschappen

Voor de eindscores sterk bepalende kenmerken van de dragers zijn hoe groot de veiligheidsrisico's (publiek belang Veilig) zijn, of er broeikasgas- (Duurzaam) en overige emissies (Milieu) optreden, hoe energie-intensief (Duurzaam) de conversie is en hoe in de daarbij benodigde energie wordt voorzien (elektrisch, gebruik van de drager, restwarmte). Soortelijk gewicht en waterstofgehalte van de dragers voor conversie zijn medebepalend voor het importvolume, en dat is een grootheid die doorwerkt op (bijna) alle publieke belangen.

- *Veilig en Milieu*: Ammoniak komt lager in de rangorde vanwege de door de Delphi-groep zwaar gewogen lage score op de publieke belangen Veilig en Milieu en de door de groep licht gewogen lage score op Rechtvaardig. De hoogste score voor een ammoniakketen is in het geval van direct eindgebruik na buistransport en in geval van gebruik van waterstofgas na centrale conversie en transport via het waterstofnet. De experts schatten ketens met transport van ammoniak door buisleidingen als veiligste in. Als waterstofgas nodig is dan is het veiliger om de waterstof via het waterstofnet te transporteren na centrale conversie van ammoniak. Transport over de weg van ammoniak krijgt juist een zeer lage score.
- *Duurzaam (broeikasgas)*: De koolstofhoudende dragers methanol en LSM krijgen bij eindgebruik van waterstof een lagere score doordat er bij *steam reforming* CO₂-uitstoot is.⁶⁸
- *Duurzaam (energieverlies en materiaalgebruik)*: Natriumboorhydride ondervindt een sterk nadeel op het publieke belang Duurzaam vanwege het hoge energieverlies bij de productie en terugwinning van het dragermateriaal (in het exportland) en het hoge materiaalgebruik.

Zie ook paragraaf 8.1.8 voor afzonderlijke waterstofdragers.

Effect importkosten

Importkosten zijn sterk bepalend voor de totaalkosten en de score op het publieke belang Betaalbaar. Ketenstappen in Nederland hebben een veel kleinere impact op kosten. Ammoniak en methanol profiteren hiervan omdat deze de laagste importkosten hebben volgens de gekozen brondata (HyDelta). Het voordeel van deze lage importkosten is groter dan het nadeel dat een deel van deze dragers in het conversieproces wordt ingezet voor proceswarmte. De ketens met natriumboorhydride ervaren juist een nadeel door hoge importkosten.

In de literatuur verschillen de kosten aanzienlijk. Er is daarom een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met een andere bron voor de kostendata. Het gebruik van de JRC-kostendata (hoge scenario) zorgt voor kleine verschuivingen in de scores. Ketens met ammoniak en methanol (beide duurder in JRC dan in HyDelta) krijgen een iets lagere score en met vloeibare waterstof (duurder in HyDelta dan in JRC) een iets hogere score. De ketens met de hoogste scores voor eindgebruik van waterstofgas en van de waterstofdrager blijven dezelfde maar de onderlinge volgorde verandert; ketens met vloeibare waterstof

⁶⁸ Als het eindgebruik van methanol of methaan verbranding betreft komt er alsnog CO₂ in de atmosfeer. Als de methanol en methaan gebruikt worden als grondstof wordt de koolstof langer vastgelegd, afhankelijk van het product.

(eindgebruik waterstof) en LSM (eindgebruik drager) staan hoger, en met de LOHC's (eindgebruik waterstof) en methanol (eindgebruik drager) iets lager.

Effect weegfactoren

De weging van de publieke belangen heeft grote invloed op de eindscores. Deze impact van de weging blijkt uit de drie gevoeligheidsanalyses die hiervoor zijn uitgevoerd met variaties op de Delphi-weging. Enkele *highlights* van de optredende verschillen zijn de volgende:

- *Neutrale weging*: Bij gelijke weging van alle publieke belangen heeft methanol over de weg de hoogste score bij eindgebruik van waterstof (in plaats van vloeibare waterstof na centrale conversie) en LSM via het aardgasnet bij eindgebruik van de drager blijft de hoogste score houden.
- *Betaalbaar voorop*: Verdubbeling van het gewicht van het publieke belang Betaalbaar en halvering van de publieke belangen Veilig en Duurzaam ten opzichte van de weegfactoren uit het Delphi-proces, leiden ertoe dat ammoniak dicht bij de alternatieven met de hoogste scores komt. Ammoniak centraal of na buistransport decentraal gekraakt krijgt zelfs de hoogste score voor eindgebruik van waterstof.
- *100-puntenverdeling*: Bij de weging volgens een 100-puntenverdeling verbetert vooral de score voor ammoniak. Bij eindgebruik van waterstof sluit ammoniak aan bij de groep met hoogste scores, behalve bij transport over de weg. Bij eindgebruik van de drager blijven methanol en LSM de hoogste scores houden.

Effect CO₂-afvang en opslag (CCS)

De eindscores voor koolstofhoudende dragers zijn sterk gevoelig voor het al dan niet toepassen van CCS. Het afvangen en opslaan van CO₂ bij conversie naar waterstof is per saldo zeer gunstig voor methanol en LSM. Levering via het waterstofnet van waterstof afkomstig van methanol krijgt een even hoge score als levering via het waterstofnet van waterstof afkomstig van vloeibare waterstof en een hogere score dan na decentrale conversie van vloeibare waterstof bij transport over de weg, het spoor of water. Met CCS behaalt ook LSM een hoge score. Eenzelfde effect is zichtbaar op termijn als wordt uitgegaan van DAC bij de synthese van deze dragers.

De conclusie is dat import van methanol en LSM voor eindgebruik als waterstof uit oogpunt van publieke belangen pas interessant wordt als CCS toegepast wordt in de keten of als DAC een reële optie is (in 2050). Dat geldt waarschijnlijk ook voor afvang van de CO₂ voor benutting bijvoorbeeld als chemiegrondstof (CCU), maar dat valt buiten scope van dit onderzoek.

Effect transportafstand

Als dragers van verder weg ingevoerd worden (bijvoorbeeld uit Argentinië in plaats van Marokko) is er weinig effect op de eindscores. De meeste scores dalen iets door de hogere kosten en emissies van het langere scheepstransport. Op de verhoudingen tussen de verschillende ketens hebben de aanpassingen weinig effect. De conclusie is dat een langere transportafstand nauwelijks invloed heeft op de scores en ranking.

Progressieve aannames 2050

Progressievere aannames voor de afname van het energieverlies voor de conversieprocessen hebben weinig invloed op de onderlinge verhouding van de ketens. Hoewel de scores wel iets hoger uitvallen wanneer de drager gebruikt wordt als brandstof in conversieprocessen (in het geval van ammoniak, methanol en LSM), heeft dit geen effect op de ranking. De conclusie is dat de progressievere aannames weinig impact hebben op de eindscores.

8.1.8 Conclusies voor afzonderlijke dragers

Aanvullend op de eerder getrokken conclusies kunnen we op basis van de multicriteria-analyse ook specifieke conclusies over de verschillende dragers trekken.

Vloeibare waterstof

Vloeibare waterstof heeft in verschillende situaties de hoogste of in ieder geval een hoge score, en komt dus goed tegemoet aan de verschillende publieke belangen. Vloeibare waterstof moet er echter wel in voldoende mate zijn. Op dit moment is het *technology readiness level* van de verschillende ketenstappen nog een uitdaging. Zolang er nog onvoldoende import- en distributiemogelijkheden zijn, zal er daarom naar alternatieven moeten worden gekeken. Een risico zijn de waterstofemissies bij processtappen en lekkage. Als deze in de praktijk veel hoger zijn dan nu aangenomen, kan dit de scores verlagen.

LOHC's

De LOHC's hebben net als vloeibare waterstof hoge scores en zijn makkelijk in te passen in bestaande en vrijkomende infrastructuur. Wel is sprake van een retourstroom van de waterstofarme variant en een laag waterstofgehalte voor conversie per massa-eenheid. Hierdoor is er tweemaal zoveel opslag nodig en is het transport minder efficiënt. Dit heeft vooral bij buisleidingtransport een grote impact, omdat de standaard diameter voor bestaande buisleidingen die voor de LOHC's geschikt zouden kunnen zijn kleiner is dan voor andere dragers. Ook is er een retourbuisleiding nodig. De LOHC's krijgen daarom een veel hogere score bij centrale conversie in de importhaven dan bij transport van de drager.

Methanol

Methanol heeft in de basissituatie een score in de middenmoot bij conversie naar waterstof maar bij direct gebruik van de drager, bij gebruik van CCS en in variant 2050 (met DAC) juist de hoogste score. De conclusie is dat import van methanol voor *eindgebruik als waterstof* uit oogpunt van publieke belangen pas interessant wordt als CCS toegepast wordt in de keten of de CO₂ via DAC wordt verkregen. Dat geldt waarschijnlijk ook voor afvang van de CO₂ voor benutting bijvoorbeeld als chemiegrondstof (CCU), maar dat valt buiten scope van dit onderzoek. In theorie is ook nog combinatie van CCS en DAC mogelijk. Dit niet verder onderzocht.

Bij direct eindgebruik van methanol krijgt transport via buisleiding of spoor de hoogste score. Dit komt door de iets lagere transportrisico's (Veilig) en de iets lagere kosten per ton voor het achterland (Betaalbaar en Toegankelijk). Transport per binnenvaartschip heeft een nadeel als gevolg van de laag- en hoogwatersituaties (Betrouwbaar). Methanol als waterstofdrager kan al op korte termijn worden ingepast.

LSM

LSM heeft net als methanol in de basissituatie bij conversie naar waterstof een score in de middenmoot maar bij direct gebruik van de drager, bij gebruik van CCS en in variant 2050 een veel hogere score. De conclusie is dat import van LSM voor eindgebruik als waterstof interessant wordt als het CO₂-probleem wordt opgelost. In dat geval is LSM een optie die al op korte termijn kan worden ingezet (mits CCS beschikbaar is) en die dan een hoge score heeft op het gebied van Betrouwbaar (weinig risico's door de bestaande fossiele keten), en Toegankelijk (beperkte meerkosten achterland). Op de andere publieke belangen heeft LSM een score vergelijkbaar met andere dragers met een hoge eindscore.

Ammoniak

Groene ammoniak komt op korte termijn al beschikbaar, ingepast in de voor grijze ammoniak ontwikkelde infrastructuur. Het heeft een lage score op Veilig, een publiek belang dat in de Delphi-weging zwaar wordt gewogen. Hierdoor valt de eindscore ondanks hoge scores op andere belangen laag uit. Vanwege de lage score op Veilig is er een duidelijke voorkeur voor centrale conversie, mogelijk buitengaats, en transport via het waterstofnet bij eindgebruik van waterstof. Bij direct gebruik van ammoniak is de optie waterstofnet gevolgd door decentrale synthese bij de eindgebruiker vanuit de publieke belangen minder wenselijk. Gebruik van ammoniak in de importhaven en daarna binnenlands transport per buisleiding hebben dan de voorkeur om de risico's van een mogelijke gifwolk zoveel mogelijk te beperken. Als er (nog) geen ammoniakbuisleiding is, zijn de leveringsketens met de hoogste scores voor direct eindgebruik die met transport per spoor of binnenvaartschip.

Natriumboorhydride

Natriumboorhydride heeft hoge scores op Milieu (nauwelijks milieuemissies), Veilig (kleine risico's omdat het explosiegevaar laag is bij droge opslag) en Rechtvaardigheid (omdat de externe kosten een fractie van de kostprijs vormen). Desalniettemin heeft het een lage eindscore vanwege de hoge kosten en het hoge energieverlies en materiaalgebruik. De specifieke eigenschappen van natriumboorhydride, waaronder de vaste vorm die het geschikt maakt voor langdurige opslag van energie, maken de drager in potentie goed bruikbaar voor nichetoepassingen. Zolang de energie in het buitenland niet gratis is en boor een kritieke grondstof is, blijft natriumboorhydride echter een relatief lage score houden. Ook ligt er nog een ontwikkelingsopgave: de recyclingstap is nog niet op grote schaal gedemonstreerd. Daarnaast geldt er een verbod in de EU om natriumboorhydride in bulk te transporteren.

8.1.9 Conclusies knelpunten bij implementatie

De eindscores geven de wenselijkheid van de ketens uit oogpunt van publieke belangen aan. In deze studie is geen rekening gehouden met de vraag of de noodzakelijke volumes en infrastructuur tijdig gerealiseerd kunnen en mogen worden (met uitzondering van de aandacht voor technische volwassenheid bij Betrouwbaar). Voor succesvolle inpassing van de leveringsketens kan het nodig zijn knelpunten op te lossen, bijvoorbeeld:

- *Netcongestie*: Opties waarvoor in Nederland veel (elektrische) energie gebruikt moet worden (met name voor conversies) hebben een nadeel, met name als die elektriciteit in het binnenland nodig is waar veelal transportcapaciteit van het elektriciteitsnet beperkt beschikbaar is. Dit is relevant voor de dehydrogenering van de LOHC's, het kraken van ammoniak, binnenlandse synthese van ammoniak en methanol, en liquefactie van waterstof. Deze processen vinden volledig of deels op basis van elektriciteit plaats.
- *Transportcapaciteit van verschillende infrastructuren*: Dragere waarvoor grote volumes via wegen, spoorwegen en waterwegen met beperkte transportcapaciteit moeten stromen, hebben een nadeel (fysieke capaciteit en capaciteit basisnet).
- *Ruimtebeslag*: Ketens met een groot ruimtebeslag hebben een nadeel. Dit betreft zowel fysieke ruimte voor buisleidingen en opslag als milieuruimte (stikstof) en veiligheidsruimte (risicocontouren). Dit geldt met name voor de twee LOHC's.
- *Ingroeipad bij buizen*: Er is een risico op overcapaciteit als stromen tegenvallen, een eenmaal gelegde buis is immers niet schaalbaar zoals andere modaliteiten. Ketens die het aardgasnet of het waterstofnet gebruiken hebben dit nadeel niet meer omdat de investeringen al gedaan zijn respectievelijk de investeringsbeslissing is genomen.

- *Synergie met bestaande assets:* Dit aspect is niet expliciet onderzocht, bijvoorbeeld het benutten van beschikbare restwarmte voor proceswarmte bij conversies, of andersom het benutten of verkopen van vrijkomende warmte of het delen van havenfaciliteiten voor import van waterstofdragers.

Individuele bedrijfs-/sectorbelangen en -voorkeuren zijn niet onderzocht. Het lijkt aannemelijk dat bedrijven de commerciële belangen – kostprijs, maximale CO₂-reductie per euro, beschikbaarheid (leveringszekerheid) – zwaarder wegen dan andere publieke belangen (zoals Veilig, Milieu, Rechtvaardig). Die commerciële belangen zijn bepalend voor de economische levensvatbaarheid van leveringsketens. Bij een zwaardere weging van die belangen in de multicriteria-analyse veranderen de eindscores.

8.2 AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

Gedurende het onderzoek zijn we op verschillende vragen en witte vlekken gestuit. Een deel daarvan is meegenomen in het onderzoek, maar binnen de doorlooptijd van de studie was het niet mogelijk al deze punten tijdens de uitvoering op te pakken. Deze punten hebben we daarom opgenomen als aanbeveling voor verder onderzoek.

1. *Nader onderzoek naar nauwkeurigere inschatting waterstofemissies buisleidingen:* De literatuur vertoont een grote bandbreedte van geschatte waterstofemissies uit buisleidingen. JRC hanteert 0,4%, sommige NGO's gaan uit van nog hogere percentages, terwijl de MKBV uitgaat van de door Gasunie geleverde waarde 0,01%. De onderbouwing door Gasunie voor deze lage waarde (gebaseerd op de huidige lekkage van methaan in Gasunie-leidingen en de mogelijkheid om nu best beschikbare technologie te gebruiken) heeft ons overtuigd om deze waarde over te nemen. Nader onderzoek naar deze verschillen is aan te bevelen.⁶⁹
2. *Nieuwe dragers en actualisatie van data: elke drie tot vier jaar herhalen.* Vanuit sommige stakeholders is een pleidooi gekomen voor mierenzuur ('hydrozine'). Deze stof zou een hoge score kunnen krijgen op verschillende publieke belangen, maar omdat er geen importplannen voor zijn en ook geen bekende exportambities in waterstof-producerende landen, is deze drager afgefallen. Mocht hier verandering in komen dan zou deze drager kunnen worden toegevoegd aan de te onderzoeken set. Dit geldt ook voor nieuwe LOHC's, mits er voldoende informatie over bekend is om ze daadwerkelijk te kunnen beoordelen.
3. *Toetsen / verifiëren omgevingsveiligheid:* Voor het beoordelen van het risico van incidenten is de methodiek van het regionale risicoprofiel en de rijksbrede risicoanalyse nationale veiligheid beschikbaar. Deze methodiek is zeer uitgebreid en is daarom in deze MCA-studie vereenvoudigd toegepast, voor een beperkt aantal mogelijke incidentscenario's in de Nederlandse ketenstappen met uitzondering van eindgebruik, en voor abstracte in plaats van specifieke geografische locaties. Het is aan te bevelen om de inschatting van de veiligheidsrisico's te verdiepen zonder de vereenvoudiging en voor specifieke geografische locaties, samen met de regionale veiligheidsdiensten en industrieclusters.
4. *Uitwerken LOHC-verschillen:* Er is een breed spectrum van LOHC's. We hebben gekozen voor DBT en MCH omdat hier de meeste gegevens voor te vinden waren, maar deze zijn verspreid over meerdere datasets. HyDelta (kosten) heeft gerekend met MCH, terwijl JRC

⁶⁹ Dit wordt ook aanbevolen door het Environmental Defense Fund: "Current hydrogen leak estimates vary by up to 100-fold. We need to know more before betting the farm." (EDF Blogs, 16 August).

DBT als uitgangspunt nam (kosten, energieverlies, *life-cycle*-analyse). Ontbrekende data voor de ene LOHC hebben we soms bij gebrek aan beter geleend van de andere LOHC. Bijlage H zet de gehanteerde data voor DBT en MCH naast elkaar. In vervolgonderzoek zou het wenselijk zijn om de datasets voor beide gekozen LOHC's (en eventueel aangevuld met nieuwe kansrijke LOHC's) te verbeteren zodat duidelijker wordt in hoeverre en op welke wijze zij ten opzichte van elkaar verschillen.

LITERATUURLIJST

- Abdin, Zainul, Chunguang Tang, Yun Liu and Kylie Catchpole (2021), Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers, *iScience* 24, 102966, September 24.
- Agora Industrie, Technische Universität Hamburg (2023), Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland. Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenkreislauf, September.
- Ainee, Ibrahim, Mark Pakevicius and Craig E. Buckley (2023), Chemical compression and transport of hydrogen using sodium borohydride, *Sustainable Energy & Fuels*, 2023, 7, 1196-1203.
- Analistennetwerk Nationale Veiligheid (2022), Rijksbrede Risicoanalyse Nationale Veiligheid.
- Arcadis, Gemini Consultants, Houdijk Advies, Stichting Werkgemeenschap tussen Techniek en zorg (2009), Handreiking regionaal risicoprofiel.
- Arcadis, Berenschot (2021), Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers, 65256, 4 oktober.
- Aziz, Muhammad, Takuya Oda, Takao Kashiwagi (2019), Comparison of liquid hydrogen, methylcyclohexane and ammonia on energy efficiency and economy, 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22-25 August 2018, Hong Kong, China, *Energy Procedia* 158 (2019), 4086-4091.
- Balcombe, Paul, Dalia A. Heggo and Matthew Harrison (2022), Total Methane and CO₂ Emissions from Liquefied Natural Gas Carrier Ships: The First Primary Measurements, *Environ. Sci. Technol.* 2022 Jul 5; 56(13): 9632–9640, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01383>
- Bargiacchi, Eleonora, Nils Thonemann, Jutta Geldermann, Marco Antonelli and Umberto Desideri (2020), Life Cycle Assessment of Synthetic Natural Gas Production from Different CO₂ Sources: A Cradle-to-Gate Study, *Energies*, September 2020, 13, 4579.
- Basu, Shankar and Schroeder, Roger G. (1977), "Incorporating Judgments in Sales Forecasts: Application of the Delphi Method at American Hoist & Derrick," *Interfaces*, INFORMS, vol. 7(3), pages 18-27, May.
- Berenschot, Arcadis (2024), MKBV waterstofdragers, 23 februari.
- Besier, Jorick, Marc Marsidi (2020), Decarbonisation options for the Dutch ceramic industry, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO, 21 December.
- Busch T. et al. (2023), The role of liquid hydrogen in integrated energy systems. A case study for Germany, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, Issue 99, 25 December, Pages 39408-39424, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.308>
- CE Delft (2019), Handbook on the external costs of transport.

- CE Delft (2021), STREAM Goederenvervoer 2020. Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer – Versie 2, februari.
- CE Delft (2022), Toekomstverkenning, De prijs van een reis, Verkennende analyse richting 2050, mei.
- CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts, februari.
- Clean Hydrogen Partnership (2023a), Study on hydrogen in ports and industrial coastal areas – Report 1, March.
- Clean Hydrogen Partnership (2023b), Study on hydrogen in ports and industrial coastal areas – Report 2, September.
- Clingendael International Energy Programme (2023), Relaunching Ammonia. From Fertilizer to Energy Carrier in Northwest Europe, December.
- Clematis, D., Bellotti, D., Rivarolo, M., Magistri, L., Barbucci, A. (2023), Hydrogen Carriers: Scientific Limits and Challenges for the Supply Chain, and Key Factors for Techno-Economic Analysis, *Energies* 2023, **16**, 6035, <https://doi.org/10.3390/en16166035>
- Dalkey, N. and Helmer, O. (1963). An experimental application of the DELPHI Method to the use of experts. *Management Science*, 9, 3: 458-467, <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458>
- Decisio (2023), MKBA Delta Rhine Corridor Fase 2, voor ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 22 december.
- DIW Econ, Wuppertal Institut (2020), Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung, Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e. V. (LEE-NRW), 3. November.
- DNV (2020), Study on the Import of Liquid Renewable Energy: Technology Cost Assessment, October.
- DNV (2021), Onderzoek externe veiligheid bunkeren van alternatieve brandstoffen voor de zeescheepvaart, Report No: 10246009-1, 19 april.
- E4Tech (2021), Decarbonisation potential of synthetic kerosene, Final report, for Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, May.
- E4Tech (2022), Expansion of hydrogen production pathways analysis – import chains, Report for the UK's Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS), July.
- ENTECH (2022), The role of renewable H₂ import & storage to scale up the EU deployment of renewable H₂, Fraunhofer Institut, Guidehouse, McKinsey & Company, TNO, Trinomics, Utrecht University, February.
- Environmental Defense Fund (2023): 'Known Unknown: Current hydrogen leak estimates vary by up to 100-fold', EDF Blogs, 16 August.
- Erasmus Commodity & Trade Centre, TU Delft (2023), CommodipHy. The commodification of ammonia and the role of Rotterdam as a global pricing centre. Research Report, March.
- Europese Commissie (2023), COM/2023/160 final, Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable

- supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020
- Fluor (2023), Executive summary pre-feasibility study large-scale industrial ammonia cracking plant.
- Fraunhofer ISI (2022), Conversion of LNG Terminals for Liquid Hydrogen or Ammonia. Analysis of Technical Feasibility under Economic Considerations, 3 November.
- Fraunhofer ISE (2023), Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries. A cost analysis study on behalf of H2Global, May.
- Gas for Climate, Guidehouse (2022), Facilitating hydrogen imports from non-EU countries, October.
- Gasunie (2021), HyWay27: Waterstoftransport via het bestaande gasnetwerk? Eindrapport voor het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, juni.
- Genge Lucien, Fabian Scheller, Felix Müsgens (2023), Supply costs of green chemical energy carriers at the European border: A meta-analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 19 December 2023, Pages 38766-38781, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.180>
- Godinho, João (2021), Maritime transportation of LOHCs. A greenhouse gas footprint and economic assessment of importing renewable H₂ from Portugal to the Netherlands, using liquid organic hydrogen carriers, Master thesis Utrecht University, November.
- Habibic, Ajsa (2024), Höegh LNG and Deutsche ReGas join forces for world's first floating hydrogen import terminal, *Offshore Energy*, July 1.
- Hampp J., Düren M., Brown T. (2023), Import options for chemical energy carriers from renewable sources to Germany. *PLoS ONE* 18(2): e0262340, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281380>
- HyDelta (2022), WP7B Technical analysis, D7B.3 – Cost analysis and comparison of different hydrogen carrier import chains and expected cost development, 31 March. Tevens Factsheets D7B.1 en D7B.2 en dashboard in excel.
- Hydrogen Europe (2023), Clean ammonia in the future energy system, March.
- IEA (2019), The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, June 2019. Tevens afzonderlijke Assumptions annex, December 2020.
- IEA (2021), Is carbon capture too expensive?, 21 July.
- IEA (2023), The Role of e-Fuels in Decarbonizing Transport, 23 December.
- Incer-Valverde, Jimena Ying Lyu, George Tsatsaronis, Tatiana Morosuk (2023), Economic evaluation of a large-scale liquid hydrogen regasification system, *Gas Science and Engineering* 119 (2023), 205150.
- Instituut Fysieke Veiligheid (2022). Kennisbundel transport van waterstof(dragers). Arnhem: IFV.
- IPCC (2021), AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

- IPCC (2023), AR6 Synthesis Report Climate Change 2023 for the Sixth Assessment Report during the Panel's 58th Session held in Interlaken, Switzerland from 13 - 19 March 2023.
- IRENA (2022), Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Jonkeren, O. en Francke, J. (2023), Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM, Kennisbasis Goederenvervoer, Notitie, Februari.
- JRC (2016): Techno-economic and environmental evaluation of CO₂ utilisation for fuel production. Synthesis of methanol and formic acid. JRC Science for Policy Report.
- JRC1: Joint Research Centre (2022), Assessment of Hydrogen Delivery Options Feasibility of Transport of Green Hydrogen within Europe. JRC Technical Report.
- JRC2: European Commission, Joint Research Centre, Arrigoni, A. et al (2024), *Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/5459>, JRC137953.
- Kamerbrief studie 'Omgevingsveiligheid toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers', 17 maart 2023.
- Kamerbrief Energiediplomatie en import van waterstof, 2 juni 2023.
- KiM (2023), Kennisbasis goederenvervoer 2023.
- LNG Industry (2016), VTG loads LNG tank car for first time in German port, www.lngindustry.com, 24 January.
- Serpell, Oscar, Zakaria Hsain, Amy Chu, and Walter Johnsen (2023), Ammonia's role in a net-zero hydrogen economy, Kleinman Center for Energy Policy, March.
- Kroon, Pieter (2023), Waterstofverbranding en stikstofemissies, TNO-rapport R10343 14 april.
- MENA Hydrogen Alliance (2024), Bulk Transport options for Green Molecules. Focus Area: Europe and MENA Region. White Paper.
- Methanol Institute (2023), Marine Methanol: Future-Proof Shipping Fuel.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (2023), Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur, Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang, juli.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2023), Nationaal Plan Energiesysteem, december.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en Witteveen+Bos (2022), Factsheet Veiligheid van waterstof(dragers). Waterstof in de energietransitie en omgevingsveiligheid.
- Moritz M. et al., Estimating global production and supply costs for green hydrogen and hydrogen-based green energy commodities, *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.046>.
- Nayak-Luke, R.M., C. Forbes, Z. Cesaro, R. Bañares-Alcántara, K.H.R. Rouwenhorst (2021), Techno-Economic Aspects of Production, Storage and Distribution of Ammonia, in:

- Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00008-4>
- NTA 8036 (2021), Eisen voor de gezamenlijke ligging van buisleidingsystemen in een leidingenstrook, november.
- Ocko, Ilissa B. and Steven P. Hamburg (2022), Climate consequences of hydrogen emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 9349–9368, 2022, <https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022>
- Öko-Institut, ICCT (2020), Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective, Berlin, May.
- Öko-Institut (2021): Ammonia as a marine fuel. Risks and perspectives, Berlin.
- Oner, Oytun, Kaveh Khalilpour (2022), Evaluation of green hydrogen carriers: A multi-criteria decision analysis tool, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168 (2022), 112764, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112764>.
- Panteia (2023), Cost Figures for Freight Transport – final report, commissioned by Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM), January.
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (2022), Verkenning vloeibare organische waterstofdragers (LOHC's) in termen van ZZS-eigenschappen, in opdracht van provincie Zuid-Holland, december.
- Rizi, Hossein Ali Yousefi, and Donghoon Shin (2022), Green Hydrogen Production Technologies from Ammonia Cracking, *Energies* 2022, 15, 8246. <https://doi.org/10.3390/en15218246>
- Roland Berger (2021), Hydrogen transportation | The key to unlocking the clean hydrogen economy.
- Saaty, R.W. (1987), The analytic hierarchy process-what it is and how it is used, *Mat/d Modelling*, Vol. 9, No. 3-5, pp. 161-176.
- Saaty, R.W. (2008), Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making. Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors, *The Analytic Hierarchy/Network Process*, VOL. 102 (2), 2008, pp. 251–318.
- Sand, M., R.B. Skeie, M. Sandstad, S. Krishnan, G. Myhre, H. Bryant, R. Derwent, et al. (2023), 'A Multi-Model Assessment of the Global Warming Potential of Hydrogen', *Communications Earth and Environment*, Vol. 4, No. 1, 2023..
- Sharma, Gagan Deep, Mahesh Verma, Babak Taheri, Ritika Chopra, Jaya Singh Parihar (2023), Socio-economic aspects of hydrogen energy: An integrative review, *Technological Forecasting & Social Change* 192 (2023), 122574, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122574>
- Siemens, Engie, Science & Technology Facilities Council, Ecuity (2020), Ammonia to Green Hydrogen Project. Feasibility Study, for UK's Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS).
- SoeHtet Wai, Yasuyuki Ota, Masakazu Sugiyama, and Kensuke Nishiok (2020), Evaluation of a Sabatier Reaction Utilizing Hydrogen Produced by Concentrator Photovoltaic Modules under Outdoor Conditions, *Appl. Sci.* 2020, 10, 3144; doi:10.3390/app10093144

- Spatolisano, Elvira, Laura A. Pellegrini, Alberto R. de Angelis Simone Cattaneo Ernesto Roccaro (2023), Ammonia as a Carbon-Free Energy Carrier: NH_3 Cracking to H_2 , *Ind. Eng. Chem. Res.* 2023, 62, 28, 10813–10827.
- Straatsma, Renze (2021), Hydrogen import terminals in the Port of Rotterdam: An assessment of uncertainty, Master thesis Delft University of Technology.
- Sweco, Ecorys (2022), MKBA Delta Corridor. Samenvatting van het Conceptrapport MKBA Delta Corridor gegeven de stand van zaken van het project op 28 september 2022, Rotterdam.
- Tijdgat, J. (2020), Shipping renewable hydrogen carriers. A study on the impact of shipping renewable hydrogen carriers and using those as a fuel on, the ship design, the different powertrain configurations, and the cost of transported hydrogen, Master thesis Delft University of Technology.
- TNO, Arcadis en Berenschot (2023), Omgevingskwaliteit van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers, 68008, 26 januari.
- P. Wammes en M. Weeda (2024), Eigenschappen van waterstofdragers. Een overzicht voor visievorming over import van waterstof, TNO 2024 M10863.
- Wai, SoeHtet, Yasuyuki Ota, Masakazu Sugiyama, and Kensuke Nishioka (2020), Evaluation of a Sabatier Reaction Utilizing Hydrogen Produced by Concentrator Photovoltaic Modules under Outdoor Conditions, *Applied Sciences* 10(9):3144, April.
- Walison, Patrick, Tom Busking, Nikki Blankerts (2023), De rol van waterstof in havens van nationaal belang, RoyalHaskoningDHV voor Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 24 november.
- Wärtsilä (n.d.), Encyclopedia of Marine and Energy Technology, Boil Off Rate, <https://www.wartsila.com/encyclopedia>
- WaterstofNet (2021), Waterstof in de Deltaregio. Troeven, knelpunten, uitdagingen en faciliterende rol van de Vlaams-Nederlandse Delta, 29 oktober.
- Weltenergieerat (2023), Ammoniak als Energieträger für die Energiewende, Dezember 2023.

Marktinformatie: diverse bedrijven hebben gedurende het onderzoek informatie aangedragen. Deze is vertrouwelijk behandeld en verwerkt.

BIJLAGE A: BRONNEN EN UITGANGSPUNTEN

MODELLERING

Uitvoering van deze multicriteria-analyse vereist veel basisdata en aannames. In deze bijlage vatten we de gebruikte bronnen en de belangrijkste aannames bij de modellering samen.

BRONNEN

De opdracht was om het onderzoek te baseren op bestaande literatuur. Er zijn tientallen studies over import van waterstofdragers. Deze zijn deels beschikbaar gesteld door het ministerie en deels door het onderzoeksteam verzameld. Geen enkele studie neemt de complete voor dit onderzoek gekozen set waterstofdragers onder de loep op alle gevraagde aspecten (de publieke belangen volgens het Nationaal Plan Energiesysteem). Veel studies zijn niet transparant over de gekozen data of verwerking ervan. De scope is meestal alleen import naar Nederland of Europa en eventueel nog conversie naar waterstof, zonder aandacht voor binnenlands transport en/of decentrale opslag en decentrale synthese. Behalve de verschillen in focus en reikwijdte bevatten de studies ook inhoudelijke inconsistenties. Bijvoorbeeld doordat verschillende aannames zijn gedaan.

Het was daarom nodig om datasets uit verschillende studies te combineren. Het gevolg hiervan is dat een manier gevonden moest worden voor het omgaan met inconsistenties tussen die studies. Die zien we bijvoorbeeld voor:

- importkosten (verschillen tussen HyDelta en JRC1),
- gekozen brandstof voor de scheepvaart: HyDelta neemt aan dat schepen varen op hun lading (de waterstofdrager), JRC1 gaat uit van biodiesel voor alle schepen. Wij volgen voor 2030 de waarden uit STREAM, die zijn bepaald voor een mix van gasolies, en veronderstellen voor 2050 het gebruik van klimaatneutrale brandstoffen (in lijn met IMO).
- elektriciteit volledig groen of mix, en
- wel of niet gebruiken van waterstofdrager voor proceswarmte of het gebruik van externe warmte bij de synthese en conversie.

Uit de beschikbare literatuur hebben we in overleg met de opdrachtgever de studies gekozen die het meest compleet en transparant zijn als basis voor de volgende publieke belangen. De ontbrekende data in deze studies hebben we aangevuld met data uit andere studies of marktinformatie. Wanneer de aannames verschilden hebben we de data voor zover mogelijk gecorrigeerd.

Betaalbaar, Economisch Krachtig

- De importkosten van vloeibare waterstof, ammoniak, MCH en methanol zijn ontleend aan de Nederlandse HyDelta-studie (2022). Dit betreft een studie van de kosten van import van deze dragers uit acht landen, opgebouwd uit de kosten in de keten van waterstofproductie in het exportland tot en met centrale conversie in Nederland.

- De kosten van ketenstappen in het binnenland zijn bepaald met data uit JRC1 (2022). Dit is een studie van de kosten en energieverlies van importketens voor vloeibare waterstof, ammoniak, DBT en methanol. Dit is opgebouwd uit de kosten in de keten van productie van de waterstofdrager in het exportland tot en met centrale of decentrale conversie in het importerende land.
- Vloeibaar synthetisch methaan is in beide studies niet meegenomen. Als aanvulling hebben we gebruik gemaakt van een studie van Agora en TU Hamburg (2023) die de importketen van LSM naar Duitsland heeft gemodelleerd in een vergelijking met andere waterstofdragers.
- Voor natriumboorhydride zijn geen complete ketenstudies beschikbaar. Daarom hebben we gebruik gemaakt van wetenschappelijke artikelen over delen van de keten en van marktinformatie.
- Voor de LOHC's DBT en MCH hebben we geen afzonderlijke complete datasets gevonden. HyDelta en JRC hebben verschillende LOHC's gekozen voor hun modellering, maar soms bij gebrek aan data ook waarden van de andere LOHC overgenomen. We hebben de data voor DBT en MCH zo goed mogelijk onderscheiden.
- De kosten van zeetransport zijn onderdeel van HyDelta. Voor de kosten van binnenlands transport hebben we data gebruikt van Panteia, CE Delft, KiM en marktinformatie. Kosten van buisleidingen zijn ontleend aan JRC1 en getoetst aan marktinformatie.
- Voor elektriciteitskosten in Nederland en CO₂-prijzen hebben we de cijfers uit de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) genomen (2030 en 2050).
- Voor Economisch krachtig zijn de kosten van congestie en infrastructuurgebruik bepaald met kentallen van KiM.

Duurzaam, Milieu:

- Voor data over energieverlies, emissies en materiaalgebruik is met name gebruik gemaakt van een *life-cycle*-analyse door JRC als vervolg op de bovengenoemde kostenstudie. Deze LCA-studie beschouwt dezelfde dragers en leveringsketens als JRC1, aangevuld met vloeibaar synthetisch methaan.
- Energie- en materiaalgebruik en emissies van natriumboorhydride zijn ontleend aan wetenschappelijke literatuur en marktinformatie.
- Voor 2030 nemen we de emissiefactor van elektriciteitsproductie in Nederland over van de KEV (0,07 g/kWh). Voor NO_x en fijnstof zijn emissiefactoren verstrekt door PBL: respectievelijk 0,09 g/kWh en vrijwel 0 g/kWh voor 2030. Voor 2050 gaan we uit van volledig hernieuwbare productie met nul uitstoot.
- Studies van CE Delft en KiM zijn als bron genomen van kentallen voor energieverlies en emissies tijdens transport en van milieukostenfactoren waarmee emissies worden gemonetariseerd.

Veilig, Betrouwbaar, Adaptief, Ruimte:

- Voor een aantal publieke belangen was geen of incomplete informatie beschikbaar. Daarom is gebruik gemaakt van kennis van experts. Voor de publieke belangen Veilig (omgevingsveiligheid, cyberveiligheid en terrorisme; een inschatting van kansen en effecten van verschillende incidenten afgebeeld in een risicomatrix), Betrouwbaar (relatieve leveringszekerheid) en Adaptief (additionaliteit en herbruikbaarheid van investe-

ringen) zijn in het kader van deze studie vijf expertsessies gehouden. Experts werden betrokken uit zowel overheid en publieke organisaties als de markt. De resulterende beoordelingen zijn per keten voor elk ketenonderdeel opgeteld. De beoordelingen (kwalitatief en kwantitatief) van alle ketens zijn vervolgens genormaliseerd (zie Bijlage D).

- In de expertsessie over Betrouwbaar zijn inschattingen over *Technology Readiness Levels* voor diverse stappen in de keten (productie, zee-transport, opslag, conversie, transport-modaliteiten) uit de literatuur geëvalueerd (o.a. Agora en TU Hamburg). Ook de beschikbaarheid van geschikte transportmiddelen, en de robuustheid van een modaliteit is beoordeeld.
- Voor de uitwerking van de expertsessie Adaptief zijn getallen over investeringsbedragen gebruikt uit JRC1, aangevuld met markt-informatie.
- De indicatoren voor omgevingsveiligheid en kwetsbaarheid voor cyberaanvallen en terrorisme zijn bepaald door de kwalitatieve scores voor kans en impact zoals ingeschat door de experts te vermenigvuldigen tot een risico per ketenonderdeel.
- Voor de indicator transportveiligheid (verkeersongevallen) zijn kentallen van KiM en CE Delft gebruikt.
- Voor het publieke belang Ruimte zijn waar beschikbaar inschattingen van marktpartijen voor het ruimtebeslag van de verschillende ketenonderdelen gebruikt. Onderdelen waarvoor geen informatie gevonden of aangeleverd is, zijn geschat door beschikbare informatie voor ketenonderdelen te schalen op basis van verschillen in soortelijke gewicht van de waterstofdragers.

Rechtvaardig, Toegankelijk

- Scores voor het publieke belang Rechtvaardig volgen uit de uitkomsten voor de andere publieke belangen, nl. Betaalbaar, Veilig, Duurzaam (de indicator broeikasgasemissies) en Milieu. Hier zijn geen afzonderlijke data voor nodig.
- De indicator kostenniveau in achterland en haven van het publieke belang Toegankelijk volgt uit de informatie benodigd voor het publieke belang Betaalbaar. Hier zijn geen afzonderlijke data voor nodig.
- Voor de indicator Nabijheid die hoort bij het publieke belang Toegankelijk is met de IBIS-database bepaald hoeveel bedrijventerreinen aansluiting hebben op het spoor of waterwegen, en met verwachte tracés van het landelijke waterstofnet en de Delta-Rijn-Corridor-buisleidingen is gekeken hoeveel bedrijventerreinen in gemeenten liggen waar deze leidingen passeren.

UITGANGSPUNTEN MODELLERING

Scope

- Voor de publieke belangen Betaalbaar en Duurzaam worden kosten, broeikasgasemissies en energieverlies in de importketen en in Nederland meegeteld tot aan levering bij de poort van de eindgebruiker of op een tankstation. Voor overige publieke belangen (bijv. Veilig, Ruimte, Milieu) wordt alleen de impact in Nederland bepaald, ook tot aan levering bij de poort. De milieu-impact in het exportland wordt wel meegewogen in publieke belang Rechtvaardig.
- Waar mogelijk zijn resultaten uitgedrukt per kilogram waterstofequivalent geleverd aan de eindgebruiker. Hierbij is rekening gehouden met conversie- en andere verliezen in

de keten die kunnen leiden tot een importvolume dat hoger is dan het uiteindelijk door de eindgebruiker afgenomen volume.

- We gaan uit van het middenscenario voor 2030 van de volumestudie door Arcadis/Berenschot/TNO als het enige scenario voor 2030. Voor 2050 nemen we het hoge scenario uit deze studie (dat eigenlijk betrekking heeft op 2030). Dit betekent een viermaal zo hoog volume.
- Er is alleen sprake van direct eindgebruik van gasvormig en vloeibare waterstof, ammoniak en methanol, en niet van LOHC's of natriumboorhydride. Direct gebruik van vloeibaar synthetisch methaan is ook buiten scope geplaatst. Wel wordt het gebruik van gasvormig methaan geleverd via het aardgasnet meegenomen. Gasvormig waterstof (en methaan) wordt alleen via het waterstofnet (en aardgasnet) vervoerd en niet over weg, water of spoor.
- De eventuele synthese van een waterstofdrager wordt alleen onderzocht voor ammoniak, methanol en vloeibare waterstof, niet voor methaan. De synthese wordt gemodelleerd met de aanname dat deze gebeurt met waterstof die afkomstig is van een eerdere conversie van dezelfde stof. Bij de resultaten wordt wel het effect beschouwd van de synthese van een andere importdrager als dit maatschappelijk gunstiger uit kan vallen.
- Voor ammoniak is het huidige Kabinetsstandpunt als uitgangspunt genomen voor te nemen veiligheidsmaatregelen in de ketens. Er zijn geen extra maatregelen aangenomen om het veiligheidsniveau te verhogen, en dus ook geen extra daarmee samenhangende kosten. Binnen deze studie paste het niet om hiervoor alle mogelijkheden te onderzoeken.

Geografie

- In de basis- en andere varianten is gerekend met import van waterstofdragers uit Marokko (3000 km). In een gevoeligheidsanalyse is gekozen voor levering uit Argentinië (15.000 km). De cijfers voor deze routes zijn afkomstig van HyDelta.
- Binnen Nederland is gerekend met transport over een representatief vervoertracé van 200 km, net als in de MKBV-studie door Berenschot en Arcadis. Door representatieve tracés te gebruiken, vervallen verschillen tussen importhavens en verschillen in afstand tot verschillende eindgebruikerslocaties.
- Wel onderscheiden we zes soorten eindgebruikers. Vanuit de importhavens lopen dikke stromen van waterstof(dragers) naar de industrieclusters voor kunstmestproductie (ammoniak en waterstof als grondstof), elektriciteitscentrales (waterstof, methaan en ammoniak als brandstof) of overige industrie (raffinaderijen, staalindustrie en chemie, waterstof als brand-/grondstof). Kleinere volumes lopen vanuit de importhavens naar industrie buiten de clusters (cluster 6: keramische, metaalindustrie, afval/recycling) en naar wegtankstations en bunkerstations. De mogelijkheid om van bepaalde modaliteiten gebruik te maken bepaalt naast het type eindgebruik uit welke ketens de eindgebruiker kan kiezen. Veel industriële grootverbruikers zijn gelegen aan het landelijke waterstofnet in 2030, tankstations meestal niet. Onderscheidend voor de beide stromen is niet zozeer het type industrie maar de mogelijkheid om het nationale waterstofnet te gebruiken of niet.
- Het eindgebruik kan ook in het buitenland plaatsvinden. In dat geval vervallen de ketenonderdelen decentrale opslag en conversie.

- Het eindgebruik kan ook in de importhaven plaatsvinden. In dat geval vervalt het binnenlands transport en decentrale opslag. Decentrale conversie valt dan samen met centrale conversie.

Emissies en energieverlies

- In verschillende ketenstappen kunnen emissies van broeikasgassen en andere stoffen plaatsvinden. Deze worden met milieukostenfactoren gemonetariseerd en per keten opgeteld. Aangenomen wordt dat de gebruikte elektriciteit in de ketens emissievrij is in het exportland voor de water elektrolyse en synthese van de waterstofdrager, en dat in Nederland de elektriciteitsmix volgens de KEV van toepassing is voor de ketenstappen zoals dehydrogenering en (elektrisch) transport.
- Emissies worden opgeteld tot aan levering bij de poort van de eindgebruiker of op een tankstation. De emissies en energie-efficiëntie van direct gebruik van dragers door de eindgebruikers zijn niet meegenomen omdat dit een breed spectrum omvat (brandstofcellen, branders, turbines, verbrandingsmotoren, procesreactoren, et cetera).
- In 2030 zijn er nog wel CO₂-emissies door zee- en binnenlands transport (weg, binnenvaart, spoor), zij het dat een reductie ten opzichte van vandaag wordt aangenomen. In 2050 nemen we aan dat het zeetransport volgens doelstelling van de *International Maritime Organisation (IMO) net-zero* is (synthetisch methaan, methanol, ammoniak) en het wegtransport en binnenvaart volgens EU-doelstellingen zero-emissie door elektrisch varen (batterijen of waterstof).
- In 2030 is de aanname dat voor synthese van LSM en methanol CO₂ van fossiele herkomst uit een industriële puntbron wordt gebruikt. Als deze CO₂ in het exportland wordt opgeslagen in methaan of methanol en in Nederland bij *steam reforming* weer vrij komt is sprake van netto CO₂-uitstoot die we toerekenen aan de keten. Bovendien is bij synthese sprake van een deel CO₂ dat uit het proces weglekt. In 2050 gaan we uit van gebruik van CO₂ uit *direct air capture*: in dat geval wordt de bij *steam reforming* vrijkomende CO₂ (en ook de bij synthese weglekkende CO₂) niet toegerekend aan de keten.
- Er is uitgegaan van gebruik van DeNO_x-nabehandeling op conversie-installaties voor ammoniak in Nederland, maar niet in het exportland. Dit leidt tot 93% reductie van de NO_x-uitstoot ten opzichte van de waarde uit de dataset van JRC1.

BIJLAGE B: VOLUME

Deze studie gaat voor alle ketens uit van eenzelfde volume waterstofequivalenten dat wordt afgeleverd bij de eindgebruiker, dat wil zeggen bij de poort van de fabriek of bij het tankstation. Dit volume is gebaseerd op het middenscenario van de volumestudie door TNO, Berenschot en Arcadis. In dit scenario wordt 1578 kton waterstofequivalent (in 2030) in de vorm van de verschillende waterstofdragers afgeleverd. Dit scenario is ook aangehouden in de MKBV-studie.

Gewichtspercenten worden als volgt gebruikt om de volumes van waterstofdragers voor elke keten te berekenen uit het volume waterstofequivalent. (In feite berekenen we de massa van een waterstofdrager voor elke keten, maar we sluiten aan bij de terminologie in de vraagstelling voor het onderzoek.)

Tabel 6: Gewichtsverhouding waterstofdragers en waterstofinhoud

Waterstofdrager	massapercentage H ₂	H ₂ -equivalent
NH ₃	17,8	5,63
DBT	6,16	16,23
MCH	6,12	16,33
LH ₂	100	1,00
MeOH	12,58	7,95
LSM	25,13	3,98
NaBH ₄	10,6	4,73*

Bron NH₃, LOHC: Berenschot, Arcadis (2024); overig: [Molecular Weight Calculator](#)

*) Bij reactie van natriumboorhydride met water komt er twee keer zoveel H₂ vrij als in de stof is opgeslagen: $\text{NaBH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaBO}_2 + 4\text{H}_2$. Daarom hanteren we voor de volumeberekeningen het getal in de rechterkolom.

Omdat er in de leveringsketens verliezen optreden bij conversies en door lekkages tijdens opslag en transport, moet er meer waterstofdrager ingevoerd worden dan de omrekening met Tabel 6 op zou leveren.

Efficiëntie van conversiestappen

Voor conversieverliezen gebruiken we cijfers van JRC2, behalve voor (de)hydrogenering van LOHC's. Voor DBT volgen we de opgave van JRC1. Het verschil tussen beide studies is dat in JRC1 gerekend wordt met een volledig geëlektrificeerd conversieproces en in JRC2 met de inzet van waterstof voor proceswarmte. Een derde alternatief in JRC1 is benutting van industriële restwarmte voor het conversieproces. Voor de modellering kiezen we voor het geëlektrificeerde conversieproces, omdat elektriciteit goedkoper zal zijn en we aannemen dat de importeur van de in LOHC gebonden waterstof zoveel mogelijk waterstof wil verkopen.

Voor de modellering van de conversies van ammoniak, methanol en LSM naar waterstof nemen we aan dat een deel van het volume waterstofdrager wordt gebruikt als brandstof voor proceswarmte. Hiervoor zijn geëlektrificeerde processen niet op afzienbare tijd beschikbaar. Zou voor dehydrogenering van LOHC ook voor verwarming met waterstof gekozen worden, dan is 38% extra import van DBT nodig.

De cijfers voor conversie van MCH en natriumboorhydride zijn gebaseerd op teamanalyse, mede op basis van informatie uit de markt.

Voor de synthese van methanol en LSM in het buitenland gaat JRC2 uit van het gebruik van *direct air capture* (DAC) voor de benodigde CO₂, waarbij waterstof wordt gebruikt voor procesenergie. Voor 2030 gaan wij echter uit van het gebruik van CO₂ uit een industriële puntbron, en in 2050 van DAC. Hierdoor is er minder waterstofequivalent nodig dan bij toepassing van DAC.

Tabel 7: Conversie-efficiënties van waterstofdrager naar waterstof en vice versa

Efficiënties						Zonder	Met	Zonder	Met
Output						DAC *	DAC *	DAC*	DAC*
Input	H ₂	NH ₃	LH ₂	MCH	DBT	MeOH	MeOH	LSM	LSM
H ₂ -gas	100%	100%	98%	99%	100%	63%	46%	55%	43%
NH ₃	78%	100%							
LH ₂	100%		100%						
MCH	98%			100%					
DBT	100%				100%				
MeOH	82%					100%	100%		
LSM	76%							100%	100%
CH ₄ -gas	76%								
NaBH ₄	100%								

*) Aanname is dat voor methanol- en LSM-synthese in exportlanden en Nederland in 2030 CO₂ wordt gebruikt uit industriële puntbronnen, en in 2050 uit *direct air capture* (CO₂-afvang uit de lucht, DAC).

Efficiëntie van transport, overslag en opslag

Tijdens opslag, overslag en transport van de ingevoerde waterstofdragers kunnen verliezen optreden door lekkages en *boil-off* (verdamping) van dragers. Deze verliezen zijn alleen van significante omvang voor vloeibare waterstof, en in geringe mate voor ammoniak. Zolang natriumboorhydride droog blijft is geen sprake van verlies van waterstof.

Tabel 8: Efficiënties van opslag, overslag en transport: verliezen door lekkages en boil-off

Input	Efficiënties							
	Buis	Weg	Trein	Schip	Modaliteit			Zee-transport
H ₂ -gas							100%*	
NH ₃	100%	100%	100%	100%			100%**	100%
LH ₂		99%	99%	98%			98%	99%
MCH	100%	100%	100%	100%			100%	100%
DBT	100%	100%	100%	100%			100%	100%
MeOH	100%	100%	100%	100%			100%	100%
LSM		100%	100%	100%			100%	100%
NaBH ₄		100%	100%	100%			100%	100%
CH ₄ -gas						100%*		

*) Er is sprake van 0,01% lekkage uit het H₂-net en aardgasnet (Gasunie).

**) Bij opslag van NH₃ is sprake van 0,02% lekkage bij overslag (JRC1).

Boil-off van vloeibare waterstof tijdens zeetransport (0,2% per dag, oftewel 1% op het traject van Marokko naar Nederland en 5 maal zoveel tijdens de vaart uit Argentinië) wordt benut voor de scheepsmotor. *Boil-off* tijdens transport met tankwagens of ketelwagens gaat verloren als emissie maar kan in een binnenvaarttankschip gebruikt worden voor de motor (1% per dag). Deze verliezen per dag worden vermenigvuldigd met de duur van het transport:

- Binnenvaartschip: 4 dagen op en neer naar bestemming (200 km), 50% van de tijd met LH₂-lading; dus 2 dagen x 1% per dag = 2% verlies.
- Ketelwagon: 3 dagen op en neer naar bestemming, 50% van de tijd met LH₂-lading; dus 1,5 dagen x 1% per dag = 1,5% verlies.
- Tankwagen: 1,5 dagen op en neer naar bestemming, 50% van de tijd met LH₂-lading; dus 1 dag x 1% per dag = 1% verlies.
- Aangenomen is dat *boil-off* tijdens centrale opslag weer vloeibaar wordt gemaakt maar bij decentrale opslag ontsnapt (0,2% per dag gedurende 3 dagen).

Opslag

We gaan voor alle importketens uit van een opslagbehoefte van 14 dagen in de importhaven en 3 dagen bij de eindgebruiker. Hiervoor delen we het totale jaarlijkse ingevoerde volume waterstofdrager dat in Nederland wordt gebruikt, omgezet naar waterstof of wordt doorgevoerd, door 365 dagen en vermenigvuldigen dit met 14 respectievelijk 3 dagen. In de leveringsketens waarin het waterstofnet of aardgasnet worden benut is bovendien sprake van de opslagcapaciteit in aan deze buisleidingen verbonden zoutcavernes of gasvelden. Voor aardgas is deze opslag al in gebruik,

voor waterstof is deze in ontwikkeling. We nemen de ondergrondse opslag niet mee in de modellering omdat we de aanname in JRC1 volgen dat slechts 1% van het volume in de keten via een zoutcaverne loopt.⁷⁰

Omrekening naar tonkm

Voor meerdere indicatoren van publieke belangen maken we een berekening waarvoor we kentallen per tonkilometer gebruiken. Per keten wordt het aantal tonkilometers bepaald door het volume waterstofdragers te vermenigvuldigen met de tracélengte van 200 km.

Tabel 9: Overzicht indicatoren afhankelijk van tonkms waarvoor wel of geen correcties bij retourrit nodig zijn

Indicatoren waarbij volle retourrit van natriumboorhydride en LOHC's geen invloed heeft op berekende effecten	Indicatoren waarbij volle retourrit van natriumboorhydride en LOHC's wel invloed heeft op berekende effecten
<ul style="list-style-type: none"> Congestiekosten (economisch krachtig) Transportveiligheid (veiligheid) H₂- of CH₄-emissie (duurzaamheid) tijdens transport van LOHC of boorhydride - want geen H₂- of CH₄-emissie Materiaalgebruik (verlies H₂eq of materiaal) (duurzaamheid) - want geen verlies bij transport Geluid (milieu) Habitatschade (milieu) NH₃-emissie (milieu) tijdens transport van LOHC of boorhydride - want geen NH₃-emissie Ruimtekosten per tonkm (ruimte) 	<ul style="list-style-type: none"> Transportkosten (betaalbaarheid) CO₂-emissie (duurzaamheid) Energieverlies (duurzaamheid) NO_x (milieu) Fijnstof (milieu)

Standaard is uitgangspunt in de berekeningen dat de vrachtwagen, trein en binnenvaartschip vol naar de eindgebruiker gaan en leeg of met ballastwater terug (Panteia). Voor de LOHC's en natriumboorhydride is er wel sprake van een retourstroom. Deze retourstroom leidt niet tot meer transportbewegingen. De belading van de retourrit is wel hoger. Dit kan invloed hebben op het energieverlies door de gemiddeld hogere belading en als gevolg daarvan op enkele andere effecten, afhankelijk van de indicator. Om dit effect mee te nemen rekenen we voor een volle rit of vaart 40% hoger energieverlies en emissies dan voor een lege rit of vaart voor de LOHC's en boorhydride.⁷¹ Deze toeslag is een maat voor het gemiddelde extra energieverlies en daardoor ook de extra kosten en emissies. De correctie passen we in het model niet generiek toe bij tonkms maar

⁷⁰ TNO heeft onderzocht hoeveel ondergrondse opslagcapaciteit nodig is in een CO₂-vrij elektriciteitssysteem, waarin alle gascentrales zijn omgebouwd tot waterstofcentrales die als flexibele back-up voor wind- en zonne-energie fungeren. Dat gaat dan om 15,8 GW vermogen van elektriciteitsproductie. Om tijdens de in een deel van het jaar optredende piekvraag voldoende elektriciteit te kunnen opwekken is extra productie van waterstof of snellere onttrekking aan de ondergrondse opslag nodig. Om het gemiddelde tekort met alleen extractie uit de opslag op te vangen zouden er zes extra zoutcavernes nodig zijn. Sander Blom, Berend Hopman, Sebastiaan Hers (2024), Waterstof-opslagbehoefte 2030-2035, TNO 2024 R10304, 16 februari 2024.

⁷¹ CE Delft (2021), STREAM Goederenvervoer 2020. Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer – Versie 2, pag 86.

bij het betreffende effect omdat de correctie verschilt. Bij een buisleiding is sprake van éénrichtingstransport. Indien er dan een retourstroom is moet deze wel tweemaal worden meegeteld. Dit levert 2x zoveel effecten voor:

- Transportkosten (betaalbaarheid)
- Energieverlies (duurzaamheid)
- Ruimtekosten (ruimte)

Benodigde inzet van transportmiddelen

Voor sommige indicatoren van publieke belangen is het nodig om te weten hoeveel transportbewegingen en transportmiddelen per leveringsketen nodig zijn om het volume (eigenlijk: massa) te vervoeren. Daarvoor wordt het volume gedeeld door de capaciteit van het transportmiddel volgens Tabel 10. Vervolgens wordt het aantal benodigde transportmiddelen bepaald door het aantal dagen in het jaar te delen door de duur van een transport, zoals bij bovenstaande *bullets* vermeld.

Voor wegvervoer en spoor zijn de gereguleerde aslasten en draagkracht van wegdek of spoortalud beperkend voor de te transporteren hoeveelheden. Voor schepen is volumetrische capaciteit (laadruimte) bepalend voor de hoeveelheid materiaal die vervoerd kan worden. Echter, we berekenen bij scheepvervoer de kosten, energieverlies en emissies met kentallen per tonkm. Volume (in zijn eigenlijk betekenis in verband met laadruimte) is alleen onderscheidend bij het bepalen van de hoeveelheid in te zetten binnenvaartschepen en benodigde investeringen (publiek belang Adaptief). Het verschil in soortelijk gewicht tussen de LOHC's DBT en MCH betekent dat voor eenzelfde massa (kton) van vervoerde waterstof niet evenveel volume (m³) transportcapaciteit nodig is. We hebben echter besloten om dit verschil te negeren omdat het een kleine invloed heeft op de resultaten bij Adaptief.

Tabel 10: Capaciteiten van transportmiddelen in ton waterstofdrager

Capaciteit Drager	Trekker-oplegger	Ketelwagon	Binnenvaartschip
NH ₃	29	55,1	1.850
LH ₂	4,3	9	350
MCH / DBT	29	65,4	1.850
MeOH	29	63,2	1.850
LSM	20	45	1.000
NaBH ₄ ⁷²	29	55	1.850

Bronnen: Panteia (2023), JRC1 (2022), [LNG Industry](#) (2016), Busch et al.⁷³

⁷² Vanwege de reactiviteit met vocht veronderstellen we dat natriumboorhydride waterdicht verpakt in big bags in containers wordt vervoerd. De capaciteit per rit veronderstellen we gelijk aan de standaardwaarden voor trekker-opleggers en drogelading-treinwagons.

⁷³ Busch T. et al. (2023), The role of liquid hydrogen in integrated energy systems. A case study for Germany, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, Issue 99, 25 December, Pages 39408-39424.

Benodigde volumes dragermateriaal LOHC's en natriumboorhydride

De hoeveelheid dragermateriaal die nodig is voor de import van waterstof hangt af van de doorloop, oftewel het aantal cycli. Een molecuul DBT wordt geladen met waterstof in het exportland, verblijft in opslag, wordt overgeslagen naar een schip, maakt de reis naar Nederland, verblijft daar opnieuw een tijd in opslag, waarna dehydrogenering plaatsvindt (eventueel na eerst nog een extra rit of vaart naar het achterland), en vervolgens maakt het molecuul de retourreis. De duur van een dergelijke cyclus hangt af van de transportafstand.

Voorbeeld Marokko: na synthese 7 dagen opslag voor export; 5 dagen varen naar Nederland, 14 dagen opslag in een Nederlandse importhaven, gevolgd door dehydrogenering (of eventueel eerst nog 1-2 dagen distributie naar een eindgebruiker waar na 3 dagen opslag dehydrogenering plaatsvindt). Met vervolgens de retourroute maakt dit in totaal ongeveer 52-61 dagen. Het aantal cycli is dan ongeveer 6 per jaar. Dat wil zeggen dat de benodigde hoeveelheid dragermateriaal kan worden berekend als de jaarlijkse hoeveelheid waterstofequivalent gedeeld door het gewichtsperscentage waterstof gedeeld door 6.

Voorbeeld Argentinië (15.000 km): omdat de transportafstand vijf keer zo lang is, duurt de cyclus 92-101 dagen. Het aantal cycli is dan afgerond 3 per jaar.

Hoe lager het aantal cycli per jaar, hoe hoger de hoeveelheid dragermateriaal die nodig is.

Bij dit lage aantal cycli gaat het dragermateriaal lang mee: er is per cyclus 0,013% verlies van DBT en 0,7-0,84% van MCH doordat ongewenste bijproducten ontstaan bij dehydrogenering, zodat het materiaal na elke cyclus opgezuiverd moet worden (bron: JRC en marktinformatie).

BIJLAGE C: ONDERBOUWING EN TOELICHTING

Per publiek belang wordt in deze bijlage een toelichting gegeven op de aannames en opbouw van cijfers. De volgorde is gelijk aan de volgorde in het Nationaal Plan Energiesysteem.

1. BETAALBAAR

Uitgangspunt voor deze MCA-studie is dat zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van bestaande literatuur. Er zijn de afgelopen jaren diverse studies verschenen in binnen- en buitenland die de kosten van import van waterstofdragers vergelijken. Omdat de diverse studies vaak andere uitgangspunten en scope hebben, is het wenselijk om zoveel mogelijk dezelfde bron te gebruiken. Geen enkele studie omvat alle 7 dragers die wij vergelijken. Wij nemen de Nederlandse HyDelta-studie als basis en lichten deze keuze na Tabel 12 toe.⁷⁴ HyDelta berekent de kosten van import van de waterstofdragers ammoniak, vloeibare waterstof, MCH en methanol (dus 4 van de 7) uit 8 exportlanden naar Nederland in 2030.⁷⁵ We kiezen voor Marokko als exportland. Voor DBT nemen we dezelfde kostenopbouw aan als voor MCH.

De kostenopbouw in HyDelta is gedaan volgens een andere indeling van de keten in stappen dan in deze MCA-studie is gebruikt. We hebben de kosten van sommige stappen volgens HyDelta daarom bij elkaar opgeteld om de kosten van de stappen in de MCA-analyse te bepalen.

In de HyDelta-studie is aangenomen dat methanol wordt geproduceerd in het exportland met CO₂ uit *direct air capture* (afvang uit de lucht). Dit is voor 2030 geen realistische aanname, wel voor 2050. Daarom voeren we voor 2030 een correctie door voor de kosten van ‘aanvullende *feedstock*’. Om CO₂ te gebruiken uit een industriële puntbron zijn investeringen nodig in een afvanginstallatie, compressie en een eventuele aansluiting op een CO₂-transportleiding. Deze investeringskosten zijn grotendeels afhankelijk van het volume van de gasstroom waaruit CO₂ wordt afgevangen, de concentratie van CO₂ in de gasstroom, het proces waarvan wordt afgevangen, de gekozen technologie en of het een nieuwe of bestaande fabriek betreft. We rekenen met inkoopkosten van 50 euro per ton CO₂ van fossiele herkomst uit een industriële puntbron.⁷⁶ We hebben het bedrag van 952 euro per ton waterstofequivalent vervangen door 580 euro per ton waterstofequivalent. De importkosten van methanol dalen dan tot 4.296 euro per ton waterstofequivalent (zie Tabel 11).

Voor de kosten van de waterstofdragers vloeibaar synthetisch methaan en natriumboorhydride zijn andere bronnen gebruikt, respectievelijk Agora/TU Hamburg en via marktpartijen verkregen vertrouwelijke data.

⁷⁴ HyDelta (2022), WP7B Technical analysis, D7B.3 – *Cost analysis and comparison of different hydrogen carrier import chains and expected cost development*, 31 March 2022.

⁷⁵ De landen zijn: Marokko, Saoedi-Arabië, Oman, Argentinië, Verenigd Koninkrijk, IJsland, Canada en Australië.

⁷⁶ Op grond van de volgende bronnen: IEA (2021), *Is carbon capture too expensive?*, 21 July, en IEA (2023), *The Role of e-Fuels in Decarbonizing Transport*, 23 December.

Tabel 11: Kosten van invoer van waterstofdragers uit Marokko naar Nederland in 2030, in euro per ton waterstofequivalent bij eindgebruiker afgeleverd (HyDelta)

Marokko 2030 HyDelta	H ₂ via NH ₃	H ₂ via LH ₂	H ₂ via MCH	H ₂ via MeOH
Lokale H ₂ -productie	€ 2.691	€ 2.840	€ 3.206	€ 3.193
Gecomprimeerde H ₂ -opslag	€ 33	€ 34	€ 62	€ 43
Aanvullende feedstock	€ -	€ -	€ -	€ 580**
H ₂ naar drager conversie	€ 1.047	€ 876	€ 323	€ 378
Drager export en opslag	€ 216	€ 780	€ 266	€ 43
Transport: Scheepvaart	€ 33	€ 300	€ 420	€ 59
Transport: Buisleiding	€ -	€ -	€ -	€ -
Drager import en opslag	€ 187	€ 704	€ 192	€ 35
Drager naar H ₂ -conversie	€ 300***	€ 192	€ 732	€ 124
Totale importkosten *	€ 4.018	€ 4.831	€ 4.277	€ 4.296**

*) Importkosten is de som tot de eerste horizontale lijn: zonder opslag in de importhaven en conversie naar waterstof.

***) De waarden van HyDelta zijn op basis van DAC. In deze tabel zijn deze gecorrigeerd voor CO₂ gebruik uit een industriële puntbron.

****) HyDelta rekent niet met toepassing van DeNO_x-nabehandeling bij het kraken van ammoniak. In deze studie gaan we daar wel vanuit. De kosten van DeNO_x berekenen we met gegevens van de haalbaarheidsstudie ammoniakkraker Rotterdam (omvang productiecapaciteit en te behandelen uitstoot) en van het Informatiepunt Leefomgeving (kostenkanten voor investering en operationele kosten).⁷⁷

Voor LSM berekent Agora/TU Hamburg een importprijs tussen 6.400 en 7.500 euro per ton waterstofequivalent, we nemen 7.000 euro.⁷⁸ Daar gaat 100 euro af voor opslag in de importhaven en 900 euro voor conversie van LSM naar waterstof met CO₂-afvang en opslag (CCS), dit maakt 6.000 euro.⁷⁹ Agora gaat uit van methanisering met CO₂ uit *direct air capture* tegen kosten van € 1100 per ton waterstofequivalent. Als we dit corrigeren naar gebruik van CO₂ van fossiele herkomst uit een industriële puntbron (€ 50/ton CO₂, oftewel € 503 per ton waterstofequivalent) komen we op importkosten van 6000 – 1100 + 503 maakt 5.403 euro per ton waterstofequivalent (exclusief overslag/opslag en conversie).

Voor natriumboorhydride zijn geen complete ketenstudies gepubliceerd. Uit literatuur⁸⁰ en vertrouwelijk ter beschikking gestelde informatie van marktpartijen blijkt dat de kosten sterk bepaald worden door de energie-input in het proces van maken van het dragermateriaal en het recyclen en regenereren van de 'spent fuel', de retourstroom. Het vrijmaken van waterstof uit het poeder is

⁷⁷ De investering in SCR bedraagt volgens [IPLO](#) € 3-100/Nm³/per uur. De afgasstroom bevat ten hoogste 80 mg/m³ NO_x, dit is 140 ton per jaar, de totale afgasstroom is dan 200 Nm³/uur. Per uur wordt (1 Mton/8760 uur =) 114 ton H₂ geproduceerd. Dat brengt de CAPEX-kosten op €5-18/tonH₂. De operationele kosten van SCR bedragen €150-200 per verwijderde ton NO_x voor het reagens, plus € 0,33/(Nm³ rookgassen per uur) voor de katalysator. Oftewel € 0,021-0,28 /tonH₂ en 0,058 €/tonH₂, beide verwaarloosbaar ten opzichte van de CAPEX-kosten.

⁷⁸ Agora Industrie & Technische Universität Hamburg (2023), Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland. Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenkreislauf, September 2023.

⁷⁹ Ter vergelijking: IEA rekent 500 euro voor conversie zonder CCS en 1000 euro met CCS. IEA (2019), The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, June 2019.

⁸⁰ O.a. Ainee Ibrahim et al., Chemical compression and transport of hydrogen using sodium borohydride, *Sustainable Energy & Fuels*, 2023, 7, 1196-1203.

exotherm (levert energie op). Inschattingen van CAPEX voor de procesinstallaties zijn niet bekend. Om deze keten concurrerend op te zetten is toegang tot goedkope energie essentieel, bijvoorbeeld in het Midden-Oosten. Om natriumboorhydride in de vergelijking mee te nemen kiezen we voor een lage energieprijs, die realistisch is in het Midden-Oosten. Zonder de CAPEX en inkoopkosten van de grondstoffen mee te rekenen stellen we de importprijs dan op 11.350 euro per ton waterstofequivalent. Dat maakt het verreweg de duurste waterstofdrager. Daar komt 350 euro per ton waterstofequivalent bij voor opslag in de importhaven, distributie en dehydrogenering.

In sommige ketens is ook sprake van een synthese in Nederland waarbij liquefactie naar vloeibare waterstof of synthese van ammoniak of methanol met waterstof uit het landelijke waterstofnet plaatsvindt. We nemen hiervoor de kosten over van deze conversiestappen in het Verenigd Koninkrijk volgens HyDelta, in de veronderstelling dat van de in HyDelta onderzochte landen dit land het meest lijkt op Nederland. Tabel 12 vat de conversiekosten samen volgens HyDelta en de andere gebruikte bronnen.

De kosten van *steam reforming* van methanol naar waterstof lijken laag, maar om de HyDelta-dataset zoveel compleet mogelijk te houden nemen we deze waarde wel over.

Tabel 12: Kosten van conversie in euro per ton waterstofequivalent, van drager naar waterstof en vice versa

Kosten conversie per ton output H ₂ eq	Output				
	H ₂	NH ₃	LH ₂	MeOH	CH ₄
H ₂ -gas		€ 1.014	€ 1.287	€ 373	
NH ₃	€ 300				
LH ₂	€ 192				
MCH	€ 732				
DBT	€ 732				
MeOH	€ 124				
LSM	€ 500				€ 78
CH ₄ -gas	€ 500				
NaBH ₄	€ 250				

Toelichting op keuze voor HyDelta: vergelijking met JRC en Metastudie

Er zijn veel studies gedaan naar de kostenopbouw van geïmporteerde waterstofdragers. We hebben gezocht naar de studies die de meeste van de door ons onderzochte waterstofdragers vergelijken en daarbij de gebruikte aanpak en data het meest transparant weergeven. Twee recente studies voldeden het best: HyDelta en JRC.

Voor het publiek belang Betaalbaar zijn we voor de importkosten van vloeibare waterstof, ammoniak, LOHC (MCH) en methanol uitgegaan van de HyDelta-dataset. Deze dataset biedt voor onze modellering een aantal voordelen: de kostenopgave is helder uitgesplitst naar ketenstappen, is beschikbaar voor verschillende herkomstlanden van waterstofdragers, en dat is gedaan voor twee zichtjaren. Daar komt bij dat de studie is uitgevoerd door Nederlandse partijen.

De studie door JRC beslaat dezelfde set waterstofdragers (maar met DBT in plaats van MCH als de LOHC) en geeft ook tamelijk complete uitleg. Nadelen zijn dat de resultaten per ketenstap

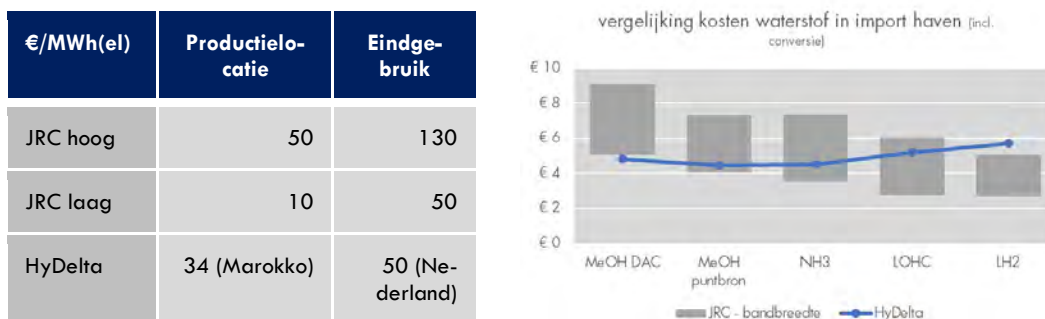
alleen als grafieken beschikbaar zijn, en er wordt geen onderscheid gemaakt naar herkomstland of zichtjaar. HyDelta vormt daarom voor onze studie een betere basis.

We hebben de uitkomsten van HyDelta en JRC met elkaar vergeleken, en daarbij ook een meta-studie betrokken die 30 studies naar de import van waterstofdragers evalueert.⁸¹ Deze metastudie beslaat alleen de ketens tot aankomst in de EU en geeft geen informatie over ketenstappen, herkomstlanden, zichtjaren of andere aannames. HyDelta en JRC maken geen deel uit van deze 30 studies.

Voor LSM en natriumboorhydride hebben we overigens andere bronnen gebruikt omdat deze dragers geen onderdeel van HyDelta of JRC1 zijn, en ook niet van de Metastudie.

Figuur 88 toont de vergelijking van kosten van waterstof(dragers) in de importhaven, inclusief de centrale conversie in de haven, volgens HyDelta en JRC. HyDelta en JRC volgen niet dezelfde indeling in ketenstappen, die hebben we zo goed mogelijk geïnterpreteerd en vergelijkbaar gemaakt. JRC heeft twee scenario's doorgerekend met lage en hoge elektriciteitsprijzen in het herkomstland en in het gebruiksland (Nederland). De tabel toont de verschillende aannames in vergelijking met HyDelta.

Figuur 88 laat zien dat de kosten van methanol volgens HyDelta lager zijn dan volgens JRC (laag en hoog scenario) en dat de kosten van vloeibare waterstof hoger zijn dan volgens JRC (beide scenario's).



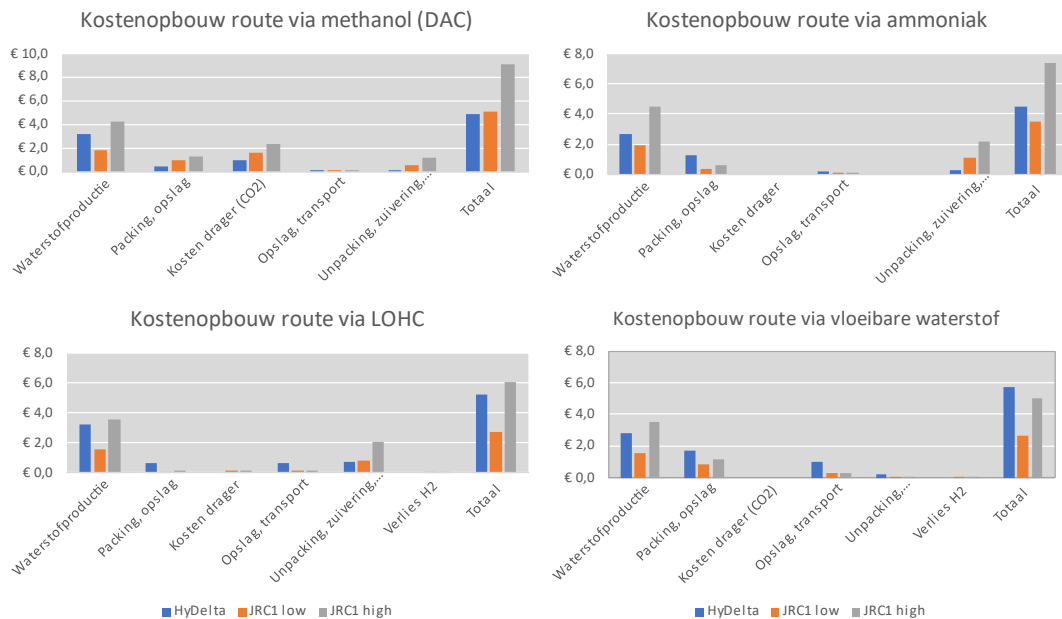
Figuur 88: Vergelijking van HyDelta en JRC (in euro/kg H₂-equivalent)

Niet alleen de totaalbedragen verschillen, ook in de kostenopbouw van de ketenstappen zijn verschillen zichtbaar (Figuur 89).

- De grootste verschillen tussen HyDelta en de beide JRC-scenario's zitten bij de waterstofproductie. Dit komt met name door de verschillen in aangenomen elektriciteitsprijzen, en doordat meer waterstof gemaakt moet worden voor ketens waarbij waterstofdragers in conversieprocessen worden gebruikt (ammoniak, methanol).
- Bij de diverse conversieprocessen zijn ook verschillen zichtbaar tussen HyDelta en JRC. Deels zijn ook deze te verklaren door de verschillen in elektriciteitsprijs. Voor het andere deel kunnen we niet zonder inzicht in de (niet beschikbare) brondata een uitspraak doen welke resultaten 'realistischer' zijn.

⁸¹ Genge L et al., Supply costs of green chemical energy carriers at the European border: A meta-analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 19 December 2023, Pages 38766-38781.

- Een voorbeeld is de conversie van methanol naar waterstof. Dit is volgens HyDelta aanmerkelijk goedkoper dan in beide JRC-scenario's. Beide studies zijn uitgevoerd door gerenommeerde instituten en zijn recent. Beide studies geven disclaimers over de onzekerheden in de berekeningen. Zo stelt HyDelta: *“It is important to mention that a small capacity of 5.5 kt methanol per year is used as an anchor point for the CAPEX calculation. The annual capacity in the study is 1375 kt methanol per year, 250 times larger, which results into great uncertainty of the cost estimation.”*⁸² JRC1 schrijft: *“While literature is available on designs for small scale applications targeted especially at fuel cells [140]–[142], it is difficult to find designs and specifications for the production of large amounts of hydrogen [143], [144]. (...) Not much information is available on large-scale methanol reforming installations.”*
- Een ander voorbeeld is liquefactie, opslag en transport van vloeibare waterstof: dit is volgens HyDelta flink duurder dan in beide JRC-scenario's. Als derde voorbeeld is synthese van ammoniak het duurst bij HyDelta, maar het kraken van ammoniak is het goedkoopst bij HyDelta.

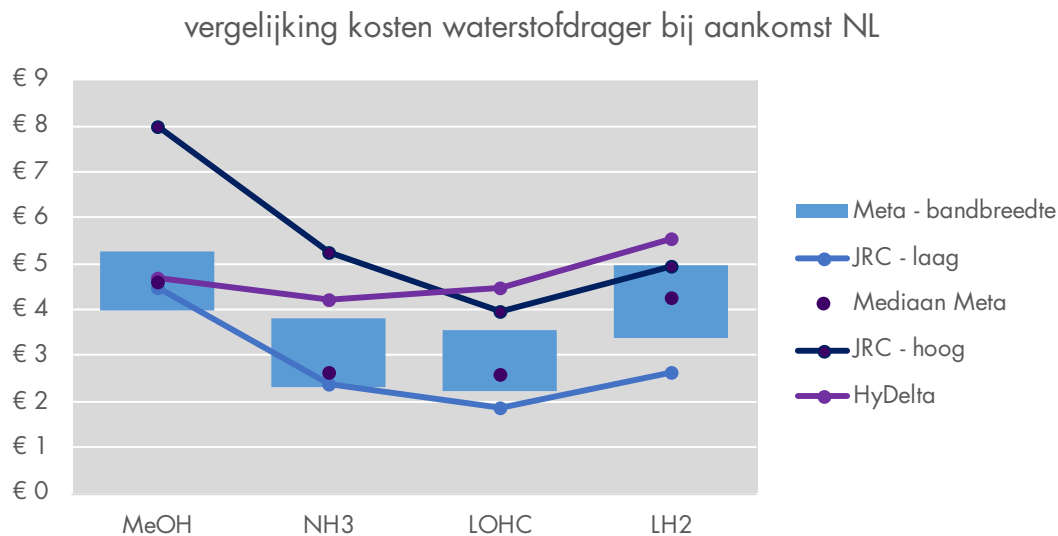


Figuur 89: Kostenopbouw van waterstofdragers volgens HyDelta en JRC vergeleken voor methanol (met DAC), ammoniak, LOHC en vloeibare waterstof (in euro/kg H₂-equivalent)

We hebben HyDelta en JRC ook vergeleken met de Metastudie. Deze vergelijking is alleen mogelijk voor het deel van de ketens waar de Metastudie over gaat, dus exclusief conversie in Nederland. Het is duidelijk dat de kosten volgens HyDelta, JRC en de Metastudie verschillen. We zien dat de kosten van de waterstofdragers volgens HyDelta meestal hoger zijn dan volgens de Metastudie, behalve in het geval van methanol. De kosten volgens de Metastudie vallen voor de meeste

⁸² HyDelta (2022), WP7B Technical analysis, D7B.3 – *Cost analysis and comparison of different hydrogen carrier import chains and expected cost development*, 31 March, 63; JRC1 (2022), *Assessment of Hydrogen Delivery Options. Feasibility of Transport of Green Hydrogen within Europe*, JRC Technical Report, 20.

dragers binnen de bandbreedte van de JRC-scenario's, alleen voor methanol zitten de kosten volgens de Metastudie aan de onderkant van de bandbreedte en deels erbuiten.



Figuur 90: Vergelijking van HyDelta en JRC met Metastudie (in euro/kg H₂-equivalent)

We kunnen met de ons ter beschikking staande informatie geen oordeel vellen welke studie het best is. Voor de basissituatie hebben we gekozen voor de HyDelta-dataset. Om de invloed van andere kosten te onderzoeken voeren we een gevoeligheidsanalyse uit met de dataset van het hoge scenario van JRC. In die gevoeligheidsanalyse is methanol dan flink duurder, ammoniak duurder, LOHC iets duurder, en vloeibare waterstof iets goedkoper dan in de basissituatie. De kosten van LSM en NaBH₄ blijven in de gevoeligheidsanalyse gelijk met de basissituatie. Zowel in de basissituatie als in de gevoeligheidsanalyse gaan we uit van methanolsynthese in 2030 met CO₂ uit een industriële puntbron in plaats van *direct air capture* – de datasets zijn hiervoor gecorrigeerd.

Gevoeligheidsanalyse CCS op Nederlandse conversie-installaties

In de basissituatie stoten de *steam reforming*-installaties voor methanol en methaan CO₂ uit in de lucht. In een gevoeligheidsanalyse hebben we het effect bepaald van CO₂-afvang en -opslag bij de Nederlandse installaties; we gaan ervan uit dat bij de synthese geen CCS wordt toegepast (in Europa en exportland). Dit leidt tot gewijzigde aannames voor de kosten: op grond van de basisbedragen uit de Stimuleringsregeling Duurzame Energie++ gaan we uit van meerkosten van 110 euro per ton CO₂. Dit is inclusief 15 euro per ton CO₂ voor ondergrondse opslag en 45 euro per tonCO₂ voor transport naar de opslag.

Transportkosten in Nederland

De importketen loopt in de HyDelta-studie tot en met conversie naar waterstof in Nederland. De ketens in deze MCA-studie lopen tot aan de poort van de eindgebruiker. Bij de kosten van import tellen we daarom de kosten voor transport in of door Nederland op. Deze kosten zijn

berekend met kentallen van Panteia (integrale kosten per tonkilometer voor vervoer over de weg, het spoor en binnenwateren).⁸³

Tabel 13: Transportkosten in euro per ton waterstofequivalent over weg, spoor en water en met buisleidingen

Drager	Kosten opslag/overslag en transport in ton H ₂ eq			Modaliteit			
	Import	Overslag/ import	Opslag eindge- bruiker	Buis/aard- gasnet/H ₂ - net	Weg	Trein	Schip
H ₂ -gas				€ 7			
NH ₃	€ 3.116	€ 145	€ 31	€ 28	€ 160	€ 23	€ 44
LH ₂	€ 4.831	€ 704	€ 151		€ 140	€ 20	€ 39
MCH*	€ 4.193	€ 188	€ 48	€ 119	€ 519	€ 75	€ 146
DBT*	€ 4.193	€ 188	€ 48	€ 119	€ 519	€ 75	€ 146
MeOH	€ 3.846	€ 29	€ 11	€ 10	€ 220	€ 32	€ 62
LSM	€ 4.531	€ 76	€ 16		€ 110	€ 16	€ 31
NaBH ₄ *	€ 11.350	€ 100	€ 21		€ 135	€ 20	€ 21
CH ₄ -gas				€ 0			

*) In de kosten voor de LOHC's en natriumboorhydride is rekening gehouden met de retourstroom van *spent fuel*: dubbele kosten voor opslag, dubbele kosten van LOHC-transport per buisleiding vanwege retourbuizen en toeslag voor meerkosten van retourstroom over weg, spoor en water met hogere beladingsgraad dan bij leveringen die leeg teruggaan.

De transportkosten van waterstofdragers door buisleidingen hebben we berekend met cijfers van JRC en van Delta-Rijn-Corridor (teamanalyse op basis van openbare bronnen en informatie van marktpartijen).⁸⁴

- Voor ammoniak volgen we de gegevens van de geplande Delta-Rijn-Corridor-buisleiding. Deze kosteninschatting is aanmerkelijk hoger dan volgens JRC1, met als belangrijkste redenen dat de buisdoorsnede groter is (24 inch vs. 18 inch) en er in de gevraagde marktofferte rekening zal zijn gehouden met de gestegen grondstofprijzen en daarmee hogere kosten per kilometer buisleiding. Voor OPEX volgen we wel de JRC1-opgave. De capaciteit van de DRC-buisleiding is voldoende om het volledige volume ammoniak (1578 kton waterstofequivalent) te kunnen vervoeren. Aan het tracé zijn 3 pompstations met elk 2 pompen verbonden.
- Voor methanol nemen we de data van JRC1 over. Sommige van deze data heeft JRC afgeleid van data van ammoniak bij gebrek aan originele data voor methanolbuisleidingen, wij hebben die schalingsfactoren overgenomen. Vervoer van het volledige volume methanol (1578 kton waterstofequivalent) vereist twee 18-inch buisleidingen zoals gemodelleerd door JRC1. Elk buisleidingtracé heeft 3 pompstations met elk 2 pompen.

⁸³ Panteia (2023), Cost Figures for Freight Transport – final report, commissioned by Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM), January 2023.

⁸⁴ JRC1: JRC, Assessment of Hydrogen Delivery Options Feasibility of Transport of Green Hydrogen within Europe, 2022; en JRC2: European Commission, Joint Research Centre, Arrigoni, A. et al (2024), *Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg; Decisio (2023), MKBA *Delta Rhine Corridor* Fase 2, voor Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 22 december 2023.

- Voor LOHC nemen we eveneens de data van JRC1 over. In JRC1 zijn data voor DBT-transport gebruikt. We hebben geen afzonderlijke data voor MCH-transport gevonden en nemen daarom de data voor DBT over voor MCH. Om het volledige volume van de LOHC's (1578 kton waterstofequivalent) te kunnen vervoeren zijn 26 sets van 32-inch resp. 28-inch heen- en retourbuisleidingen nodig zoals gemodelleerd door JRC1. Dit drijft de CAPEX van de buizen en pompstations omhoog. Per richting zijn er 2 pompstations met elk 2 pompen per buis.
- Voor het landelijke waterstofnet nemen we de cijfers van JRC1 als uitgangspunt. De aanleg van een nieuwe buisleiding kost tussen 1,4 en 3,4 M€/km, en hergebruik van een bestaande aardgasleiding kost tussen 0,2 en 0,6 M€/km. Omdat in de MKBV is aangenomen dat 80% van het tracé zal bestaan uit hergebruikte aardgasleidingen rekenen we met 0,8 M€/km.⁸⁵ De capaciteit van de buisleiding voor het representatieve tracé is voldoende om het volledige volume (1578 kton waterstof) te kunnen vervoeren. Gasunie verwacht dat aanvankelijk geen compressie in het net nodig is om de waterstof te transporteren, de invoeddruk volstaat hiervoor. Voor vergelijkbaarheid van de ketens gaan we toch uit van compressie. We gaan uit van dezelfde aantallen als in het landelijke aardgasnet, namelijk één compressorstation per 200 km, met daarin twee compressoren. Dit komt overeen met de aanname in JRC1. De OPEX voor de buisleiding is overgenomen van de studies naar het landelijke waterstofnet (jaarlijks 1% over CAPEX). Het energieverlies voor compressie komt uit JRC2.
- Voor aardgasleidingen is de capaciteit van de buisleiding volgens het representatieve tracé voldoende om het volledige volume (1578 kton waterstofequivalent) te kunnen vervoeren. We gaan uit van één compressiestation voor het tracé van 200 km. Het energieverlies voor compressie komt uit JRC2. Dit lijkt laag ten opzichte van het energieverlies voor compressie van waterstof: volgens Gasunie zou dit dichterbij elkaar moeten zitten (factor 3 vanwege het verschil in energiedichtheid). Vanwege de consistentie met de andere dragers, gebruiken we de JRC2-data. Omdat het bestaande aardgasnetwerk voldoende is om de volumes te vervoeren, zijn er geen kosten aangenomen.

⁸⁵ Gasunie (2021), HyWay27: Waterstoftransport via het bestaande gasnetwerk? Eindrapport voor het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, juni 2021.

Tabel 14: Transportkosten met buisleidingen voor 200 km tracé

Transportkosten met buisleidingen	H ₂ 36"	LOHC 32"/28" (1)	NH ₃ 24" (DRC)	MeOH 18"	CH ₄ 36"
Capaciteit (kton/jr.)	2.180	1.000	17.164	6.893	12.724 (2)
Doorstroom tracé (kton/jr.)	1.578	25.800	8.884	12.545	6.280
Aantal buizen nodig	1	26	1	2	1
CAPEX buis (MEUR/km)	€ 0,8	€ 0,32	€ 4,0	€ 0,7	€ 2,2 (3)
CAPEX buis 200 km (MEUR)	€ 160	€ 3.328	€ 800	€ 280	€ 440
Levensduur	50	50	50 (4)	50 (4)	50
OPEX buis, % van CAPEX per jaar (5)	1%	0,04%	0,04%	0,04%	1%
Aantal compressie-/pompstations	1	104	3	6	1
CAPEX compressie-/pompstations (MEUR)	€ 12	€ 32	€ 6,6	€ 7,2	--
Levensduur	20	20	20	20	20
OPEX compressie-/pompstations (5)	1,2%	4%	4%	4%	1,2%
Energie-input compr./pompen (MWh/jr.)	577.548	211.560	122.400	73.440	90.432
Energiekosten (MEUR) (6)	€ 28,9	€ 10,6	€ 6,1	€ 5,6	€ 4,5
Rentepercentage	5%	5%	5%	5%	5%
Annuiteit per jaar per kton drager	€ 7.269	€ 7.263	€ 5.058	€ 1.301	€ 4.538 (3)
Annuiteit per jaar per kton H ₂ -equivalent	€ 7.269	€ 118.745	€ 28.476	€ 10.339	€ 18.062(3)

(1) Heen en retour.

(2) [Balgzand-Bacton-pijpleiding](#) als referentie: 36 inch, 230 km, capaciteit 42 miljoen m³ aardgas per dag.

(3) Inclusief kosten voor compressiestations. Voor kosten van buisleidingen bij publieke belang Betaalbaar veronderstellen we dat het bestaande gasnet kan worden gebruikt (geen kosten).

(4) JRC1 en DRC geven 40 jaar, maar we veronderstellen gelijke levensduren voor alle buisleidingen.

(5) JRC1 geeft hogere OPEX voor gasleidingen dan voor vloeistofleidingen.

(6) Gerekend met € 76/MWh in 2030, conform KEV en MKBV.

Opslagkosten decentraal

De kosten voor decentrale opslag zijn berekend als 3/14^e deel van de kosten van centrale opslag (3 dagen voorraad decentraal, 14 dagen voorraad centraal). Dit is gedaan omdat niet voor alle dragers cijfers voor kosten van decentrale opslag beschikbaar waren en wel voor centrale opslag. Voor centrale opslag is een voorraad van 14 dagen van het gemiddelde dagelijkse eindgebruik aangenomen, en voor decentrale opslag een voorraad van 3 dagen van het gemiddelde dagelijkse eindgebruik. Als de data (van JRC) een kostenverschil aangaven tussen centrale en decentrale opslag is hiervoor gecorrigeerd.

Niet meegerekende kosten en potentiële inkomsten

Niet in de kosten van de waterstofdragers meegerekende kosten zijn:

- Eventuele belastingen, invoerheffingen, vergunningskosten en dergelijke;
- Aanschaf of huur van grond, personeelskosten (in import- en conversiekosten, wel voor binnenlands transport), kosten voor veiligheidsvoorzieningen op locaties;
- Specifieke aanpassingen van infrastructuur om knelpunten op te lossen (onderdoorgang kanaal etc.);
- Risico en winstopslag;

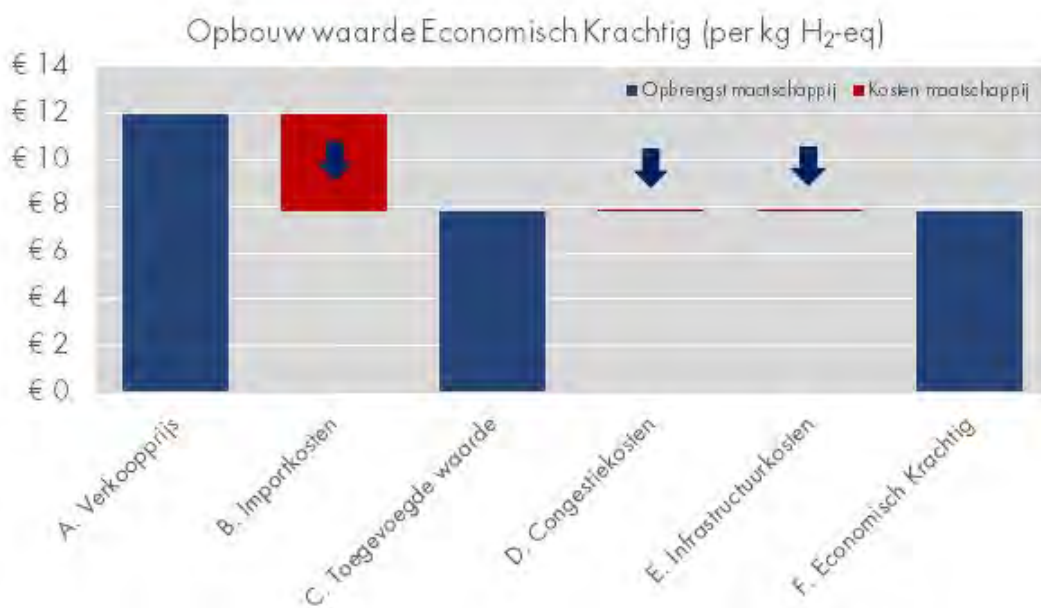
- Inkomsten uit de verkoop van bijproducten en warmte.

Kosten voor grond worden wel meegenomen bij het publiek belang Ruimte.

2. ECONOMISCH KRACHTIG

Voor het publieke belang Economisch krachtig hebben we gekozen voor een samengestelde indicator, die bestaat uit de toegevoegde waarde verminderd met maatschappelijke kosten van congestie en de maatschappelijke kosten van publieke infrastructuur, zie Figuur 91. Doorslaggevend is het verschil tussen de verkoopprijs en importkosten. De congestie- en infrastructuurkosten zijn hierbij verwaarloosbaar.

Als voorbeeld tonen we de opbouw van de waarde voor de indicator Economisch krachtig voor de DBT-leveringsketens. Het voorbeeld laat zien dat de waarde van Economisch krachtig verschilt tussen de leveringsketens van DBT door de al dan niet van toepassing zijnde congestiekosten en infrastructuurkosten. De importkosten van de DBT-leveringsketen met centrale conversie zijn miniem hoger dan de andere DBT-ketens vanwege de iets hogere verliezen van waterstof in de keten.



per kg H ₂ -equivalent	A. Verkoopprijs	B. Import	C. Toegevoegde waarde (A-B)	D. Congestiekosten	E. Infrastructuurkosten	Waarde Economisch Krachtig (C-D-E)
DBT - weg	€ 12,000	€ 4,214	€ 7,786	€ 0,017	€ 0,019	€ 7,750
DBT - water	€ 12,000	€ 4,214	€ 7,786	-	€ 0,002	€ 7,783
DBT - spoor	€ 12,000	€ 4,214	€ 7,786	-	€ 0,001	€ 7,785
DBT - buis	€ 12,000	€ 4,214	€ 7,786	-	-	€ 7,786
DBT - centrale conversie + waterstofnet	€ 12,000	€ 4,215	€ 7,785	-	-	€ 7,785

Figuur 91: Illustratie bepaling waarde Economisch Krachtig voor DBT (waarden grafiek voor weg)

Toegevoegde waarde

Toegevoegde waarde is gedefinieerd als omzet minus inkoopkosten.

Voor de berekening van omzet gaan we uit van een indicatieve prijs voor waterstof per kilogram bij levering aan eindgebruikers. Indien de waterstof in een andere vorm geleverd wordt dan als vloeibare of gasvormig waterstof onder druk, dan geldt een afgeleide prijs per waterstofequivalent.

We gebruiken niet de huidige marktprijzen voor ammoniak, methanol etc. Deze zijn niet representatief voor toekomstige verkoopprijzen van de groene waterstofdragers omdat de marktprijzen bepaald worden door de huidige overwegend grijze waterstofproductie. Als we het verschil in prijs tussen grijze waterstof en grijze ammoniak per waterstofequivalent met elkaar vergelijken, dan is ammoniak nu veel te duur voor het gebruik als waterstofdrager; het is goedkoper om grijze waterstof te kopen terwijl voor ammoniak ook nog extra conversiestappen nodig zijn die de kosten verhogen.

Als we uitgaan van dezelfde prijs voor waterstofdragers uitgedrukt in waterstofequivalent, en we corrigeren deze voor de benodigde conversiekosten per waterstofequivalent, dan krijgen we wel een logischere prijsvergelijking. We kiezen daarom een verkoopprijs voor waterstof en trekken daar de conversiekosten per waterstofequivalent vanaf om de verkoopprijzen voor andere waterstofdragers te bepalen.

De precieze hoogte van de gekozen verkoopprijs van waterstof is niet van belang omdat het gaat om het verschil tussen inkoop en verkoop: dit bepaalt de score op deze indicator, samen met de hiernavolgende kostenposten. Het gaat hier overigens om de kale verkoopprijs zonder opwaarts potentieel zoals waarde van Hernieuwbare Brandstof Eenheden (HBE's).⁸⁶

Tabel 15: Veronderstelde omzet per ton voor groene waterstofdrager in 2030

	Indicatieve verkoopprijs per ton	
H ₂ -gas	€ 12.000	Na conversie van alle waterstofdragers
LH ₂	€ 12.000	
NH ₃	€ 11.700	Gecorrigeerd voor conversiekosten naar H ₂
MeOH	€ 11.876	Gecorrigeerd voor conversiekosten naar H ₂
CH ₄ -gas	€ 10.800	Gecorrigeerd voor conversiekosten naar H ₂

Congestie

Er wordt geen congestie verondersteld op het spoor of waterwegen⁸⁷, alleen in het wegvervoer. Op buisleidingen is congestie niet van toepassing. Kosten van congestie zijn berekend door de transportvolumes (tonkm) te vermenigvuldigen met de door het KiM gebruikte kentallen van CE

⁸⁶ HBE's gaan vanaf 2026 ERE's heten (Emissie Reductie Eenheden). Voor de industrie komen er HWI's bij (Hernieuwbare Waterstofeenheden voor de Industrie).

⁸⁷ Mogelijke congestie door het gebruik van kleinere schepen of een smallere vaargeul bij laagwatersituaties of doordat er strengere veiligheidseisen gelden voor schepen met bijv. ammoniak in sluizen is niet meegenomen.

Delft.⁸⁸ Het KiM kiest, in tegenstelling tot wat CE Delft meestal gebruikt, voor de congestiekentallen op basis van *'dead weight'* i.p.v. voertuigverliesuren.⁸⁹ Dit levert een lagere inschatting op. Voor vloeibare waterstof wordt een correctie op deze getallen toegepast vanwege de lage energiedichtheid: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

Tabel 16: Waarderingskentallen voor marginale kosten van congestie (bron CE Delft 2019)

Waarderingskentallen voor kosten van congestie	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm*	Toelichting
Weg	€ 5,20	gemiddelde vrachtwagen
Spoor	€ -	elektrisch goederentrein
Water	€ -	binnenvaart
Buisleiding, waterstofnet, aardgasnet	€ -	geen informatie

*) Correctie LH₂: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

Kosten gebruik ruimte en publieke infrastructuur

Voor vervoer van waterstofdragers wordt gebruik gemaakt van publieke infrastructuur, die ruimte inneemt en beheer en onderhoud vraagt. De kosten van gebruik van ruimte en publieke infrastructuur zijn berekend door de transportvolumes (tonkm) te vermenigvuldigen met kentallen van KiM/CE Delft.⁹⁰ Voor buisleidingen ontbreken soortgelijke waarderingskentallen. Beheer en onderhoudskosten van buisleidingen worden verwerkt in de transportkosten die aan de gebruikers worden berekend, zodat het niet onredelijk is om de waardering van publieke infrakosten op nul te zetten. Ruimtebeslag van buisleidingen wordt wel meegeteld bij het publiek belang Ruimte. Voor vloeibare waterstof wordt een correctie op deze getallen toegepast vanwege de lage energiedichtheid, die meer transportbewegingen veroorzaakt: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

Tabel 17: Waarderingskentallen voor marginale kosten van ruimte en infrastructuurkosten (bron KiM 2023)

Waarderingskentallen (marginale) ruimtekosten/infrakosten	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm*	Toelichting
Weg	€ 5,72	gemiddelde vrachtwagen
Spoor	€ 0,31	elektrische goederentrein
Water	€ 0,73	binnenvaart
Buis - nieuw	€ - (PM)	geen kentallen bekend, kosten betaald door gebruikers

*) Correctie LH₂: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

⁸⁸ O. Jonkeren en J. Francke, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM, Kennisbasis Goederenvervoer, Notitie, Februari 2023. CE Delft, Toekomstverkenning, De prijs van een reis, Verkennende analyse richting 2050, mei 2022.

⁸⁹ Er zijn twee veelgebruikte concepten voor totale/gemiddelde congestiekosten: vertragskosten en *'deadweight loss'* kosten. Bij de vertragskosten worden de kosten die samenhangen met alle vertragingen die weggebruikers ondervinden (ten opzichte van een situatie met een vrije doorstroming of een bepaalde referentiesnelheid) meegenomen als congestiekosten. De *'deadweight loss'* kosten verwijzen naar de kosten die optreden ten opzichte van het optimale congestieniveau. Dat wil zeggen, het congestieniveau waarbij de marginale maatschappelijke congestiekosten even groot zijn als de marginale kosten van congestie.

⁹⁰ O. Jonkeren en J. Francke, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM, Kennisbasis Goederenvervoer, Notitie, Februari 2023. CE Delft, Toekomstverkenning, De prijs van een reis, Verkennende analyse richting 2050, mei 2022.

3. BETROUWBAAR

Met betrouwbaar bedoelen we in deze studie de mate waarin waterstofketens robuustheid en leveringszekerheid bieden. Als levering minder zeker is, zal dit in de keten worden opgevangen door meer opslagcapaciteit in te bouwen. Als indicator voor betrouwbaarheid nemen we daarom de benodigde extra opslagcapaciteit die in de keten moet worden ingebouwd om een gelijke leveringszekerheid te bieden als de huidige leveringsketens voor fossiele brandstoffen.

Voor het bepalen van Betrouwbaar hanteren we gelijke aannames over de behoefte aan opslagcapaciteit in de ketens om een vergelijkbare basissituatie op te stellen. Voor onze modellering nemen we de aannames van de MKBV over:

- Opslagcapaciteit in importhavens: 14 dagen (14/365 maal totaal volume)
- Bij eindgebruiker: 3 dagen.

In de praktijk zullen er verschillen zijn tussen eindgebruikersgroepen, en er zijn verschillen tussen de waterstofdragers waardoor er behoefte kan zijn aan meer opslagcapaciteit in de keten.⁹¹ Deze behoefte hebben we gekwantificeerd en gesorteerd door te kijken naar eigenschappen van de dragers en de ketens, op basis van literatuur en inschattingen van experts.⁹²

Betrouwbaarheid van de keten wordt door veel factoren beïnvloed, waaronder economische conjunctuur, geopolitieke situatie, weersomstandigheden, schaarste in de transportmarkt e.d. Wij richten ons alleen op de factoren die rechtstreeks verbonden zijn met en onderscheidend zijn voor de waterstofdragers. Moeizame ruimtelijke inpasbaarheid van de ketens kan effect hebben op de betrouwbaarheid van ketens maar komt bij het publieke belang Ruimte aan bod. Of de waterstofdrager in 2030 een commodity is waarin grootschalig gehandeld wordt, en de wijze van marktordering, is ook van belang voor betrouwbaarheid van ketens.

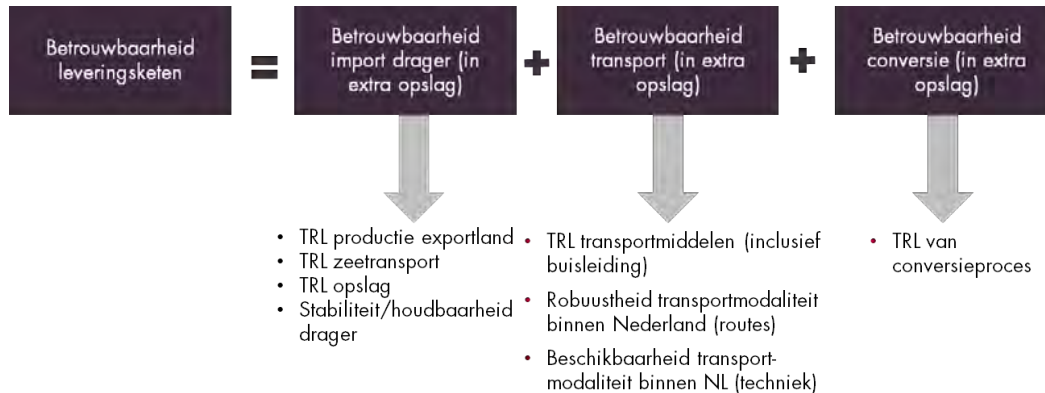
Voor de expertsessie die voor dit onderwerp is gehouden is een methode voorgesteld, waarbij de mate van betrouwbaarheid van de leveringsketen wordt uitgedrukt in de behoefte aan (extra) voorraadcapaciteit in de keten. Per ketenonderdeel schatten we in hoe betrouwbaar de keten is ten opzichte van de fossiele keten. Voor elke keten tellen we de betrouwbaarheid (uitgedrukt in de extra opslagbehoefte van de eindgebruiker) van de ketenonderdelen bij elkaar op tot een totaalinschatting. Het wordt dus een relatieve score: de meest betrouwbare keten krijgt een 1, de minst betrouwbare een 0. Een beschouwing van betrouwbaarheid kent vele onzekerheden, maar door het gebruik van een standaardmethode voor alle ketens veronderstellen we dat de scores ten opzichte van elkaar wel representatief zijn.

De keten wordt verdeeld in drie stappen, met per stap één of meer indicatoren van betrouwbaarheid (zie Figuur 92).

⁹¹ Nederland houdt 90 dagen strategische reserve van brandstoffen aan. We gaan ervan uit dat het in 2030 nog niet nodig is om 90 dagen reserve van waterstofdragers aan te houden omdat er nog opslag is van fossiele brandstoffen. Voor 2050 is onze aanname dat voldoende strategische reserve wordt aangehouden, bijvoorbeeld ondergrondse opslag van waterstof (zoutcavernes, eventueel gasvelden), verbonden aan het nationale buisleidingennetwerk, en niet in de vorm van waterstofdragers. Voor stoffen die naast als waterstofdrager ook direct gebruikt kunnen worden zullen wel strategische reserves nodig zijn.

⁹² Dit is de uitkomst van *expert judgement* op basis van beste inschattingen die experts ter plekke in een gestructureerde discussiesessie konden geven. Met veel waterstofdragers is nog weinig ervaring, of wel met de stof maar niet in de functie als waterstofdrager. Een uitgebreidere wetenschappelijke studie is aan te bevelen, evenals ontwikkeling en demonstraties van ketenonderdelen die nog niet TRL 9 halen.

- Import van waterstofdragers: TRL (*technology readiness level*) van productie van waterstofdrager uit waterstof, TRL van zeeschepen en opslag, stabiliteit/houdbaarheid van de drager, schaalbaarheid van vloot en opslag
- Distributie van waterstofdragers: TRL van transportmiddelen, beschikbaarheid van transportmiddelen, en robuustheid van modaliteit
- Conversie-installaties: TRL van installaties en beschikbaarheid back-up



Figuur 92: Bepaling van betrouwbaarheid van leveringsketens voor waterstofdragers

De volgende tabel geeft een samenvattend overzicht van de TRL's van alle onderdelen van leveringsketens van waterstofdragers naar en in (en door) Nederland. De meeste ketenonderdelen worden ingeschaald op TRL 9, maar in veel ketens zijn er onderdelen die lager zijn ingeschaald. Deze 'zwakke plekken' zijn vetgedrukt. Na Tabel 18 wordt de beoordeling van de verschillende ketenonderdelen apart beschreven.

Tabel 18: TRL (Technology Readiness Levels) van onderdelen van leveringsketens waterstofdragers naar en in Nederland. De zwakke plekken in de ketens (TRL lager dan 9) zijn dikgedrukt.

	TRL productie waterstofdrager in exportland	TRL zee-transport	TRL opslag	TRL binnenlands transport (weg, spoor, water, buisleiding)	TRL conversie-installaties
H ₂ -gas			TRL9, zout-cavernes (VS):	TRL9, buisleiding	
NH ₃	TRL9, grootschalige productie meestal met H ₂ uit aardgas maar ook elektrolyse	TRL9, <i>dedicated</i> NH ₃ -tankers	TRL9, grootschalig	TRL9, elk behalve buisleiding TRL7-8	Kraken: TRL9 klein-/mediumschalig, TRL7 grootschalig, demonstraties gepland Synthese uit H ₂ : TRL9
LH ₂	TRL9, kleine/medium schaal TRL7-8, grote schaal	TRL7-8, pas 1 dergelijk schip	TRL9 kleine schaal, TRL5-6 voor grote schaal	TRL9, elk behalve tankschip TRL5 Buisleiding n.v.t.	Verdamping: TRL9, kleinschalig, TRL8 grootschalig Liquefactie: TRL9 kleinschalig, TRL8 grootschalig
DBT	Hydrogenering: TRL8 kleinschalig	TRL9, olietankers	TRL9, zeer grootschalig (olieproducten)	TRL9, elk	Dehydrogenering: TRL8 kleinschalig
MCH	Hydrogenering: TRL8 kleinschalig	TRL9, olietankers	TRL9, zeer grootschalig (olieproducten)	TRL9, elk	Dehydrogenering: TRL8 kleinschalig
MeOH	TRL9, grootschalige productie meestal met H ₂ uit aardgas maar ook elektrolyse	TRL9, <i>dedicated</i> tankers	TRL9, zeer grootschalig (olieproducten)	TRL9, elk	TRL7, steam reforming naar H₂ TRL9, synthese uit H ₂
LSM	TRL9, kleinschalige productie TRL8, grootschalige productie	TRL9, LNG-tankers	TRL9, zeer grootschalig	TRL9, elk Buisleiding n.v.t.	TRL9, <i>steam reforming</i> naar H ₂ TRL9, verdamping:
NaBH ₄	TRL9, NaBH ₄ -synthese TRL5, recyclingstappen	TRL9, containerschepen	TRL9, poeders in <i>big bags</i> en silo's	TRL9, elk	TRL9, NaBH ₄ -synthese TRL5, recyclingstappen
CH ₄ -gas	zie LSM	zie LSM	TRL9, zout-cavernes en lege gasvelden	TRL9, buisleiding	TRL9, <i>steam reforming</i> naar H ₂

1. Import van waterstofdragers

We kijken hier naar vier factoren:

- TRL van productie van de waterstofdrager: voor de meeste waterstofdragers is productie op grote schaal in exportlanden technisch mogelijk, ook al is dit nog niet voor elk op die grote schaal (ordegrootte >100 kton waterstof) bewezen. Het meest onzeker is de natriumboorhydrideketen, waarvoor meerdere ketenstappen nog niet gede-

monstreerd zijn. De keten met vloeibare waterstof en de LOHC-ketens zijn op medium-schaal wel bewezen en opschaling lijkt niet zozeer een technisch als wel een economisch probleem (zekerheid over matches van aanbod en vraag.)

- TRL van zeeschepen: voor de meeste waterstofdragers zijn transportmiddelen met TRL9 beschikbaar, vloeibare waterstof is de uitzondering. Hiervoor is nu een enkel schip in de vaart, wel zijn er meer ontwerpen en voornemens om te bouwen.
- TRL van opslag: voor de meeste waterstofdragers zijn opslagfaciliteiten met TRL9 beschikbaar, tanks voor vloeibare waterstof en opslag van natriumboorhydride op grote schaal zijn de uitzondering.
- Stabiliteit/houdbaarheid van de drager: hoewel er verschillen zijn tussen de waterstofdragers beschouwen de experts dit niet als onderscheidend voor de vraag of extra opslag nodig is in de keten. Er is voldoende ervaring om de waterstofdragers zodanig te vervoeren en op te slaan dat de leveringszekerheid gewaarborgd blijft.

In de expertsessie is ook de factor schaalbaarheid van productie van waterstofdragers naar voren gebracht: als de omvang van de vloot of installaties sterk moet groeien kan dat risico's voor betrouwbaarheid opleveren. Dat heeft echter vooral te maken met de implementatie in de opbouw-fase en niet met de betrouwbaarheid van de keten als die is gevormd. In de expertsessie over adaptiviteit is geconcludeerd dat nu al aanwezige assets die gebruikt *zouden kunnen* worden voor waterstofdragers al bezet zijn (commerciële bestemming hebben, er is geen vrije overcapaciteit) en dat er dus in alle gevallen uitbreiding van assets nodig is voor de toepassing als waterstofdrager. We beschouwen technische schaalbaarheidsrisico's als niet onderscheidend, commercieel is de inzetbaarheid van assets voor meerdere stoffen wel een voordeel; zie bijlage adaptiviteit.

Tabel 19: Betrouwbaarheid leveringsketens waterstofdragers: import naar Nederland

	TRL productie waterstofdrager in exportland	TRL zee-transport	TRL opslag	Stabiliteit/houdbaarheid drager	Extra opslag
H ₂ -gas			TRL9 zoutcavernes (VS)	Stabiel en oneindig houdbaar onder druk	0 (2030)+ 0 (2050)
NH ₃	TRL9, grootschalige productie meestal met H ₂ uit aardgas maar ook elektrolyse	TRL9, dedicated NH ₃ -tankers	TRL9, grootschalig	Stabiel en oneindig houdbaar onder druk/gekoeld	1 (2030)+ 0 (2050)
LH ₂	TRL9 kleine/medium-schaal, TRL7-8 grote schaal , keten gedemonstreerd tussen Australië en Japan	TRL7-8, pas 1 dergelijk schip	TRL9 kleine schaal, TRL5-6 voor grote schaal	Stabiel maar <i>boil-off</i> -containment nodig	10 (2030) +3 (2050)
DBT	Hydrogenering: kleinschalig TRL8 , alle ketenonderdelen gedemonstreerd (Europa)	TRL9, olietankers	TRL9, zeer grootschalig (olieproducten)	Stabiel en oneindig houdbaar	7 (2030)+ 3 (2050)
MCH	Hydrogenering: kleinschalig TRL8 , alle ketenonderdelen gedemonstreerd (Japan), grote markt voor toluen in chemie	TRL9, olietankers	TRL9, zeer grootschalig (olieproducten)	Stabiel en oneindig houdbaar	4 (2030)+ 0 (2050)
MeOH	TRL9, grootschalige productie meestal met H ₂ uit aardgas maar ook elektrolyse	TRL9, dedicated tankers	TRL9, zeer grootschalig (olieproducten)	Stabiel en oneindig houdbaar	0 (2030)+ 0 (2050)
LSM	TRL9, kleinschalige productie; grootschalige productie TRL8	TRL9, LNG-tankers	TRL9, zeer grootschalig	Stabiel maar <i>boil-off</i> -containment nodig	0 (2030)+ 0 (2050)
NaBH ₄	NaBH ₄ -synthese TRL9, recyclingstappen TRL5 , nog niet alle ketenonderdelen gedemonstreerd	TRL9, bulkschepen (evt. containers)	TRL9, grootschalig (poeders); big bags worden t.z.t. vervangen door andere opslag, nog niet <i>mature</i>	Stabiel mits droog (additioneel risico bij grote volumes)	14 (2030)+ 6 (2050)
CH ₄ -gas			TRL9 zoutcavernes en lege gasvelden	Stabiel en oneindig houdbaar onder druk	0 (2030)+ 0 (2050)

2. Distributie van waterstofdragers

We kijken hier naar drie factoren:

- TRL van transportmiddelen: voor de meeste waterstofdragers zijn transportmiddelen met TRL9 beschikbaar, uitzonderingen zijn binnenvaarttankschepen voor vloeibare waterstof, en langeafstand-ammoniakbuisleidingen door bebouwde omgeving en met grote diameter.

- Beschikbaarheid van transportmodaliteit: dit baseren we op dezelfde bronnen als de MKBV⁹³. Deze geven voor wegvervoer 98,5% beschikbaarheid, voor regulier spoor 98,6%, voor binnenvaart 98,0%, en voor buisleiding 99,99%.
- Robuustheid van routes per modaliteit: als er uitwijkmogelijkheden zijn in geval van stremmingen/obstakels is de keten betrouwbaarder. Als een weg gestremd is zijn er nog andere routes. Een verstoring op het spoor biedt minder alternatieve routes dan in het wegvervoer. Dat geldt ook voor de binnenvaart, en des te meer voor binnenvaart naar Duitsland. Voor buisleidingen zijn ook geen uitwijkmogelijkheden.

De inschatting van de experts is dat er alleen in het geval van de binnenvaart reden is om extra opslagcapaciteit in de keten in te bouwen. Een periode van laagwater maar ook hoogwater houdt doorgaans enige tijd aan. Gekozen is voor 7 eenheden extra opslag. De lagere TRL voor binnenvaarttankschepen voor vloeibare waterstof⁹⁴ en LSM en de lagere TRL van langeafstands-ammoniakbuisleidingen door bebouwde omgeving⁹⁵ wordt niet gezien als een reden om extra opslagcapaciteit te organiseren, in 2030 kunnen de TRL's bovendien al zijn opgeschoven (en in 2050 helemaal).

De binnenvaartregels voor het doorvaren bij sluisen kunnen betrekking hebben op de doorvaart van schepen die bepaalde gevaarlijke stoffen vervoeren. Bij de doorvaart bij sluisen kunnen ook beperkingen gelden. Het vervoer van ammoniak valt hieronder. Dit is niet expliciet meegenomen bij de beoordeling.

⁹³ De cijfers voor weg en spoor volgens de MKBV hebben we omgedraaid omdat hier sprake lijkt te zijn van omissie. De originele bron van RWS geeft een betrouwbaarheid van 98,5% voor de weg.

⁹⁴ Er is ook nog geen regelgeving voor LH₂-vervoer per binnenvaart.

⁹⁵ Er is ervaring in Nederland met leidingen voor gevaarlijke stoffen zoals ammoniak maar dit zijn relatief kleine afstanden in dunbevolkte gebieden (TRL 9). Een ammoniakleiding door Nederland over lange afstand en deels door bebouwde omgeving is nog niet volledig ontworpen. Nederland heeft nog geen ervaring met veel afsluiters in lange leidingen met beveiligingen. Mogelijk moeten er ook drukstations tussen komen om de flow en druk constant te houden. Inschatting is dat de TRL 7-8 is voor langeafstand-ammoniakbuisleidingen met kleine diameter en lager voor een grote diameter buisleiding.

Tabel 20: Betrouwbaarheid leveringsketens waterstofdragers: distributie in/door Nederland

Keten onderdeel	Tankwagens (weg)	Extra opslag	Ketelwagon (spoor)	Extra opslag	Tankschip (binnenvaart)	Extra opslag	Buisleidingen incl. pompen/compressoren	Extra opslag
H ₂ -gas							TRL9 – geen uitwijk – 99,99%	0
NH ₃	TRL9 – veel uitwijk – 98,5%	0	TRL9 – weinig uitwijk – 98,6%	0	TRL9 – weinig/ geen uitwijk – 98,0%	7	TRL7-8 – geen uitwijk – 99,99%	0
LH ₂	TRL9 – veel uitwijk – 98,5%	0	TRL9 – weinig uitwijk – 98,6%	0	TRL5 – weinig/ geen uitwijk – 98,0%	7		
DBT	TRL9 – veel uitwijk – 98,5%	0	TRL9 – weinig uitwijk – 98,6%	0	TRL9 – weinig/ geen uitwijk – 98,0%	7	TRL9 – geen uitwijk – 99,99%	0
MCH	TRL9 – veel uitwijk – 98,5%	0	TRL9 – weinig uitwijk – 98,6%	0	TRL9 – weinig/ geen uitwijk – 98,0%	7	TRL9 – geen uitwijk – 99,99%	0
MeOH	TRL9 – veel uitwijk – 98,5%	0	TRL9 – weinig uitwijk – 98,6%	0	TRL9 – weinig/ geen uitwijk – 98,0%	7	TRL9 – geen uitwijk – 99,99%	0
LSM	TRL9 – veel uitwijk – 98,5%	0	TRL9 – weinig uitwijk – 98,6%	0	TRL9 – weinig/ geen uitwijk – 98,0%	7		
NaBH ₄	TRL9 – veel uitwijk – 98,5%	0	TRL9 – weinig uitwijk – 98,6%	0	TRL9 – weinig/ geen uitwijk – 98,0%	7		
CH ₄ -gas							TRL9 – geen uitwijk – 99,99%	0

3. Conversie-installaties

We kijken hier naar de TRL van de conversie-installaties en maken daarbij onderscheid tussen centrale en decentrale conversie van waterstofdrager naar waterstof, en van synthese van (sommige) waterstofdragers met waterstof uit het nationale waterstofnet.

- De aanname is dat de centrale conversie-installaties in de importhavens pas actief worden nadat de importfaciliteiten op orde zijn. Zonder voldoende zekerheid over beschikbaarheid van grondstof zullen de installaties niet in gebruik worden genomen. Er is geen extra opslag nodig voor de installaties.
- Als er problemen zijn met een conversie-installatie stopt de waterstofinvoeding in het leidingennet. Er is dan redundantie door andere installaties, voldoende opslag in het net en de zoutcavernes om in de waterstofvraag van eindgebruikers te voorzien.

- Synthese van waterstofdragers met waterstof uit het nationale netwerk heeft geen extra opslag nodig, het net en de ondergrondse opslag bieden de opslag voor het proces.
- Decentrale conversie van waterstofdragers naar waterstof heeft wel extra opslag nodig als het buisleidingnet geen back-up biedt. Bij verstoringen van de aanvoer naar de decentrale conversie stremt het proces. We nemen hiervoor een extra opslagbehoefte van 2 eenheden aan.
- In de transitie naar een emissievrij energiesysteem zullen industriële eindgebruikers hun aansluiting op het aardgasnet behouden, deze biedt dan reservecapaciteit in geval van verstoorde levering van waterstofdragers.

Tabel 21: Betrouwbaarheid leveringsketens waterstofdragers: conversie-installaties

	TRL conversie-installaties	Extra opslagbehoefte
H ₂ -gas		
NH ₃	Kraken: klein/medium schalig TRL9, grootschalig TRL7, demonstraties gepland Synthese uit H ₂ : TRL9	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0
LH ₂	Verdamping: TRL9 kleinschalig, TRL8 grootschalig Liquefactie: TRL9 kleinschalig, TRL8 grootschalig LH ₂ importketen gedemonstreerd tussen Australië en Japan	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0
DBT	Dehydrogenering: kleinschalig TRL8 , alle ketenonderdelen gedemonstreerd (Europa)	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0
MCH	Dehydrogenering: kleinschalig TRL8 , alle ketenonderdelen gedemonstreerd (Japan)	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0
Methanol	Steam reforming naar H₂: TRL7 Synthese uit H ₂ : TRL9	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0
LSM	<i>Steam reforming</i> naar H ₂ : TRL9 Verdamping: TRL9	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0
Natriumboorhydride	NaBH ₄ -synthese TRL9, recyclingstappen TRL5 , nog niet alle ketenonderdelen gedemonstreerd	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0
CH ₄ -gas	<i>Steam reforming</i> naar H ₂ : TRL9	Centraal 0; decentraal +2 Synthese: 0

Ten slotte

Bovenstaande TRL-analyse was input voor een expertsessie. In deze sessie is ook rekening gehouden met andere elementen, zoals robuustheid van modaliteiten, om voor leveringsketens tot een beoordeling te komen op het publiek belang Betrouwbaar.

Ketens met retourlogistiek voor *spent fuel* (LOHC's, natriumboorhydride) zijn complexer waardoor er meer mis kan gaan. Dit leidt tot een lagere betrouwbaarheid. Dit komt vanzelf tot uitdrukking in de scores omdat er meermaals opslag en conversie plaatsvindt.

4. VEILIG

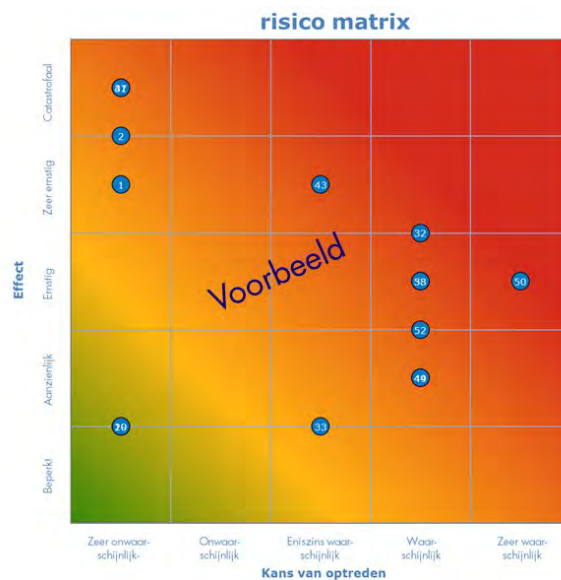
Voor het publieke belang Veilig worden drie deelindicatoren gebruikt: Omgevingsveiligheid, Cyberveiligheid en terrorisme, en Transportveiligheid.

Omgevingsveiligheid

Leveringsketens van waterstofdragers brengen risico voor de maatschappij met zich mee als gevolg van onbedoelde incidenten bij het transport en de verwerking van (gevaarlijke) waterstofdragers. Dit risico is gedefinieerd als de kans op optreden van incidenten maal het effect (gevolg) van deze incidenten. Voor het beoordelen van het risico van incidenten is de methodiek beschikbaar van het regionale risicoprofiel en de rijksbrede risicoanalyse nationale veiligheid.⁹⁶ Deze methodiek is zeer uitgebreid en is daarom in deze MCA-studie vereenvoudigd toegepast, voor een beperkt aantal incidentscenario's in de Nederlandse ketenstappen met uitzondering van eindgebruik, en voor abstracte in plaats van specifieke geografische locaties.

De kansen op het optreden van incidenten zijn afhankelijk van het aantal installaties of het aantal vervoersbewegingen en de afgelegde afstand en van de specifieke kans op een incident. De effecten (gevolgen) zijn afhankelijk van het gevaar van de stof uitgedrukt in het aantal dodelijke slachtoffers bij een incident. De focus bij de beoordeling lag op het meest ernstige incident, maar ook andere effecten werden in de beschouwing meegenomen.

Klasse waarschijnlijkheid	% per 5 jaar
Zeer onwaarschijnlijk	< 0.05%
Onwaarschijnlijk	0.05-0.5%
Enigszins waarschijnlijk	0.5-5%
Waarschijnlijk	5-50%
Zeer waarschijnlijk	50-100%
Klasse gevolgen	Bijv. aantal doden
Beperkt	1
Aanzienlijk	1-4
Ernstig (laag)	4-16
(hoog)	16-40
Zeer ernstig (laag)	40-160
(hoog)	160-400
Catastrofaal	> 400



Figuur 93: Schaalverdeling uit de regionale risicoprofielen en voorbeeld van risicomatrix

Het omgevingsrisico van de ketens is benaderd door in twee sessies met experts 6 type incidenten te beoordelen en zo risicomatrices in te vullen. Hieraan namen deskundigen van veiligheidsregio's, omgevingsdiensten, havenbedrijven, RIVM, kennisinstellingen, provincies en rijksoverheid. Figuur 93 toont een voorbeeld van een dergelijke matrix; de tabel licht toe hoe de schalen moeten

⁹⁶ Analistennetwerk Nationale Veiligheid, Rijksbrede Risicoanalyse Nationale Veiligheid, 2022, Arcadis, Gemini Consultants, Houdijk Advies, Stichting Werkgemeenschap tussen Techniek en Zorg, Handreiking regionaal risicoprofiel, 2009.

worden geïnterpreteerd. De schaalverdeling is logaritmisch: een hokje opschuiven is dus een factor 10 meer of minder. De experts hebben de positie van elk incident op de risicomatrix geschat; per keten zijn de risico's van de verschillende incidenten opgeteld. In overleg met de experts is besloten om deze matrices niet te publiceren omdat deze zonder context verkeerd begrepen kunnen worden en interpretaties een eigen leven kunnen gaan leiden. We beperken ons daarom in deze bijlage tot een samenvatting van de kwalitatieve argumenten in de beoordeling. Dit is de uitkomst van *expert judgement* op basis van beste inschattingen die experts ter plekke in een gestructureerde discussiesessie konden geven. Met veel waterstofdragers is nog weinig ervaring, of wel met de stof zelf maar niet in de functie als waterstofdrager. Een uitgebreidere wetenschappelijke studie is daarom aan te bevelen.

De informatie over kans en effect van de verschillende incidenten is vermenigvuldigd tot een risico per calamiteit en voor elke keten zijn de verschillende calamiteiten gecombineerd. Het totale risico is gebruikt om een onderlinge rangorde van de verschillende ketens te bepalen.

Incidentscenario's

De tabel geeft voor de hierna besproken 6 incidentscenario's de meest ernstige effecten. Een effectcategorie kan zijn een gifwolk, explosie of een plasbrand. Een incidentscenario is de beschrijving van een calamiteit die kan optreden.

Tabel 22: Meest ernstige effectcategorie per calamiteit (incidentscenario)

Drager	Meest ernstige effectcategorie per calamiteit					
	Wegvervoer	Spoorvervoer	Binnenvaart	Buisleiding	Opslag	Conversie
NH ₃ *	gifwolk	gifwolk	gifwolk, schade boven waterlijn	gifwolk	gifwolk	gifwolk
LH ₂	explosie, bleve (warm/koud)	explosie, bleve (warm/koud)	explosie	H ₂ -buisleiding: explosie	explosie	explosie
LOHC**	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand
MeOH	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand	plasbrand
LSM	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, bleve ⁹⁷ (warm/koud)	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, bleve (warm/koud)	wolkbrand, (plasbrand)	CH ₄ -buisleiding: explosie met fakkelbrand	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, bleve (warm koud)	wolkbrand, ook plasbrand, fakkelbrand, bleve (warm koud)
NaBH ₄	explosie (bij contact met water)	explosie (bij contact met water)	explosie (bij contact met water), schade onder waterlijn	n.v.t.	explosie (bij contact met water) ⁹⁸	explosie (bij contact met water)

⁹⁷ Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Een *bleve* is een explosie van een vat dat gevuld is met een vloeistof onder druk. Bij een koude *bleve* scheurt het opslagvat open door een aanrijding, constructiefout of slijtage. Bij een warme *bleve* barst het vat open door externe verhitting.

⁹⁸ Tot nu toe wordt deze stof niet meegenomen in berekeningen door omgevingsdiensten van risico's bij opslag. Bij rivieroverstromingen zou er risico kunnen zijn.

*) In de praktijk bestaat er onderscheid tussen NH₃ die vloeibaar is onder druk (warm) en die vloeibaar is door koeling (koud). De impact bij gekoeld vloeibaar is lager omdat de gifwolk zich minder snel verspreidt. Aan de andere kant zorgt het uitdampen van een plas ammoniak wel voor een langdurig ontstaan van gassen.

**) Bij de beoordeling in de expertsessies is geen onderscheid gemaakt tussen DBT en MCH. Beide stoffen zijn brandbaar, maar hebben geen groot effectgebied. De aanwezige hoeveelheid waterstof bepaalt vooral het aandachtsgebied en het groepsrisico. Voortschrijdend inzicht is dat er wel een verschil is tussen beide LOHC's: de hogere viscositeit van DBT dan van MCH is een gunstig aspect omdat DBT zich langzamer en mogelijk minder ver verspreidt dan MCH. Verder is MCH toxisch maar DBT niet.

Uitwerking per incidentscenario

Omdat het gaat om incidentscenario's treedt er *per definitie* een calamiteit op.

1. Calamiteit wegvervoer

Bij deze calamiteit ontstaat afhankelijk van de drager bijv. een plasbrand (bijv. LOHC) of toxische wolk (bijv. ammoniak) doordat de tank van de tankwagen openscheurt of lekt na bijvoorbeeld een botsing. Naast menselijke slachtoffers is er ook sprake van materiële schade en omgevingsemissies. Het risico is ingeschat voor het meest ernstige effect per waterstofdrager.

De *kans van optreden* is gerelateerd aan het aantal vervoersbewegingen van 200 km.

De *kans van optreden* is bepaald door de waarschijnlijkheid dat een bepaald incident zal optreden (bijvoorbeeld hoe waarschijnlijk is een ongeluk met een vrachtwagen) en is onder andere ook gerelateerd aan het aantal ritten (hoe meer vervoersbewegingen, des te hoger de kans). Omdat de binnenlandse tracelengte voor elke keten 200 km is, spelen verschillen in afstand geen rol. Het aantal risicovolle vervoersbewegingen is groter voor vloeibare waterstof (kleine hoeveelheden per tankwagen), LOHC (retourvervoersbewegingen met *spent fuel*), en natriumboorhydride (eveneens retourvervoersbewegingen met *spent fuel*). Daarnaast hangt de kans van optreden samen met stoffeigenschappen⁹⁹ en het soort incident: bij een scheur of lek in een ammoniaktankwagen ontstaat direct (bij transport onder druk) of na verdamping (bij transport als vloeistof, overigens verboden voor weg en spoor) een gifwolk. Bij andere stoffen ontstaat niet direct een plasbrand omdat er naast het vormen van de plas ook nog sprake moet zijn van ontsteking.

De *ernst van het effect* wordt het grootst ingeschat voor een gifwolk van ammoniak. In een willekeurig gebied is de blootstelling van aanwezige personen groter voor een gifwolk dan voor een plasbrand of explosie. Vloeibare waterstof ontsteekt gemakkelijker dan LSM maar de vervoerde hoeveelheid vloeibare waterstof is kleiner, en LSM brandt heftiger dan vloeibare waterstof en de andere dragers. LOHC komt moeilijk tot ontsteking. Het effect van een plasbrand van methanol wordt ingeschat als gelijk met dat van LOHC. Natriumboorhydride is stabiel tenzij het in aanraking komt met water. Dit is een aandachtspunt voor de brandweer.

⁹⁹ Tijdens opslag en transport is de vloeibare of vaste toestand veiliger omdat vloeistof en vaste stof het best hanteerbaar zijn onder omgevingsomstandigheden. Gasvormige waterstofdragers hebben door hoge drukken of lage temperaturen (om het gas vloeibaar te maken en houden) extra voorzorgsmaatregelen nodig voor veilige handling. NaBH₄-poeder moet droog worden bewaard en vervoerd. Hoog kookpunt en lage dampdruk zijn gunstig om lekkages te voorkomen, waaronder door *boil-off*. Als er toch lekkages zijn dragen hoge vlampunten (lage ontvlambaarheid) en zelfontbrandings-temperaturen bij aan het brand- en explosiegevaar, en aan warmtestraling binnen de conversie-installaties. Giftige stoffen (met hoge score op de Toxicity Potential Index) die bij lekkage gasvormig zijn of worden, kunnen leiden tot een gifwolk.

2. Calamiteit spoorvervoer

Bij deze calamiteit die grotendeels gelijk is aan een calamiteit op de weg, ontstaat bijv. een plasbrand (bijv. LOHC) of toxische wolk (bijv. ammoniak) doordat de tank van de ketelwagon openscheurt of lekt na bijvoorbeeld een botsing. Naast slachtoffers is er ook sprake van materiële schade en omgevingsemisies. Het risico is ingeschat voor het meest ernstige effect per waterstofdrager.

De *kans van optreden* is bepaald door de waarschijnlijkheid dat een bepaald incident zal optreden (bijvoorbeeld hoe waarschijnlijk is een ongeluk met een spoorwegwagon) en is ook gerelateerd aan het aantal ritten (hoe meer vervoersbewegingen, des te hoger de kans). Het aantal vervoersbewegingen is groter voor vloeibare waterstof (kleinere hoeveelheid getransporteerde energie per ketelwagon), LOHC (retourvervoersbewegingen met *spent fuel*), en natriumboorhydride (eveneens retourvervoersbewegingen met *spent fuel*). Daarnaast hangt de kans van optreden samen met stoffeigenschaften en het soort incident: bij een scheur of lek in een ammoniakketelwagon ontstaat veelal direct een gifwolk. Bij andere stoffen ontstaat in hetzelfde geval niet direct een plasbrand omdat er naast het vormen van de plas ook nog sprake moet zijn van ontsteking voordat het effect (de plasbrand) optreedt. Ten opzichte van wegvervoer is de kans op optreden lager, omdat er minder vervoersbewegingen zijn door het grotere volume per wagon, en omdat de gemiddelde kans op een incident per kilometer op het spoor lager is dan op de weg.

De *ernst van het effect* wordt het grootst ingeschat voor een gifwolk van ammoniak. In een willekeurig gebied is de blootstelling van aanwezige personen groter voor een gifwolk dan voor een plasbrand of explosie. Vloeibare waterstof ontsteekt gemakkelijker dan LSM, maar de vervoerde hoeveelheid vloeibare waterstof is kleiner, en LSM brandt heftiger dan de andere dragers. LOHC komt moeilijk tot ontsteking. Natriumboorhydride is stabiel tenzij het in aanraking komt met water. Dit is een aandachtspunt voor de brandweer. Ten opzichte van wegvervoer is het effect van een incident op het spoor kleiner omdat lekkende vloeistoffen in de spoorbaan worden opgenomen.

3. Calamiteit binnenvaart

Bij deze calamiteit ontstaat bijv. een plasbrand (bijv. LOHC) of toxische wolk (bijv. ammoniak), doordat de tank van de binnenvaarttanker openscheurt of lekt boven de waterlijn na bijvoorbeeld een aanvaring met een brug. Naast slachtoffers is er ook sprake van materiële schade en omgevingsemisies. Het risico is ingeschat voor het meest ernstige effect per waterstofdrager (grotendeels gelijk aan calamiteiten wegvervoer en spoorvervoer).

Er is uitgegaan van een *worst-case*-scenario. Dat wil zeggen lekkage boven de waterlijn van het schip waardoor een toxische wolk kan ontstaan of een plasbrand rond het schip mogelijk is. Alleen voor natriumboorhydride is uitgegaan van het *worst-case*-scenario van een lekkage onder de waterlijn.

De *kans van optreden* is bepaald door de waarschijnlijkheid dat een bepaald incident zal optreden (bijv. hoe waarschijnlijk is het dat een ongeluk met een binnenvaartschip plaatsvindt) en is ook gerelateerd aan het aantal vaarten (hoe meer vervoersbewegingen, des te hoger de kans). Het aantal vaarten is groter voor vloeibare waterstof (kleine hoeveelheden per tankschip), LOHC (retourvaarten met *spent fuel*), en natriumboorhydride (eveneens retourvaarten met *spent fuel*). Daarnaast hangt de kans van optreden samen met stoffeigenschaften en het soort incident: bij een scheur of lek in een tankschip met ammoniak (vloeibaar onder druk) ontstaat veelal direct een gifwolk. Bij andere stoffen ontstaat niet direct een plasbrand omdat er naast het vormen van de plas ook nog

sprake moet zijn van ontsteking. Ten opzichte van wegvervoer en ketelwagons is de kans op optreden van een incident met de binnenvaart lager omdat het aantal vaarten kleiner is en omdat de drukte op de rivieren veel minder is dan op bijvoorbeeld de weg.

Ten opzichte van weg- en railvoervoer is het effect van een incident op het water groter omdat de vervoerde volumes groter zijn (ook al bestaan de tanks uit compartimenten). De *ernst van het effect* wordt het grootst ingeschat voor een gifwolk van ammoniak.¹⁰⁰ In een willekeurig gebied is de blootstelling van aanwezige personen groter voor een gifwolk dan voor een plasbrand of explosie. Als ammoniak naar het water lekt lost het deels op en deels verspreidt het zich over het water, waarna door opwarming een dunnere en minder gevaarlijke gifwolk ontstaat dan in het geval van een buisleidingbreuk. Vloeibare waterstof ontsteekt gemakkelijker dan LSM, maar de vervoerde hoeveelheid vloeibare waterstof is kleiner, en de impact van een LNG-wolkbrand wordt hoger ingeschat dan de impact bij de andere dragers. Methanol lost ook deels op en deels verspreidt het zich over het water, waardoor het effect van een plasbrand wordt gedempt. LOHC vormt bij lekkage een brandbare laag bovenop het water, maar het komt moeilijk tot ontsteking. Natriumboorhydride is stabiel tenzij het in aanraking komt met water, wat het geval is bij een lekkage onder de waterlijn. Vrijkomend waterstof uit natriumboorhydride kan dan explosief zijn. De opgeloste ammoniak en methanol zijn giftig voor het mariene leven.

4. Calamiteit buisleidingen

Voor buisleidingen zijn twee calamiteiten mogelijk: de eerste is het falen van een compressor of pomp in een compressorstation. Het aantal compressorstations bepaalt het risico per keten. Bij het falen van de compressor kan er bijvoorbeeld een *jet fire* (bijv. waterstof) ontstaan met weinig emissies of een toxische wolk (bijv. ammoniak). Materiële schade bestaat uit vervanging van de installatie bij brand of is beperkt bij een gifwolk. De tweede calamiteit is een breuk van de hoofdbuisleiding. Per km buisleiding is er een risico op lekkage door breuk of graafschade. Bij het falen kan er ook hier bijvoorbeeld een *jet fire* (bijv. waterstof) ontstaan, met weinig emissies, of een toxische wolk (bijv. ammoniak). Materiële schade bestaat uit reparatie/vervanging van de buisleiding.

Besloten is om deze twee calamiteiten in de beoordeling samen te voegen. Het risico is ingeschat voor het meest ernstige effect per waterstofdrager.

Transport per buisleiding is de transportwijze met de kleinste *kans op optreden* van incidenten. De kans op optreden is voor alle waterstofdragers zeer klein; voor LOHC iets groter omdat er sprake is van heen- en retourleidingen. De kans op falen van een compressor of pomp is groter dan op een breuk van de hoofdbuisleiding, maar het effect van de breuk is groter.

De *ernst van het effect* breuk of falende compressor in de buisleiding wordt het grootst ingeschat voor een gifwolk van ammoniak. In een willekeurig gebied is de blootstelling van aanwezige personen groter voor een gifwolk dan voor een plasbrand of explosie. Het effect is veel groter dan voor een lekkend tankschip door de grotere volumes die vrijkomen, en doordat op land de wolk niet wordt 'verdund'. Het effect is groter naarmate de diameter van de buis groter is. Het effect kan worden beperkt door veiligheidsafsluiters in de leiding toe te passen zodat de uitstroom kan

¹⁰⁰ Het meerderheidsoordeel was in de expertsessie dat ammoniaklekkage in de binnenvaart een groter effect heeft dan LNG-lekkage. Daar werd tegenin gebracht dat je ammoniak op grote afstand kunt ruiken waardoor vluchten nog mogelijk is, terwijl bij een explosie na een onopgemerkte (niet zicht- of ruikbare) lekkage van LNG/LSM iedereen in de omgeving omkomt.

worden gestopt, zogenaamde compartimentering. Het verschil in effect tussen de twee varianten ammoniakleiding (grote/kleine diameter, met/zonder compartimenten) wordt aangegeven in de matrix. Een breuk in de aardgasleiding of waterstofleiding zal door de gemakkelijke ontsteking van deze gassen leiden tot een fakkelbrand (geen explosie). Tijd is een factor: als een fakkelbrand eenmaal bezig is neemt het effect niet meer toe, terwijl uitstroom uit een ammoniakleiding de toxische wolk steeds groter maakt. Bij een breuk in een methanol- of LOHC-leiding ontstaat niet direct een plasbrand, omdat beide stoffen minder snel tot ontsteking komen.

5. Calamiteit opslagtank

Bij instantaan falen van een opslagtank gaat de volledige opslagtank verloren en ontsnapt de opgeslagen stof naar de omgeving. Bij bijvoorbeeld ammoniak ontstaat een toxische wolk, bij LOHC kan een plasbrand ontstaan (zie Tabel 22). Aangenomen is dat materiële schade beperkt blijft tot vervanging van de tank. Het risico is ingeschat voor het meest ernstige effect per waterstofdrager.

De *kans van optreden* van een instantaan falen van een opslagtank voor waterstofdragers is (zeer) klein. Opslag is een statische situatie waarbij geen transport en handling nodig zijn en risico's lager uitvallen. De kans is groter naarmate er meer tanks nodig zijn voor het benodigde volume waterstofdrager. Dat geldt in het bijzonder voor LOHC en natriumboorhydride omdat hier ook opslag van *spent fuel* nodig is, en voor vloeibare waterstof omdat dit in kleinere en daarom meer tanks wordt opgeslagen. Methanol, LOHC en natriumboorhydride zitten in reguliere enkelwandige tanks, terwijl gassen gekoeld of onder druk worden opgeslagen in speciale dubbelwandige tanks. De kans op een incident is daardoor bij de eerste drie dragers groter dan bij de gasvormige dragers.

Bij instantaan falen kan de inhoud van de hele tank of tankinstallatie vrijkomen, een hoeveelheid die in dezelfde grootteorde kan liggen als bij een leidingbreuk. De *ernst van het effect* wordt het grootst ingeschat voor een gifwolk van ammoniak. Dit is een effect dat zich uitstrekt over een groot gebied met daarom een hogere blootstelling dan een brand of explosie van een opslagtank voor LSM of vloeibare waterstof, waarvan het effect zich meestal beperkt tot een doorgaans dunbevolkt industrieterrein. Het effect van falen van een LSM-tank is groter omdat er grotere volumes zijn opgeslagen. Opslag van gekoelde ammoniak is veiliger dan van ammoniak onder druk omdat ammoniak onder druk zich sneller verspreidt. Dan is er minder tijd om te vluchten dan in het geval van een plas gekoelde ammoniak die eerst nog moet verdampen.

6. Calamiteit conversie-installatie

Tijdens conversieprocessen kunnen hoge bedrijfstemperaturen en hoge vereiste of afgegeven hitte veiligheidsproblemen veroorzaken als gevolg van oververhitting. Uitgangspunt is dat installaties en apparatuur worden ontworpen en toegepast volgens de hoogste veiligheidsnormen en procedures en dat vereiste voorzorgsmaatregelen in acht worden genomen. Voor waterstofdragers die al langer in de industrie worden toegepast zijn deze normen, procedures en maatregelen verder ontwikkeld dan voor nieuwe dragers. Toch kunnen incidenten optreden: bij een calamiteit kan er een externe brand optreden met een beperkte impact naar de omgeving (beperkte emissies van waterstofdragers, daarnaast van roet, CO, CO₂ en eventueel giftige dampen, etc.). De materiële schade is aanzienlijk (vervanging van de installatie). Het aantal conversie-installaties bepaalt in deze studie het risico per keten, aangezien het volume beperkt onderscheidend is. Het risico is ingeschat voor het meest ernstige effect per waterstofdrager.

De *kans van optreden* in een conversie-installatie is groter dan voor opslagtanks omdat er veelal processen onder druk en hoge temperatuur plaatsvinden met bewegende onderdelen en diverse verbindingen tussen installatie-onderdelen waar zwakke plekken kunnen ontstaan. Bij vloeibare waterstof is alleen sprake van warmtewisseling, waardoor een kleinere kans van optreden bestaat. Bij LOHC is de kans iets groter ingeschat omdat er vanwege de benodigde volumes meer (uitgaand van zelfde formaat tanks) installaties nodig zullen zijn.

De *ernst van het effect* is voor elke waterstofdrager lager ingeschat dan voor opslagfaciliteiten omdat de in de installaties aanwezige hoeveelheden waterstofdrager kleiner zullen zijn dan in de opslagfaciliteiten. Het ernstigste effect is weer het optreden van een gifwolk van ammoniak bij falen van een ammoniakkraker. Dit is een effect dat zich uitstrekt over een groot gebied met daarom een hogere blootstelling dan een brand of explosie in een verdampers of *steam reformer*, waarvan het effect zich meestal beperkt tot een doorgaans dunbevolkt industrieterrein.

Cyberveiligheid en terrorisme

De tweede indicator voor het publieke belang Veilig is cyberveiligheid en terrorisme.

Leveringsketens van waterstofdragers kunnen doelwit worden van cyberaanvallen en terroristische aanslagen. In het kader van deze studie is een expertsessie gehouden om dit risico in te schatten. Hieraan namen deskundigen van veiligheidsregio's, infrastructuurbeheerders, industrie en rijksoverheid deel. Vanwege de gevoeligheid van het onderwerp is besloten om de resultaten van deze discussie niet te publiceren. We gaan er in deze bijlage alleen op hoofdlijnen op in.

Het risico wordt ingeschat door combineren van kans en effect. Met kans bedoelen we hier de kwetsbaarheid of gevoeligheid van de ketens voor een cyberaanval of terroristische aanslag. Het gaat hier om een inschatting van kwetsbaarheid zonder andere mitigerende maatregelen buiten hetgeen dat al is ingevoerd of wettelijk verplicht is. De kwetsbaarheid voor een cyberaanval of terroristische aanslag is door de experts ingeschat voor verschillende ketenonderdelen.

Kans wordt ook bepaald door het (periodieke/variabele) dreigingsbeeld: welke organisaties zijn erop uit om slachtoffers te maken, de maatschappij te ontwrichten of economische chantage te plegen. Dreiging ten aanzien van de energievoorziening, met name buisleidingen en industriële installaties, is er potentieel vanuit statelijke actoren, activistische kringen en criminele organisaties die chantage plegen. Dit is het terrein van de veiligheidsdiensten en nemen we niet mee in de beschouwing. Voor de scores betekent dit dat de kans over het geheel lager kan worden bij een afnemend dreigingsniveau of hoger bij een toenemend dreigingsniveau. De onderlinge ranking zal hierdoor waarschijnlijk niet verschuiven.

De ernst van het effect van een incident in waterstofleveringsketens is bepaald in de eerdergenoemde sessies met experts uit het veld van omgevingsveiligheid. Bij omgevingsveiligheid gaat het om de kans op een incident in reguliere operatie, bij cyberveiligheid en terrorisme gaat het om de kwetsbaarheid van ketenonderdelen voor een moedwillige verstoring/ontwrichting. Hoe gemakkelijk is het voor derden om een incident te veroorzaken? Uitgangspunt is dat in beide gevallen het effect hetzelfde is. Wel kan het effect variëren tussen fysieke gevolgen (doden, materiële schade) en economische gevolgen (bijv. platleggen van het energiesysteem).

Een cyberaanval kan leiden tot een ernstiger effect van een incident dan bij een regulier incident zoals beoordeeld voor het onderwerp omgevingsveiligheid. Het is denkbaar dat ICT-hacks leiden tot vertraagde detectie van een gevaarincident zoals een lekkage of opzettelijke uitstroom, of tot vertraagde *emergency response* als het handmatig afsluiten van een klep nodig is omdat de ICT niet

meer bruikbaar is. Dan neemt de ernst van het incident als gevolg van de cyberaanval toe. Dit ‘extra’ risico kan in principe optreden bij elke waterstofdrager en wordt daarom niet meegenomen. Dit risico is bovendien te ondervangen als de *emergency shutdown systems* autonoom werken en niet met het internet verbonden zijn.

Transportveiligheid

De derde indicator voor het publieke belang Veilig is transportveiligheid.

Het transport van waterstofdragers over de weg, het spoor en het water kan leiden tot een toename van het aantal verkeersongevallen.¹⁰¹ De maatschappelijke kosten van verkeersongevallen zijn door het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) en CE Delft uitgedrukt in gemiddelde bedragen per vervoerd volume in tonkm.¹⁰²

In de waardering van transportveiligheid zijn de volgende maatschappelijke kosten meegenomen:

- Medische kosten
- Afhandelingskosten
- Materiële kosten
- Kosten van productieverlies
- Immateriële kosten
- Filekosten

De kosten voor de deelindicator transportveiligheid worden berekend door deze waarderingskentallen te vermenigvuldigen met de transportvolumes in tonkm voor elke leveringsketen (zie bijlage A). Voor vloeibare waterstof wordt een correctie op deze getallen toegepast vanwege de lage energiedichtheid: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

Voor buisleidingen zijn er (logischerwijs) geen kosten van verkeersongevallen.

Tabel 23: Waarderingskentallen voor marginale kosten van verkeersongevallen (bron KiM 2023 en CE Delft 2022)

Modaliteit	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm*	Toelichting
Weg	€ 3,30	gemiddelde vrachtwagen, KiM
Spoor	€ 0,18	gemiddelde trein, KiM
Water	€ 0,41	gemiddeld binnenvaartschip, KiM
Buisleiding, H ₂ -net, aardgasnet	€ -	

*) Correctie LH₂: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

¹⁰¹ Op termijn zal het vervoer van waterstofdragers uiteindelijk ook het vervoer van andere brandstoffen vervangen. Hierdoor kan het transport van fossiele energiedragers afnemen. Dit effect hebben we niet in modellering meegenomen.

¹⁰² O. Jonkeren en J. Francke, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM, Kennisbasis Goederenvervoer, Notitie, Februari 2023. CE Delft, Toekomstverkenning, De prijs van een reis, Verkennende analyse richting 2050, mei 2022.

5. DUURZAAM

Voor het publieke belang Duurzaam worden drie deelindicatoren gebruikt: Broeikasgassen, Energieverlies en Materiaalgebruik. Emissies van NO_x worden bij het publiek belang Milieu behandeld.

Broeikasgassen

De eerste deelindicator voor het publieke belang Duurzaam is de uitstoot van broeikasgassen. In de leveringsketens van waterstofdragers komen bij verschillende ketenstappen (mogelijk) broeikasgassen vrij:

- Kooldioxide als gevolg van gemotoriseerd transport naar en binnen Nederland.
- Methaan door *boil-off* van LSM tijdens transport en opslag en door lekkage uit het aardgasnet.
- Waterstof door *boil-off* van vloeibare waterstof tijdens transport en opslag en door lekkage uit het waterstofnet.
- Lachgas bij het kraken van ammoniak.

Ook bij de *steam reforming* en synthese van LSM en methanol komt CO₂ vrij. In 2030 is de aanname dat voor synthese van LSM en methanol CO₂ van fossiele herkomst uit een industriële puntbron wordt gebruikt. Als deze CO₂ in het exportland wordt opgeslagen in methaan of methanol en in Nederland bij *steam reforming* weer vrijkomt is sprake van netto CO₂-uitstoot die we toerekenen aan de keten. Bovendien is bij synthese sprake van een deel CO₂ dat uit het proces weglekt. In 2050 gaan we uit van gebruik van CO₂ uit *direct air capture*: in dat geval wordt de bij *steam reforming* vrijkomende CO₂ (en ook de bij synthese weglekkende CO₂) niet toegerekend aan de keten.

Broeikasgasuitstoot tijdens transport als gevolg van brandstofgebruik

Voor de uitstoot van CO₂ tijdens transport in Nederland gebruiken we kentallen van KiM (gebaseerd op CE), uitgedrukt in kilogram CO₂ per tonkm, voor vrachtwagens, treinen en binnenvaartschepen.

- We nemen als representatieve getallen de gemiddelde waarden voor goederenvervoer over weg, water en spoor voor vier goederencorridors in Nederland: de corridor Noord (via Noord-Nederland richting Noord-Duitsland), Oost (richting midden en Zuid-Duitsland, Zuidoost (richting Zuid-Frankrijk via Luxemburg) en Zuid (richting Antwerpen en westen Frankrijk).
- We nemen aan dat in 2030 de waarde van emissies door vrachtwagens, binnenvaart en spoor nog maar 85% is van de waarde in 2018-2023 vanwege aangescherpte normen onder druk van EU-regelgeving en klimaatambities.¹⁰³ Voor 2050 is de aanname dat alle vervoer over de weg en de binnenwateren emissieloos verloopt.
- We nemen aan dat het aandeel elektrische treinkilometers 75% bedraagt en dieseltreinkilometers 25%. Deze cijfers zijn overgenomen van het Europese *Handbook* (CE Delft 2019) voor Nederland.

¹⁰³ De [Europese Commissie](#) heeft als doel dat nieuwe vrachtwagens in 2030 45% minder CO₂ uitstoten dan in 2019, oplopend tot 90% minder in 2040. Het Europees Parlement moet hier nog mee instemmen. We nemen aan dat ook voor binnenvaart en spoor vergelijkbare verbeteringen doorzetten.

- Omdat vloeibare waterstof een lagere energiedichtheid heeft dan de andere beschouwde waterstofdragers), wordt een factor van 5x zoveel transportbewegingen verondersteld.
- Voor buisleidingen nemen we aan dat compressie en verpompen elektrisch gebeurt.

Voor de broeikasgasuitstoot van transport over zee naar Nederland gebruiken we kentallen van de STREAM-studie van CE Delft.¹⁰⁴

- Voor zeetransport nemen we de waarden voor een *deep sea bulkcarrier* van 35.000-60.000 dwt (*deadweight ton*), zonder correctie voor 2030. Voor 2050 veronderstellen we dat de broeikasgasemissies voor de zeevaart *net-zero* zijn in lijn met de IMO-doelen.

Tabel 24: Broeikasgasemissie tijdens transport (KiM, STREAM). CO₂, CH₄, N₂O uitgedrukt in CO₂-equivalenten

Broeikasgasuitstoot transport KiM en STREAM			
Som van <i>tank-to-wheel</i> + <i>well-to-tank</i>	g CO ₂ eq / tonkm	Gecorrigeerde waarde 2030	Gecorrigeerde waarde 2050
Weg	12,6	11	0
Spoor	1,2	1	0
Binnenvaart	4,4	4	0
Zeevaart (import)	6,6	6,6	0
Buis	Afhankelijk van elektriciteitsgebruik		0

Broeikasgasuitstoot tijdens transport door *boil-off* en lekkage

Verliezen tijdens transport en opslag zijn al beschreven in bijlage A:

- Tijdens transport van vloeibare waterstof treedt emissie van waterstof op door *boil-off*. Tijdens zeetransport (0,2% per dag, oftewel 1% op het traject van Marokko naar Nederland) wordt dit benut voor de scheepsmotor. *Boil-off* tijdens transport met tankwagons of ketelwagon gaat verloren als emissie, maar *boil-off* kan in een binnenvaarttankschip gebruikt worden voor de motor (1% per dag). Deze verliezen per dag worden vermenigvuldigd met de duur van het transport (zie toelichting volume pag. 148). Aanname is dat *boil-off* tijdens centrale opslag weer vloeibaar wordt gemaakt maar bij decentrale opslag ontsnapt (0,2% per dag gedurende 3 dagen).
- Tijdens transport van LSM treedt methaanemissie op door *boil-off*. Net als bij vloeibare waterstof wordt dit tijdens zeetransport benut voor de scheepsmotor (0,2% per dag gedurende 5 dagen). Tijdens centrale opslag wordt *boil-off* weer vloeibaar gemaakt maar geventileerd bij decentrale opslag (0,1%). *Boil-off* tijdens transport met tankwagons en ketelwagon wordt uitgestoten (0,55%). *Boil-off* van binnenvaarttankschip wordt benut voor scheepsmotor
- De lekkage uit het aardgasnet en uit het landelijke waterstofnet bedraagt volgens Gasunie 0,01% voor een tracé van 200 km.

¹⁰⁴ CE Delft (2021), STREAM Goederenvervoer 2020. Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer – Versie 2.

Broeikasgasuitstoot bij conversies in Nederland en buitenland

Bij conversies van of naar waterstofdragers komen in verschillende gevallen broeikasgassen vrij volgens JRC2.

- In het geval van conversie van koolstofhoudende waterstofdragers naar waterstof vindt CO₂-uitstoot plaats bij *steam reforming* van methaan (8,89 kg CO₂ per kg waterstof) en methanol (9,7 kg CO₂ per kg waterstof). We veronderstellen dat deze CO₂ bij de synthese van methaan of methanol in 2030 uit een industriële puntbron wordt betrokken. De aanname is dat de CO₂-afvang 90% effectief is, en dat 10% in de lucht verdwijnt. Bij de synthese gaat een klein deel van de gebruikte CO₂ weer verloren (85 g CO₂ per kg methanol). In 2050 wordt de voor de synthese gebruikte CO₂ uit de lucht afgevangen (*direct air capture*), dan is de netto CO₂-balans van leveringsketens van methanol en LSM nul.
- Bij kraken van ammoniak komt volgens JRC2 een kleine hoeveelheid lachgas (N₂O) vrij (4,89 mg per kg waterstof), naast NO_x en ammoniak.
- Bij verdamping van LSM lekt 0,01% weg als gasvormig methaan, en bij *steam reforming* van LSM komt een geringe hoeveelheid methaan vrij (0,002%).
- Waterstof komt vrij bij de synthese van ammoniak (0,77 g waterstof per kg ammoniak), het verdampen van vloeibare waterstof (1,6%) en bij de dehydrogenering van DBT (3,1 g waterstof per kg waterstof) en MCH (waarde overgenomen van DBT).
- Bij synthese van methanol uit waterstof en CO₂ komt 0,2 g waterstof per kilogram methanol vrij. Ook bij *direct air capture* van CO₂ bij synthese in 2050 komt waterstof vrij bij de verbranding van waterstof voor proceswarmte (0,25 g waterstof per kg waterstof).

Tabel 25: Broeikasgasemissies bij opslag en conversie van waterstofdragers (JRC2)

Emissies opslag en conversie in g/kg H ₂ eq in Nederlandse deel van keten			
drager	ketenstap	soort emissie	g/kg H ₂ eq
DBT/MCH	dehydrogenering	H ₂	3,1
LH ₂	verdampen	H ₂	16
LH ₂	liquefactie	H ₂	20
LSM / CH ₄	<i>steam reforming</i>	CO ₂	8.890 (2050: 898)**
LSM / CH ₄	<i>steam reforming</i>	CH ₄	0,02
LSM	verdampen	CH ₄	0,1
MeOH	<i>steam reforming</i>	H ₂	2,5
MeOH	<i>steam reforming</i>	CO ₂	9.700 (2050: 970)**
MeOH	synthese	H ₂	1,6 (zonder DAC) 4,49 (met DAC)
MeOH	synthese	CO ₂	676
NH ₃	synthese	H ₂	4,3
NH ₃	kraken	N ₂ O	0,00489
Emissies opslag en conversie in g/kg H ₂ eq in producerende landen			
DBT/MCH	hydrogenering	H ₂	1
LSM	synthese	CO ₂	0
LSM	synthese	H ₂	1,99 (zonder DAC) 4,51 (met DAC)
MeOH	synthese	CO ₂	676 (2050: 0)**
MeOH	synthese	H ₂	1,6 (zonder DAC) 4,49 (met DAC)
NaBH ₄	n.v.t.	--	niet bekend*

*) NaBH₄-conversies worden niet in JRC2 behandeld, en ook in andere literatuur hebben we geen informatie aangetroffen over emissies in de diverse stappen van productie, conversie van de drager en recycling van de *spent fuel*.

***) Bij de synthese van methanol en LSM wordt CO₂ gebruikt (uit industriële bronnen of *direct air capture*), deze CO₂ komt bij conversie naar waterstof weer vrij. In 2030 rekenen we deze 'embedded' CO₂ wel en in 2050 niet mee bij het bepalen van de broeikasgasemissies van de ketens.

Gevoeligheidsanalyse CCS op Nederlandse conversie-installaties

In de basissituatie stoten de *steam reforming*-installaties voor methanol en methaan CO₂ uit in de lucht. In een gevoeligheidsanalyse hebben we het effect bepaald van CO₂-afvang en -opslag bij de Nederlandse installaties; we gaan ervan uit dat bij de synthese geen CCS wordt toegepast. Dit leidt tot gewijzigde aannames met betrekking tot CO₂-emissies in de betreffende ketens: we veronderstellen 90% effectiviteit van de afvang, al wordt deze effectiviteit in de praktijk (nog) niet gehaald.¹⁰⁵ 10% verdwijnt in de lucht.

¹⁰⁵ Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Carbon Capture and Storage, <https://ieefa.org/ccs>

Global Warming Potentials

We hanteren de GWP-waarden voor de vrijkomende broeikasgassen zoals vermeld in Tabel 26. Global Warming Potential is een relatieve maat, die het aardopwarmingsvermogen van een broeikasgas aangeeft vergeleken met dat van CO₂ over een bepaalde periode. De periode doet ertoe omdat sommige broeikasgassen langer actief blijven in de atmosfeer dan andere. In het beleid is het gangbaar om de periode van 100 jaar te nemen, maar ook andere periodes worden gekozen, zoals 20 jaar en 50 jaar. Het GWP is dan het opwarmingsvermogen over een periode van 100 jaar van 1 kilogram van het gas ten opzichte van 1 kilogram CO₂.

Tabel 26: Global Warming Potentials van broeikasgassen (bron IPCC¹⁰⁶)

Broeikasgas	Global Warming Potential (100 jaar)
CO ₂	1
CH ₄	27,9
H ₂	11,6*
N ₂ O	273

*) De GWP van H₂ ontbreekt in de IPCC-bron, deze waarde is ontleend aan Sand, M., et al. (2023).¹⁰⁷

Milieuprijs CO₂

Het GWP-cijfer vermenigvuldigen we met de milieuprijs voor uitstoot van CO₂ volgens het milieuprijzenhandboek van CE Delft (€ 130/ton CO₂).¹⁰⁸ Voor elke leveringsketen van waterstofdragers kunnen we zo de broeikasgasemissies per kilogram waterstofequivalent optellen en monetariseren en op basis daarvan de ketens een score geven op een schaal van 0 tot 1.

Energieverlies

De tweede deelindicator voor het publieke belang Duurzaam is Energieverlies.

In de leveringsketens van waterstofdragers is voor verschillende ketenstappen energie-input nodig:

- Voor productie van waterstof in het exportland
- Voor productie van de waterstofdrager ('*packing*')
- Voor opslag en transport naar Nederland
- Voor overslag/opslag in Nederlandse importhavens
- Voor eventuele conversie van de waterstofdrager naar waterstof
- Voor transport van waterstofdrager of waterstof binnen of door Nederland met een buisleiding, binnenvaartschip, trein of vrachtwagen
- Voor opslag bij de eindgebruiker
- Voor eventuele decentrale conversie, hetzij van waterstofdrager naar waterstof of van waterstof uit het waterstofnet naar waterstofdrager.

¹⁰⁶ Global Warming Potential Values: GWP100-waarden zijn ontleend aan IPCC, AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, 2021. Deze waarden zijn overgenomen door JRC.

¹⁰⁷ Sand, M., R.B. Skeie, M. Sandstad, S. Krishnan, G. Myhre, H. Bryant, R. Derwent, et al. (2023), 'A Multi-Model Assessment of the Global Warming Potential of Hydrogen', *Communications Earth and Environment*, Vol. 4, No. 1, 2023.

¹⁰⁸ CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.

- Tenslotte is er energieverlies bij het eindgebruik, dit vindt plaats ‘achter de poort’ en blijft buiten beschouwing.

Deze energie-input is te beschouwen als energieverlies. De keten die de minste energie-input nodig heeft om een kilogram waterstofequivalent bij de eindgebruiker af te leveren krijgt de hoogste score op dit aspect. De energie-input kan zowel extern worden toegevoerd (bijvoorbeeld elektriciteit voor pompen of brandstof voor schepen) of uit de waterstofdrager worden gehaald (zoals inzet van LSM of methanol voor proceswarmte bij *steam reforming*). Ook tellen we lekkage op bij het energieverlies.

Energieverlies import

De volgende tabel geeft de energieverliezen weer per ketenstap in het deel van de keten tot binnenkomst in Nederland. De energie-efficiëntie van de ketens wordt bepaald door alle energieverliezen van de ketenstappen op te tellen en te vergelijken met de energie-inhoud van het eindproduct: een kilogram waterstof(equivalent).

Tabel 27: Energieverliezen of energietoevoer per ketenstap tot binnenkomst in Nederland

Drager	H ₂ -productie MJ/kgH ₂	Conversie MJ/kgH ₂	Productie drager MJ/kgH ₂	Opslag voor export MJ/kgH ₂	Transport naar NL* MJ/kgH ₂
NH ₃	180				2,5
Electricity		16,3		1,38	
Verbruik H ₂ / drager		0			
Verliezen				0,14	0,0
LH ₂	180				4,2
Elektriciteit		21,6		2,4	
Verliezen		1,9		2,5	8,4
DBT (MCH)	180				4,1
Elektriciteit		1,33		0	
Verliezen					
MeOH	180				1,98
Elektriciteit		18,29	14,62	0	
Verbruik H ₂ / drager		69,8	0	0	
Verliezen					
LSM	180				2,6
Elektriciteit		0	12,7		
Verbruik H ₂ / drager		99,7	0		
Verliezen		0,06		0	
NaBH ₄	180	482,2	198,0		1,65
Recycling			423		

*) 3000 km transport naar Nederland

**) Energievraag bij volledig geëlektrificeerd proces.

Bij de synthese van LSM en methanol wordt in 2030 CO₂ uit een industriële puntbron gebruikt. Voor de CO₂-afvang is energie nodig voor warmte of stoom en elektriciteit voor compressie. De hoeveelheid benodigde energie hangt af van het volume van de gasstroom waaruit CO₂ wordt afgevangen, de concentratie van CO₂ in de gasstroom, het proces waarvan wordt afgevangen, de gekozen technologie en of het een nieuwe of bestaande fabriek betreft. Op grond van Bargiacchi et al. (2020), casus aardgasgestookte *combined cycle* centrale, nemen we een waarde aan van 18,6

MJ per kilogram waterstof bij methanolsynthese en 16,1 MJ per kilogram waterstof bij LSM-synthese.¹⁰⁹

Energieverlies binnen Nederland

De volgende tabellen geven de energie-input voor de verschillende ketenstappen binnen Nederland.

Tabel 28: Energieverlies (elektriciteit en materiaal als brandstof) voor centrale conversie in MJ/kg waterstof-equivalent

Energieverlies (elektriciteit) in MJ/kg H ₂ -equivalent	output				
	H ₂	NH ₃	LH ₂	MeOH	CH ₄
input					
H ₂		16,34	21,60	39,18	
NH ₃	17,50				
LH ₂	0,049/2,2*				
MCH	Marktgetal				
DBT	45,00				
MeOH	1,80				
LSM	0,22				0,22
CH ₄	0,00				
NaBH ₄	0,00				
Energieverlies (materiaal als brandstof) in MJ/kg H ₂ -equivalent	output				
input	H ₂	NH ₃	LH ₂	MeOH	CH ₄
H ₂		0,00	0,00	139,49	
NH ₃	34,74				
LH ₂	0,00				
MCH	0,00				
DBT	0,00				
MeOH	25,66				
LSM	38,89				0,00
CH ₄	38,89				
NaBH ₄	0,00				

*) Hoge waarde geldt voor decentraal, lage waarde voor centraal.

Er is ook sprake van energie-input bij opslag: dat betreft met name energie voor het roeren, overslag en het opnieuw vloeibaar maken van damp (*boil-off*). Bij decentrale opslag van vloeibare waterstof wordt de damp niet weer vloeibaar gemaakt omdat dit op de kleine schaal van de opslagtanks niet rendabel is. Voor dragers die niet vermeld zijn in Tabel 29 is er geen energieverlies gedurende opslag.

¹⁰⁹ Bargiacchi, Eleonora, Nils Thonemann, Jutta Geldermann, Marco Antonelli and Umberto Desideri (2020), Life Cycle Assessment of Synthetic Natural Gas Production from Different CO₂ Sources: A Cradle-to-Gate Study, *Energies*, September 2020, 13, 4579.

Tabel 29: Energieverlies (elektriciteit) voor centrale en decentrale opslag in MJ/kg waterstofequivalent (JRC)

	centraal		decentraal	
opslag NH ₃	1,38	MJ per H ₂ eq	1,38	MJ per H ₂ eq
opslag LSM	2,38	MJ per H ₂ eq	2,38	MJ per H ₂ eq
opslag LH ₂	2,38	MJ per H ₂ eq	0,00	MJ per H ₂ eq

Gevoeligheidsanalyse CCS op Nederlandse conversie-installaties

In de basissituatie stoten de *steam reforming*-installaties voor methanol en methaan CO₂ uit in de lucht. In een gevoeligheidsanalyse hebben we het effect bepaald van CO₂-afvang en -opslag bij de Nederlandse installaties; we gaan ervan uit dat in het exportland geen CCS wordt toegepast. Dit leidt tot gewijzigde aannames met betrekking tot energieverlies. Op grond van PBL (2020) nemen we de volgende waarden aan:¹¹⁰

- Elektriciteit voor compressie van CO₂ voor invoeding in een transportleiding: 5,4 MJ per kilogram waterstof bij methanol-*reforming* en 5,1 MJ per kilogram waterstof bij LSM-*reforming*.
- Warmte of stoom voor de CO₂-afvanginstallatie: 10,5 MJ per kilogram waterstof bij methanol-*reforming* en 9,7 MJ per kilogram waterstof bij LSM-*reforming*.
- JRC2 berekent voor het transport van CO₂ een verwaarloosbare hoeveelheid energie (minder dan 0,0002 MJ/kgH₂/km elektriciteit), en rekent de energievraag voor de ondergrondse opslag niet mee. Wij nemen daarom de energievraag voor CO₂-transport en opslag ook niet mee.

Energieverlies van binnenlands transport

Tabel 30 geeft het energiegebruik van binnenlands transport in 2030 en 2050.

Tabel 30: Energieverlies van binnenlands transport van waterstofdragers in 2050 in MJ/tonkm

Energiegebruik MJ/tonkm	Weg	Spoor	Binnenvaart
2030	0,90	0,12	0,40
2050	0,45	0,08	0,20

Materialgebruik

De derde deelindicator voor publiek belang Duurzaam is materiaalgebruik. Dit betreft het gebruik van materialen voor installaties, processen en als grondstof voor waterstofdragers. Als voor de leveringsketens van waterstofdragers veel en schaarse materialen nodig zijn beschouwen we dat als minder duurzaam. Ook heeft het gebruik van schaarse materialen economische en geopolitieke aspecten. Deze zijn hier niet meegenomen. Hoewel geen sprake hoeft te zijn van *verbruik* van materialen als er een gesloten cyclus wordt opgezet met hergebruik/recycling, draagt het *gebruik* toch bij aan schaarste van deze materialen. Om dit effect in te schatten hebben we de volgende methodiek gebruikt:

¹¹⁰ Waarden voor de SDE++-subcategorieën Nieuwe CO₂-afvang bij bestaande installaties, zoals bij methaan-*reforming*, en Nieuwe CO₂-afvang bij nieuwe installaties, zoals methanol-*reforming*, volgens PBL (2020), Conceptadvies SDE++ 2021. CO₂-afvang en -opslag (CCS), Planbureau voor de Leefomgeving, 5 mei.

- Per ketenstap bepalen we welke en hoeveel schaarse materialen nodig zijn per eenheid waterstofequivalent. We beschouwen een materiaal als schaars als het op de lijst van kritieke en strategische materialen staat die de Europese Commissie bijhoudt.¹¹¹ Dit betreft in het bijzonder de materialen nikkel, platina en koper, die worden gebruikt in katalysatoren voor conversie van waterstofdragers, en boor, dat bestanddeel is van de drager natriumboorhydride.
- De belangrijkste bron voor de materiaalintensiteit van de conversieprocessen is de LCA-studie JRC2 voor de leveringsketens voor de waterstofdragers ammoniak, vloeibare waterstof, DBT, methanol en LSM. Voor natriumboorhydride zijn eigen inschattingen gemaakt in teamanalyse op basis van openbare bronnen en marktinformatie. Voor MCH zijn geen gegevens beschikbaar, we hebben daarom DBT en MCH voor dit publieke belang als gelijk beschouwd.
- De materialenbehoefte per eenheid waterstofequivalent vermenigvuldigen we met de volumes per keten zoals volgt uit de berekeningen die in bijlage A zijn uiteengezet.
- De materialenbehoefte per keten vermenigvuldigen we met de marktprijs, omdat we veronderstellen dat deze prijs uitdrukking geeft aan de mate van schaarste van de materialen. Marktprijzen zijn uiteraard momentopnamen.
- De resulterende bedragen per keten plotten we op een schaal van 0 tot 1, waarbij 0 staat voor de hoogste impact van materiaalgebruik en 1 voor de laagste impact van materiaalgebruik in de ketens.

De waarden voor materiaalgebruik worden samengevat in Tabel 31.

¹¹¹ [Lijst van kritieke en strategische materialen van Europese Commissie.](#)

Tabel 31: Waarden voor materiaalgebruik volgens JRC2, aangevuld met teamanalyse voor natriumboorhydride. Kritieke materialen volgens de lijst van de Europese Commissie zijn dikgedrukt.

Conversie	Hoeveelheid*	Marktprijs**	Kosten per kgH ₂
<i>NH₃ kraken</i>			
Magnesiumoxide (94%) en nikkeloxide (6%)	1,46 g/kgH ₂ , waarvan 6massa% nikkeloxide met 78,6massa% nikkel (Ni)	€ 16,79/kgNi	€ 0,0012/kgH ₂
<i>DBT dehydrogenering</i>			
Platina (Pt)	0,16 mg/kgH ₂	€ 27.852/kgPt	€ 0,0045/kgH ₂
<i>MeOH synthese</i>			
64% koperoxide , 24% zinkoxide, en 12% aluminiumoxide	133 mg/kg MeOH, waarvan 64massa% koperoxide met 79,9massa% koper (Cu)	€ 7,78/kgCu	€ 0,0005/kg MeOH of € 0,004/kgH ₂
<i>MeOH steam reforming</i>			
Nikkel	0,20 g/kgH ₂	€ 16,79/kgNi	€ 0,0034/kgH ₂
IJzeroxide (29%), chroomoxide (3%), koperoxide (33%), en zinkoxide (35%)	1,1 g/kgH ₂ , waarvan 33massa% koperoxide met 79,9massa% Cu	€ 7,78/kgCu	€ 0,0022/kgH ₂
<i>LSM synthese</i>			
Nikkel aangebracht op dragermateriaal (Ni 15massa%)	15massa% * 0,41 g/kgLSM	€ 16,79/kgNi (plus dragermateriaal)	€ 0,001/kgLSM of € 0,004/kgH ₂
<i>LSM steam reforming</i>			
Nikkel	0,20 g/kgH ₂	€ 16,79/kgNi	€ 0,0034/kgH ₂
IJzer/chroom/koper/zink composiet katalysatoren, dezelfde als bij MeOH steam reforming	1,1 g/kgH ₂ , waarvan 33massa% koperoxide met 79,9massa% Cu	€ 7,78/kgCu	€ 0,0022/kgH ₂
<i>NaBH₄</i>			
Boor 28,56massa% in NaBH ₄	Verhouding B/H ₂ is 28,56massa%/10,66massa%, maar de opbrengst van H ₂ verdubbelt (uit reactie met H ₂ O), dus 1,33 kgB/kgH ₂	€ 34/kgNaBH ₄ , of € 119/kgB	€ 158/kgH ₂ , bij 6 cycli per jaar en 20 jaar is het € 1,32/kgH ₂ ¹¹²

*) Bronnen kolom hoeveelheid: JRC2, natriumboorhydride teaminschatting op basis van marktinformatie

**) Bronnen kolom marktprijs:

- Nikkel: www.lme.com (London Metal Exchange), <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel#Summary>
- Platina: <https://stonexbullion.com/en/charts/platinum-price/kilogram/1year/>
- Koper: <https://www.cablesrct.com/en/copper-prices>
- Al₂O₃: <https://www.fishersci.nl/shop/products/aluminum-oxide-puriss-honeywell-2/15651010>,

¹¹² We hebben ervoor gekozen om dit bedrag niet op te tellen bij de importkosten bij publiek belang Betaalbaar om beide publieke belangen gescheiden te houden en effecten niet dubbel te tellen.

- Zeoliet: <https://www.transparencymarketresearch.com/specialty-zeolites-market.html#:~:text=The%20prices%20of%20specialty%20zeolites%20range%20between%20US%24%2010%20per,zeolite%20product%20to%20be%20manufactured>
- NaBH₄: https://www.globalsources.com/product/sodium-intermediate-chemical-chemical_1196806149f.htm

Tabel 32 geeft de resultaten van deze exercitie. Als in een keten meerdere conversie- en syntheseschappen plaatsvinden worden de betreffende waarden opgeteld.

Tabel 32: Berekende waarden materiaalgebruik bij conversies van drager naar waterstof en vice versa

input	prijs materiaalgebruik per kton							
	H ₂	NH ₃	LH ₂	MeOH	LSM	DBT / MCH	NaBH ₄	
H ₂			€ -	€ -	€ 4.207	€ 4.108	€ -	€ 1.318.812
NH ₃	€ 1.156							
LH ₂	€ -							
MCH / DBT	€ 4.456							
MeOH	€ 5.613							
LSM / CH ₄	€ 5.613							
NaBH ₄	€ -							

6. ADAPTIEF

Met adaptief bedoelen we de mate waarin waterstofketens toekomstbestendig zijn. Door technologische en marktontwikkelingen kan er meer of minder vraag komen naar waterstofdragers en leveringsmodaliteiten. Om deze indicator te kwantificeren kijken we naar de additionele, niet-flexibel in te zetten investeringen die samenhangen met de ketens. Hoe lager deze investeringen, hoe adaptiever de keten is.

Een beschouwing van adaptiviteit kent vele onzekerheden, maar door het gebruik van een standaardmethode voor alle ketens veronderstellen we dat de scores ten opzichte van elkaar wel representatief zijn. In het algemeen en dus ook ten aanzien van deze analyse geldt dat er veel onduidelijkheden bestaan ten aanzien van de energietransitie en producten, tijdspannen et cetera die daarbij horen. Ook in de analyse zelf wordt uitgegaan van een aantal aannames. Het is dan ook van belang de uitkomsten niet te lezen als vaste en zekere gegevens maar als indicatief en een verwachting. Over buisleidingen voor ammoniaktransport bestaat bovendien nog grote onduidelijkheid/onzekerheid over diameters van leidingen (worden het enkele leidingen met kleinere diameter zoals 8" of 10" bij elkaar, of een leiding met grotere diameter, zoals 24" of 32").

Methodiek

De methodiek is als volgt:

- Voor elke keten tellen we de investeringen in ketenonderdelen op tot een totaalbedrag voor de investering. Dit doen we op basis van literatuur en eigen berekening van de benodigde volumes die door de ketens worden geleverd.
- Per ketenonderdeel schatten we samen met de experts in (1) het deel dat in 2030 niet hoeft te worden geïnvesteerd omdat er al voldoende capaciteit of voldoende installaties of transportmiddelen zijn, die te gebruiken zijn voor de importstromen; en (2) het deel van de waarde van de investering dat na 2030 kan worden hergebruikt of anderszins aangewend als de markt kiest voor andere waterstofdragers of modaliteiten.

Uitgangspunten berekening

In alle ketens is het eindgebruik 1578 kton waterstofequivalent. Dit is overgenomen van de MKBV-studie waterstofdragers en volgt het middenscenario uit de eerdere 'volumestudie'. Dit volume is voor deze beoordeling van adaptiviteit voor alle ketenstappen gelijk verondersteld. Dit is ter vereenvoudiging: voor elke keten verschillen de daadwerkelijke volumes per ketenstap doordat er afhankelijk van de route meer of minder waterstofequivalent verloren gaat door conversies of lekken. Voor vergelijkbaarheid van de ketens is de aanname dat het totale volume via elke afzonderlijke keten loopt. In werkelijkheid zullen er waarschijnlijk meerdere ketens tegelijk ontwikkeld worden. Omdat niet duidelijk is wat het maximale aandeel van elk van de ketens kan zijn, gaan we ervan uit dat het hele volume via één keten loopt. Deze keuze heeft effect als er al een deel van de benodigde investering aanwezig is en gebruikt zou kunnen worden. Alleen voor een deel van de opslag van ammoniak en het transport via het gasnet en het waterstofnet lijkt dit het geval.

Door het toepassen van gewichtspercentages waterstof in de dragers en rendementen in de keten bepalen we hoeveel drager per keten opgeslagen, geconverteerd en vervoerd moet worden. De behoefte aan aantallen installaties en vervoermiddelen berekenen we met aannames over capaciteiten en bijbehorende investeringskosten (uit literatuur) en tijdsduur van vervoer (zie bijlage B).

We houden geen rekening met verschillen in de levensduur. Investerings met een korte levensduur zijn gunstig uit oogpunt van adaptiviteit, en ongunstig voor de gemiddelde jaarlijkse kosten (annuïteit). Voor de LOHC's en natriumboorhydride is gerekend met het dubbele volume aan opslagbehoefte omdat ook de retourstroom tijdelijk opgeslagen moet worden. Bij buisleidingstransport van de LOHC's is zowel een heen- als retourbuis nodig.

A. Binnenlands transport

1. Totale investeringen

De totale investeringen nodig om het volume aan waterstofequivalenten te transporteren zijn bepaald door het eindgebruik van 1578 kton waterstofequivalent te delen door het jaarlijks te transporteren volume per transportmiddel (Tabel 33), en het aantal benodigde transportmiddelen te vermenigvuldigen met de geschatte investering per transportmiddel (Tabel 34).

Tabel 33: Maximaal te transporteren capaciteit per transportmiddel in kton waterstofdrager per jaar.

	Buis/H ₂ -net	Weg	Trein/ketelwagon	Schip
H ₂	1.971			
NH ₃	8.200	7,06	6,70	168,81
LH ₂		1,05	1,10	31,94
DBT	1.000	7,06	7,96	168,81
MCH	1.000	7,06	7,96	168,81
MeOH	6.893	7,06	7,69	168,81
LSM		4,87	5,48	91,25
NaBH ₄		7,06	6,69	168,81

De jaarlijks te transporteren volumes worden bepaald door het aantal dagen dat een vrachtwagen, ketelwagon of binnenvaartschip onderweg is (respectievelijk 1,5 dag, 3 en 4 dagen, zie bijlage volume) en de maximale capaciteit (zie Tabel 10, bijlage volume).

Tabel 34: Investerings voor transport per transportmiddel in mln. euro.

Input	Buis / H ₂ -net	Weg	Trein/ketelwagon	Schip
H ₂	260	Niet binnen scope	Niet binnen scope	Niet binnen scope
NH ₃	143,60	0,23	0,22	15,00
LH ₂	Niet mogelijk	0,81	0,42	41,00
DBT	454,40*	0,20	0,19	12,00
MCH	454,40*	0,20	0,19	12,00
MeOH	143,60	0,20	0,19	12,00
LSM	Niet mogelijk	0,23	0,22	15,00
NaBH ₄	Niet mogelijk	0,20	0,19	12,00

* De investering is de combinatie van een heen- en retourleiding.

Tabel 35 toont de investeringen die nodig zijn voor transport van 100% eindgebruik in 2030 in een enkele keten.

Tabel 35: Investerings voor transport van 100% eindgebruik in 2030 in een enkele keten

Ketenonderdeel	Tankwagens (weg)	Ketelwagon (spoor)	Tankschip (binnenvaart)	Buisleidingen incl. pompen/compressoren
H ₂	Buiten scope	Buiten scope	Buiten scope	€ 260 mln.
NH ₃	1259 wagens, totaal € 287 mln.	1325 wagons, totaal € 296 mln.	53 schepen, totaal € 789 mln.	€156 mln.
LH ₂	1508 wagens, totaal €1214 mln.	1441 wagons, totaal €605 mln.	49 schepen, totaal €2026 mln.*	Niet mogelijk
DBT	3630 wagens, totaal €708 mln.	3219 wagons, totaal €614 mln.	152 schepen, totaal €1821 mln.	€ 11.640 mln. **
MCH	3652 wagens, totaal € 712 mln.	3238 wagons, totaal € 618 mln.	153 schepen, totaal € 1832 mln.	€ 11.709 mln. **
MeOH	1778 wagens, totaal € 347 mln.	1631 wagons, totaal € 311 mln.	74 schepen, totaal € 892 mln.	€ 261 mln.
LSM	1291 wagens, totaal € 295 mln.	1147 wagons, totaal € 256 mln.	69 schepen, totaal € 1032 mln.	Niet mogelijk
NaBH ₄	1058 wagens, totaal € 206 mln.	1115 wagons, totaal € 213 mln.	44 schepen, totaal € 531 mln.	Niet mogelijk
CH ₄	Buiten scope	Buiten scope	Buiten scope	Reeds aanwezig

*) Een LH₂-tankschip is in 2030 relatief duur. Dit is een projectie van nog niet bestaand type schip.

**) Meerdere buizen zijn nodig vanwege volume en doorzetsnelheid, en tevens verdubbeling vanwege de retourstroom (*spent fuel*).

2. Deel van investering reeds aanwezig in 2030

Tabel 36 laat zien of de benodigde transportmiddelen al aanwezig zijn en of ze vrij te gebruiken zijn voor de import waterstofdragers. Bij veel van de transportmiddelen staat dat ze bezet zijn. Daarmee geven we aan dat hoewel er geschikte transportmiddelen zijn, deze niet kunnen worden ingezet omdat de capaciteit gebruikt wordt voor andere toepassingen.

Tabel 36: Deel van investeringen dat in 2030 al aanwezig is (bron experts)

Ketenonder-deel	Tankwagens (weg)	Ketelwagon (spoor)	Tankschip (binnenvaart)	Buisleidingen incl. pompen/compressoren
H ₂ gasvormig	Buiten scope	Buiten scope	Buiten scope	Investering H ₂ -net al ingeboekt, naar clusters
NH ₃	Enkele honderden, al bezet	Ketelwagens beschikbaar, al bezet	Enkele dedicated tankschepen, al bezet	Nog niet in plannen geëncmitteerd
LH ₂	Specifieke wagens additioneel nodig	Geschikte ketelwagens nog niet beschikbaar	Geen geschikte tankschepen	Niet mogelijk
DBT	Tankwagens beschikbaar, al bezet	Ketelwagens beschikbaar, al bezet	1500 geschikte tankschepen, al bezet	Geschikte buisleidingen beschikbaar, retour waarschijnlijk niet, mogelijk al bezet
MCH	Tankwagens beschikbaar, al bezet	Ketelwagens beschikbaar, al bezet	1500 geschikte tankschepen, al bezet	
MeOH	Tankwagens beschikbaar, al bezet	Ketelwagens beschikbaar, al bezet	1500 geschikte tankschepen, al bezet	Methanol compatible buizen beschikbaar, mogelijk al in gebruik
LSM	Heel specifieke wagens, al bezet	Enkele ketenwagens beschikbaar, al bezet	Enkele geschikte tankschepen, al bezet	Niet mogelijk
NaBH ₄	Voor droge lading beschikbaar, al bezet	Ketelwagens beschikbaar, al bezet	3000-4000 geschikte drogeladingschepen, veelal bezet	
CH ₄				In gebruik

Tabel 36 toont de huidige beschikbaarheid of in nabije toekomst van assets die gebruikt kunnen worden voor transport van waterstofdragers.

- Voor sommige dragers zijn er beperkt (ammoniak, LSM, methanol, vloeibare waterstof) transportmiddelen voor de weg, spoor of vaarwegen in de markt aanwezig. Voor andere dragers kan gebruik worden gemaakt van transportmiddelen die in gebruik zijn voor olieproducten (LOHC's). In alle gevallen zijn de assets echter in principe al bezet: er is geen sprake van vrij beschikbare overcapaciteit volgens de experts. Wel kan de markt zelf bepaalde keuzes maken: vooruit willen lopen, zelf infrastructuur vervangen, vervoer anders inzetten etc. Vervoerders investeren pas in transportmiddelen op basis van afgesloten vervoercontracten waardoor zij zeker zijn dat ze deze kunnen gebruiken.¹¹³ Er zijn nu weinig drogeladingvervoerders met ADR-certificaten die voor vervoer van waterstofdragers nodig zijn (UN-code).

¹¹³ Er is een verschil tussen publieke en private investeringen in buisleidingen: de Staat heeft besloten het waterstofnetwerk te bouwen en beheren als deel van de nationale infrastructuur, net als wegen, spoorlijnen, waterwegen, aardgasnet,

- Er zijn buisleidingen voor olieproducten die herbestemd zouden kunnen worden voor LOHC's of methanol, maar ook die zijn niet vrij beschikbaar. Voor het waterstofnet was de bijzondere omstandigheid dat er aardgasleidingen vrij waren die bedoeld waren voor de aardgasrotonde. Voor LOHC's zijn twee buisleidingen nodig: voor de waterstofrijke en waterstofarme drager. De huidige buisleidingen zijn *'single point'* buisleidingen: ze gaan maar één kant op. Omkeren van de vervoerrichting is mogelijk als een buisleiding vrij komt, maar het is al moeilijk om een enkele vrije buisleiding te vinden, en nog moeilijker om een heen- en-retourtraject te vinden. In theorie kunnen LOHC's en methanol worden getransporteerd met bestaande (niet-*dedicated*) buisleidingen als deze tot *'multi-product pipeline'* worden omgebouwd. Als dit niet in het ontwerp is voorzien zal dit niet eenvoudig zijn. De na elkaar te transporteren producten moeten ook compatibel zijn: er mag geen contaminatie optreden. In hoeverre dat een risico is hangt weer af van de specificaties van de klant.
- In 2030 is het niet de verwachting dat de vraag naar fossiele producten sterk terugloopt. Als dat wel zo is zijn er ook andere producten die de plaats in kunnen nemen, zoals bio-LNG in de LNG-tankwagens, vloeibare CO₂ in tankschepen of *sustainable aviation fuel* (SAF) in buisleidingen. Daarom is de conclusie dat voor de waterstofdragers een geheel nieuwe vloot vervoermiddelen resp. buisleiding moet worden opgebouwd: het deel van reeds gedane investeringen is dan nul. Alleen voor pilots en een eerste ingroei zou gebruik gemaakt kunnen worden van aanwezige transportmiddelen. Richting 2050 kan wel sprake zijn van assets die vrijkomen door een krimpende markt voor fossiele producten. We doen hiervoor de aanname dat in 2050 een deel van de assets die nu al aanwezig zijn maar nog worden gebruikt en die een langere levensduur hebben dan 25 jaar, kan worden benut voor waterstofdragers. Het deel van bestaande assets dat kan worden hergebruikt schatten we gelijk aan de lengte van de periode tot 2050 (ong. 25 jaar) en delen dat door de levensduur van de assets. Dit betekent dat voor tankwagens er geen hergebruik is (levensduur ong. 8-10 jaar) en voor schepen en buisleidingen wel (levensduur 50 jaar, of onbepaalde levensduur, afhankelijk van ontwerpcriteria).

waternet, en elektriciteitsnet. Pijpleidingen voor waterstofdragers worden net als de huidige bestaande pijpleidingen voor allerlei koolwaterstoffen gezien als private initiatieven ten behoeve van bedrijfsvoering.

3. Deel van investering dat herbruikbaar is voor andere dragers

Tabel 37: Deel van investering dat herbruikbaar is voor andere dragers (bron experts)

Ketenonder-deel	Tankwagens (weg)	Ketelwagon (spoor)	Tankschip (binnenvaart)	Buisleidingen incl. pompen/compressoren
H ₂ -gas	Buiten scope	Buiten scope	Buiten scope	100% herbruikbaar (groen gas)*
NH ₃	0% herbruikbaar	Nee; 75% ¹¹⁴	30% herbruikbaar	50% herbruikbaar
LH ₂	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	30% herbruikbaar	Niet mogelijk
DBT	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*
MCH	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*
MeOH	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*
LSM	0% herbruikbaar	10% herbruikbaar (ethyleen)	30% herbruikbaar na ombouw	Niet mogelijk
NaBH ₄	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	100% herbruikbaar*	Niet mogelijk
CH ₄ -gas	Buiten scope	Buiten scope	Buiten scope	100% herbruikbaar (groen gas)*

*) In de praktijk zal de waarde voor hergebruik iets lager uitvallen dan 100% omdat er altijd sprake zal zijn van schoonmaak en kleine aanpassingen zoals een nieuwe coating, nieuwe meetinstrumenten etc.

Tabel 37 toont het aandeel van de assets voor de waterstofdragers dat volgens *expert judgement* kan worden hergebruikt (voor een andere waterstofdrager of stof) als de waterstofdrager minder succesvol blijkt te worden. In principe is alles bezet, maar individuele partijen kunnen transportmiddelen anders inzetten.

- Transportmiddelen voor vloeibare waterstof, ammoniak en LNG/LSM zijn speciaal ontworpen en geclassificeerd voor deze stoffen. Dat wil zeggen dat er alleen stoffen binnen dezelfde klasse mee mogen worden vervoerd. Dat geldt voor ethyleen in LNG-vervoermiddelen. Ethyleen wordt echter bijna uitsluitend per buisleiding vervoerd; deels zou dit over het spoor of met de binnenvaart kunnen. Herkeuren en declassificeren van de transportmiddelen is mogelijk maar gebeurt in de praktijk niet. In de praktijk is veel vervoer *dedicated*, wat wil zeggen dat een tankcontainer alleen voor dezelfde stof wordt gebruikt en niet voor verschillende stoffen door het jaar heen, om de kosten en tijd voor het tussendoor schoonmaken te besparen. Daar komt bij dat vervoer van een andere stof in de tankwagen kan leiden tot overschrijding van de aslast, waardoor de tank niet volledig kan worden gevuld; dit laatste speelt niet bij railvervoer en scheepvaart.

¹¹⁴ Herbruikbaarheid van 75% voor deze specialty ketelwagens geldt alleen als er niet te veel zijn, dan wordt de markt overspoeld. Voor berekening van de score is uitgegaan van 0%.

- Schepen kunnen wel worden aangepast voor het vervoer van andere stoffen dan waarvoor ze zijn ontworpen. Het casco, motoren, stuurhut en dergelijke kunnen worden hergebruikt, de opslagtanks en leidingwerk moeten worden vervangen. Van de investering in schepen die gebouwd worden voor vervoer van gekoelde waterstofdragers is dan 30% herbruikbaar als drogeladingschip. Voor tankwagens en ketelwagens gaan we ervan uit dat een dergelijke aanpassing voor de eigenaren niet loont.
- Transportmiddelen voor LOHC en methanol kunnen ook worden ingezet voor andere vloeistoffen (100% van investering herbruikbaar). Het kan wel zijn dat er dan sprake is van te strikte veiligheidsvoorzieningen, zodat de investeringen bij schepen en tankwagens duurder uitvallen dan nodig zou zijn.¹¹⁵
- We nemen aan dat natriumboorhydride wordt getransporteerd in waterdicht verpakte *big bags* in standaard transportcontainers. Deze containers en bijbehorende transportmiddelen zijn volledig herbruikbaar voor andere toepassingen.
- Buisleidingen voor waterstof of synthetisch methaan kunnen voor groen gas worden hergebruikt. Een ammoniakbuisleiding kan voor vloeistoffen worden hergebruikt, er is dan sprake van overdreven veiligheidsvoorzieningen waardoor het transport duurder uitvalt dan nodig zou zijn. Daarom rekenen we met 50% van de investeringen herbruikbaar (50% kapitaalvernietiging).¹¹⁶

B. Opslag en conversie-installaties

1. Voorlopige totale investeringen

De totale investeringen voor de opslagfaciliteiten en conversie-installaties voor het eindgebruik van 1578 kton waterstofequivalent zijn bepaald door de benodigde opslag- en conversiecapaciteit per waterstofdrager te vermenigvuldigen met de investering per kton drager (Tabel 38).

Tabel 38: Investerings voor opslag en conversie in mln. euro per kton waterstofdrager

	Conversie		Opslag	
	centraal	decentraal	centraal	decentraal
Conversie (Dehydrogenering/kraken/verdampen)				
NH ₃	€ 0,69	€ 1,56	€ 0,650	€ 0,75
LH ₂	€ 0,43	€ 0,60	€ 16,6	€ 16,76
LOHC DBT	€ 14,66	€ 25,42	€ 0,264	€ 0,32
LOHC MCH	€ 14,58	€ 25,27	€ 0,264	€ 0,32
MeOH	€ 1,12	€ 2,12	€ 0,252	€ 0,46
LSM	€ 13,14	€ 13,14	€ 4,4	€ 4,4
NaBH ₄	€ 14,66	€ 25,42	€ 0,04	€ 0,04
CH ₄ -gas	€ 13,14	€ 13,14		
Synthese				
NH ₃	€ 1,49	€ 1,49		
LH ₂	€ 5,75	€ 5,75		
MeOH	€ 2,64	€ 2,64		

¹¹⁵ Aanname is dat van de investering in dergelijke tankschepen na ombouw 70% herbruikbaar is als drogeladingschip.

¹¹⁶ Ammoniak- en LH₂-opslagtanks kunnen in principe ook worden hergebruikt voor andere vloeistoffen zoals methanol en sommige LOHC's, ook dan is sprake van overdreven veiligheidsvoorzieningen die hogere opslagkosten opleveren dan bij gebruik van voor deze vloeistoffen ontworpen tanks.

Tabel 39 toont de investeringen die nodig zijn voor transport van 100% eindgebruik 2030 in een enkele keten.

Tabel 39: Investerings nodig voor transport van 100% eindgebruik 2030 in een enkele keten.

Ketenonder-deel	Opslag im-porthaven centraal	Conversie naar H ₂ centraal	Opslag de-centraal	Conversie naar H ₂ de-centraal	Conversie van H ₂ naar drager de-centraal
NH ₃	341 kton, totaal € 221 mln.	8.884 kton, totaal € 1.087 mln.	73 kton, totaal € 55 mln.	8.884 kton, totaal € 2.461 mln.	8.884 kton NH ₃ , totaal € 2.345 mln.
LH ₂	61 kton, totaal € 1.006 mln. *	1.578 kton, totaal € 679 mln.	13 kton, totaal € 217 mln. *	1.578 kton, totaal € 95 mln.	1.578 kton LH ₂ , totaal € 9.079 mln.
DBT	1966 kton, totaal € 518 mln.	25617 kton, totaal € 23.140 mln.	422 kton, totaal € 136 mln.	25.617 kton, totaal € 40.119 mln.	
MCH	1976 kton, totaal € 522 mln.	25.769 kton, totaal € 23.004 mln.	424 kton, totaal € 136 mln.	25.769 kton, totaal € 39.883 mln.	
MeOH	481 kton, totaal € 121 mln.	12.545 kton, totaal € 1.766 mln.	103 kton, totaal € 47 mln.	12.545 kton, totaal € 3.345 mln.	12.545 kton MeOH, totaal € 4.163 mln.
LSM	241 kton, totaal € 1060 mln.	6.280 kton, totaal € 20.729 mln.	52 kton, totaal € 227 mln.	6.280 kton, totaal € 20.729 mln.	
NaBH ₄	572 kton, totaal € 24 mln.	7.464 kton, totaal € 23140 mln. **	122 kton, totaal € 6 mln.	7.464 kton, totaal € 40.119 mln. **	
CH ₄ -gas				6.280 kton, totaal € 20.729 mln. ***	

*) LH₂-opslag is in verhouding duur; het gaat om een veelvoud van relatief kleine tanks vanwege de TRL.

**) Conversiekosten naar H₂ per kg H₂-equivalent gelijkgesteld aan LOHC, bij gebrek aan informatie.

***) Betreft keten met centrale verdamping van LSM.

2. Deel van investering reeds aanwezig in 2030

Tabel 40: Deel van investeringen voor opslag en conversie dat in 2030 reeds aanwezig is.

Ketenonderdeel	Opslag in porthaven centraal	Conversie naar H ₂ centraal	Opslag de-centraal	Conversie naar H ₂ de-centraal	Conversie van H ₂ naar drager de-centraal
NH ₃	6 x 15 kton (OCI, YARA, Dow); 60 kton OCI, al FID	Niet beschikbaar	OCI	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar
LH ₂	Air Products Botlek (productieterminal)	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar
DBT	Kan in diesel-tanks; voldoende aanwezig (30-40 kton), maar niet per definitie vrij.	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar	
MCH		Niet beschikbaar		Niet beschikbaar	
MeOH	Specialty tanks, Rotterdam, Zeeland, Dordrecht, niet per definitie beschikbaar	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar	Niet beschikbaar
LSM	GATE en Eemshaven (drijvend), Zeeland in planning (check), al bezet, mogelijk <i>peakshaving</i> tank Gasunie	<i>Steam methane reforming</i> , capaciteit nu in gebruik raffinaderijen	Niet beschikbaar	Decentrale <i>steam methane reforming</i> ; lage capaciteit	
NaBH ₄	Bestaande poedersilo's	Niet beschikbaar	Nog niet in gebruik	Niet beschikbaar	
CH ₄ -gas				Decentrale <i>steam methane reforming</i> lage capaciteit	

Tabel 40 toont de huidige of nabije beschikbaarheid van assets die gebruikt kunnen worden voor opslag en conversie van waterstofdragers.

- Voor ammoniak, methanol en LSM is bestaande opslagcapaciteit in meerdere havens. Ammoniakopslag en overslag is nog nergens grootschalig beschikbaar behalve op bestaande productie- en verbruikslocaties. Voor grootschalig gebruik, naast als *feedstock* ook als waterstofdrager, is aanzienlijke uitbreiding vereist als ook een fijnmaziger distributienetwerk (met hubs langs de hoofdtransportassen). Voor LSM gelden soortgelijke situaties indien dit als grootschalige energiedrager toegepast gaat worden (anders dan regasificatie).

- Voor vloeibare waterstof kan de opslagcapaciteit bij de productielocatie van Air Products in principe ook voor import gebruikt worden. LOHC's kunnen in bestaande tanks voor olieproducten opgeslagen worden, en natriumboorhydride in bestaande poedersilo's. Er zijn veel plannen voor uitbreiding van importterminals met opslag.
- Decentraal zijn er nog weinig opslagfaciliteiten voor waterstofdragers beschikbaar, anders dan voor olieproducten, en ammoniakopslag op Chemelot.
- Conversie-installaties om waterstof vrij te maken uit waterstofdragers zijn er nog niet, met uitzondering van *steam methane reformers* bij olieraffinaderijen en kunstmestfabrieken. Deze *steam methane reforming* kunnen worden gebruikt voor conversie van LSM. Evenmin zijn er al conversie-installaties om met waterstof waterstofdragers te synthetiseren, wel zijn er plannen voor methanolproductie met in Nederland geproduceerde waterstof.
- In 2030 is het niet de verwachting dat de vraag naar fossiele producten sterk terugloopt. Als dat wel zo is zijn er ook andere producten die de plaats hiervan in kunnen nemen in de olie- en LNG-tanks, zoals *sustainable aviation fuel* (SAF) in dieseltanks¹¹⁷ of bio-LNG in de LNG-opslag.
- Daarom is de conclusie, net als bij de transportmiddelen, dat voor de waterstofdragers een geheel nieuw tankpark en *installed base* conversie-installaties moet worden opgebouwd. De eerste investeringen worden hiervoor wel op korte termijn gedaan. Zo heeft de firma OCI een vergunning gekregen voor de bouw van een 60 kton opslagtank voor gekoelde ammoniak in Rotterdam. Deze is volgens de planning gereed in 2030 en tellen we dus mee als reeds gedane investering. Voor overige waterstofdragers veronderstellen we vooralsnog dat het deel van reeds gedane investeringen nul is.
- Richting 2050 kan wel sprake zijn van assets die vrijkomen door een krimpende markt voor fossiele producten. We doen hiervoor de aanname dat op basis van de resterende levensduur een deel van de bestaande assets kan worden hergebruikt.

¹¹⁷ Alleen voor JetFuel (JET A-1); voor AVGAS (aviation gasoline) zijn voor zover bekend nog geen alternatieven beschikbaar, dit gaat ook om een kleine hoeveelheid.

3. Deel van investering dat herbruikbaar is voor andere dragers

Tabel 41: Deel van investeringen voor opslag en conversie herbruikbaar voor andere dragers (bron experts).

Ketenonderdeel	Opslag in porthaven centraal	Conversie naar H ₂ centraal	Opslag de-centraal	Conversie naar H ₂ de-centraal	Conversie van H ₂ naar drager de-centraal
NH ₃	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar
LH ₂	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar
DBT	100% herbruikbaar*	0% herbruikbaar	100% herbruikbaar*	0% herbruikbaar	
MCH	100% herbruikbaar*	0% herbruikbaar	100% herbruikbaar*	0% herbruikbaar	
Methanol	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar
LSM	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	0% herbruikbaar	
NaBH ₄	100% herbruikbaar*	0% herbruikbaar	100% herbruikbaar*	0% herbruikbaar	
CH ₄ -gas				Na transport via buis	

*) In de praktijk zal de waarde voor hergebruik iets lager uitvallen dan 100% omdat er altijd sprake zal zijn van schoonmaak en kleine aanpassingen zoals een nieuwe coating, nieuwe meetinstrumenten etc.

Tabel 41 toont het aandeel van de assets voor de waterstofdragers dat kan worden hergebruikt (voor een andere waterstofdrager of stof) als de waterstofdrager minder succesvol blijkt te worden.

- Opslagtanks voor vloeibare waterstof, ammoniak en LSM zijn speciaal ontworpen en geclassificeerd voor deze stoffen (0% van investering herbruikbaar). De materiaalkeuze en veiligheidsvoorzieningen zijn afgestemd op de eigenschappen van de stof waarvoor de opslag is bedoeld.
- Opslagtanks voor LOHC en methanol kunnen ook worden ingezet voor andere vloeistoffen (100% van investering herbruikbaar). Het kan wel zijn dat er dan sprake is van een zwaarder veiligheidsregime, zodat de opslag duurder uitvalt dan nodig zou zijn.
- Een opslagsilo die voor natriumboorhydride is gebruikt kan ook voor andere droge lading worden gebruikt. Als natriumboorhydride verpakt wordt aangeleverd zal de opslag moeten voldoen aan PGS15 voor opslag van verpakte gevaarlijke stoffen. Dit maakt de opslag duurder dan voor reguliere droge lading.
- Installaties voor conversie van waterstofdragers naar waterstof zijn speciaal ontworpen en gebouwd voor deze stoffen (0% van investering herbruikbaar). De materiaalkeuze, procesonderdelen en veiligheidsvoorzieningen zijn afgestemd op de eigenschappen van de stof waarvoor de installatie is bedoeld (drukken, temperaturen, corrosiviteit, etc.). Mogelijk kunnen (de)-hydrogenering-installaties voor de ene LOHC met beperkte aanpassingen ingezet worden voor andere LOHC's maar hier is geen ervaring mee.

7. RECHTVAARDIG

Het publieke belang Rechtvaardig is uitgewerkt in twee deelindicatoren: rechtvaardigheid in productielanden en rechtvaardigheid in Nederland.

Productielanden

Als deelindicator voor rechtvaardigheid met betrekking tot de producerende landen gebruiken we de totale waarde van de externe effecten in die landen (voorafgaand aan import in Nederland) per keten, en delen die door de kosten van de import in Nederland voor die keten. Hoe hoger de score, hoe meer sprake is van afwenteling van externe kosten op de producerende landen en dus hoe minder rechtvaardig. Externe effecten die we hier meenemen zijn milieukosten en broeikasgasuitstoot in het buitenland.

De kosten van import zijn bepaald bij het publieke belang Betaalbaar. De externe kosten in het buitenland volgen deels uit de JRC2-LCA-studie¹¹⁸ in combinatie met milieukostenfactoren van CE Delft.¹¹⁹ De JRC2-studie geeft voor de ketenstappen van synthese van de waterstofdragers in het exportland tot en met aflevering van waterstof na conversie in het importland de benodigde inputs en de outputs van materialen en energie. Alleen natriumboorhydride komt in deze studie niet aan bod, hiervoor hebben we informatie verzameld uit wetenschappelijke artikelen en bij marktpartijen.

Keteneffecten Nederland

De tweede deelindicator voor het publieke belang Rechtvaardig heeft betrekking op keteneffecten in Nederland. Inwoners van Nederland ervaren effecten van het transport en de conversie van waterstofdragers, zoals verkeersemisies en -geluid en risico's op ongevallen en op incidenten met waterstofdragers. Hoe meer deze externe effecten worden meegenomen in de kosten van waterstofdragers voor de eindgebruiker, hoe rechtvaardiger uit het oogpunt van 'de vervuiler betaalt'.

Als indicator voor rechtvaardigheid met betrekking tot de keteneffecten in Nederland gebruiken we de totale waarde van de externe effecten in Nederland per keten en delen die door de kosten van de ketenstappen in Nederland.

- De teller is een inschatting van het verschil tussen de *true price* van de activiteiten in Nederland en de betaalde kosten. Dit verschil is gelijk aan de externe kosten van de ketenstappen in Nederland. De externe kosten die we berekenen, bestaan uit de gemonetariseerde uitstoot van broeikasgassen, de gemonetariseerde milieueffecten en de kosten van transportveiligheid in Nederland. Deze zijn bij andere publieke belangen bepaald.
- De noemer van de vergelijking wordt gevormd door alle kosten bepaald bij Betaalbaar vanaf het moment van import, nl. kosten van op- en overslag in de importhaven, conversiekosten, kosten voor binnenlands transport en een tweede opslag bij de eindgebruiker na transport over weg, water en spoor.

¹¹⁸ JRC2: European Commission, Joint Research Centre, Arrigoni, A. et al (2024), *Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg

¹¹⁹ CE Delft (2023), *Handboek Milieuprijzen 2023*, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.

De externe kosten van cybersecurity en omgevingsveiligheid zijn niet gemonetariseerd en kunnen daarom niet meegenomen worden in deze indicator. Dit leidt tot een gunstigere score voor alternatieven met een hoog risico voor omgevings- en cyberveiligheid en terrorisme.

8. TOEGANKELIJK

Het publieke belang Toegankelijk is uitgewerkt in twee deelindicatoren: Toegankelijk kostenniveau en fysieke Nabijheid van de ketens.

Kostenniveau achterland en haven

De eerste deelindicator gaat over het verschil in de kosten. Er is sprake van een toegankelijk kostenniveau als bedrijven in heel het land kunnen participeren in de waterstofeconomie. De mate waarin dit het geval is hangt onder meer af van het kostenniveau van de waterstofdragers waar zij toegang toe kunnen krijgen. We vergelijken de kosten van de waterstofdragers voor verschillende eindgebruikers in één van de importhavens met de kosten in het achterland (aan het uiteinde van het 200 km lange representatieve tracé).

In de importhavens zijn de kosten per waterstofequivalent het laagst omdat binnenlandse transportkosten en extra opslag bij de eindgebruiker vervallen. Hoe hoger de kosten in het achterland zijn ten opzichte van de importhaven, des te minder sprake is van een toegankelijk kostenniveau. Als gevolg kunnen bedrijven gevestigd in het achterland moeilijker concurreren met een partij in één van de importhavens.

De indicator voor dit publiek belang is de verhouding tussen de kosten in het achterland in Nederland (of Duitsland) ten opzichte van de importhavens. De variabelen voor deze vergelijking volgen uit de cijfers van publiek belang Betaalbaar.

- De teller van de vergelijking wordt gevormd door alle kosten bepaald bij Betaalbaar, nl. kosten van de import, op- en overslag in de importhaven, eventuele conversiekosten, kosten voor binnenlands transport en een tweede opslag bij de eindgebruiker na transport over weg, water en spoor.
- De noemer omvat alleen de kosten van de import, op- en overslag in de importhaven en de eventuele conversiekosten ter plaatse.

In de Delphi-sessie is het argument ingebracht dat een kostenvoordeel voor bedrijven in de importhavens juist gunstig is voor de concurrentiepositie ten opzichte van buitenlandse bedrijven. Daar staat tegenover dat ontwikkeling van de buitenlandse markt belangrijk is om de investeringen in faciliteiten voor import, opslag, conversie en doorvoer te rechtvaardigen. Als buitenlandse bedrijven een groot kostennadeel ervaren, zullen zij minder geneigd zijn om van de importroute via Nederland gebruik te maken.

Nabijheid

Om te kunnen participeren in de waterstofeconomie is naast het kostenniveau ook de fysieke toegankelijkheid tot waterstofdragers van belang. Bedrijven moeten de waterstofdragers op hun terrein kunnen krijgen.

Voor de toegankelijkheid van de verschillende alternatieven in het achterland gebruiken we een methodiek die is geïnspireerd door de factor nabijheid in andere domeinen (zie [nabijheidsstatistieken](#) CBS). We concretiseren deze deelindicator als het aantal bedrijventerreinen in Nederland dat ontsloten is met een weg, een spoorstation, binnenhaven of buisaansluiting.

- Alle bedrijventerreinen zijn aangesloten op het wegnnet en het aardgasnet.
- Het aandeel van de bedrijventerreinen dat toegang heeft tot het spoor en levering via de binnenvaart hebben we bepaald met hulp van de IBIS-database. Daarin is voor elk bedrijventerrein in Nederland (3791) aangegeven of dit is aangesloten op spoor of water.
- Of bedrijventerreinen in 2030 voldoende dichtbij de Delta-Rijn-corridor of het landelijke waterstofnet liggen om een aansluiting te krijgen is niet vermeld en ook onbekend omdat de exacte tracés nog niet vastliggen. Wel is sprake van een indicatief tracé. Als benadering veronderstellen we dat bedrijventerreinen een aansluiting kunnen krijgen wanneer ze in een gemeente liggen waar de Delta-Rijn-corridor volgens plan doorheen loopt. Bedrijventerreinen in andere gemeenten zullen geen aansluiting krijgen. Een lijst met gemeenten voor de Delta-Rijn-corridor is beschikbaar gesteld door de Projectdirectie *Delta-Rhine-Corridor*. Het gaat om 382 bedrijventerreinen.
- Voor het beoogde landelijke waterstofnet is geen lijst met gemeenten beschikbaar. Op basis van landkaarten met de huidige gasinfrastructuur en de vereenvoudigde visualisaties van het waterstofnet hebben we een lijst met gemeenten samengesteld waar het waterstofnet waarschijnlijk doorheen loopt. Het totaal aantal bedrijventerreinen in deze gemeenten is 1391.

Tabel 42: Nabijheid voor potentiële gebruikers

	Aantal bedrijventerreinen met (mogelijke) aansluiting	Percentage van 3.791 bedrijventerreinen dat toegang heeft	Toelichting
Weg	3791	100%	
Spoor	519 van 3.709 waarvan gegevens bekend	14%	alle bedrijventerreinen aan spoor gelegen (cat. B, C, D, E)
Water	685 van 3.713 waarvan gegevens bekend	18%	alle bedrijventerreinen gelegen aan vaarwater (categorie A, B, C, D)
Buisleiding specifiek (Delta-Rijn-Corridor)	382	10%	opgave van gemeenten die worden gepasseerd
H ₂ -net	1.391	37%	schatting gemeenten die worden gepasseerd
Aardgasnet	3.791	100%	

9. RUIMTE

Het publiek belang Ruimte wordt uitgewerkt door voor de verschillende leveringsketens het ruimtebeslag van de ketenstappen te bepalen, dit te vermenigvuldigen met de volumes waterstofequivalent die door middel van de ketens worden bezorgd bij de eindgebruikers, en te vermenigvuldigen met de grondprijzen. Het gaat dan om:

- Ruimte voor op- en overslag van waterstofdragers in de importhavens en bij eindgebruikers,
- Ruimte voor conversie-installaties, zowel centraal als decentraal,
- Ruimte voor buisleidingen.
- Andere transportmodaliteiten maken gebruik van publieke infrastructuur die ook ruimte inneemt. De gemonetariseerde maatschappelijke kosten van deze vorm van ruimtebeslag worden meegenomen in de uitwerking van publiek belang Economisch krachtig.

Het publieke belang betreft hier fysieke ruimte. In het Delphi-proces is aan de orde gebracht dat de beschikbare milieu- en veiligheidsruimte mogelijk schaarser is dan de beschikbare fysieke ruimte, en dat op plaatsen waar wel fysieke ruimte is een ontwikkeling misschien toch geen doorgang kan vinden bij gebrek aan voldoende milieu- en veiligheidsruimte. We hebben dit aspect niet uitgewerkt.

Opslaginstallaties

De MKBV geeft voor ammoniak en LOHC het ruimtebeslag van opslagterminals in m² per kton waterstofdrager. Dit is bepaald door van de terminals de oppervlakte te meten op luchtfoto's. Aanvullende informatie is verkregen van experts van opslagbedrijven. Een opslagbedrijf schat het ruimtebeslag voor een nieuwe ammoniakterminal op de helft van de opgave van de MKBV. Het verschil is met name dat nieuwe tanks hoger gebouwd mogen en kunnen worden dan vroeger. Omdat voor waterstofdragers vooral nieuwe tanks gebouwd zullen moeten worden (zie publiek belang Adaptiviteit) gaan we uit van de kentallen voor nieuwe tanks. Het ruimtebeslag van LOHC-opslag hebben we daarom gehalveerd ten opzichte van het MKBV-getal.

Witte vlekken hebben we ingevuld door de opslagterminals van ammoniak of LOHC te schalen op grond van het verschil in soortelijk gewicht. Voor vloeibare waterstof en natriumboorhydride is het ruimtegebruik van bestaande ammoniak tanks als uitgangspunt genomen, omdat voor deze waterstofdragers een veelvoud van kleinere opslagtanks respectievelijk silo's zal worden gekozen, waardoor het ruimtebeslag groter is dan voor waterstofdragers met grotere tanks.

Vervolgens is per keten het benodigde ruimtebeslag voor opslag (in m²) bepaald voor een volume van 14 dagen aanvoer/doorvoer bij import en 3 dagen bij de eindgebruiker. De ruimtelijke investering die hiervoor nodig is, hebben we bepaald door de vierkante meters te vermenigvuldigen met de industriële grondprijs (304 euro/m²). Deze industriële grondprijs is gebaseerd op de MKBV en gecorrigeerd voor prijspeil en bouwrijp maken.

Voor de LOHC's en natriumboorhydride is ook sprake van een retourstroom. Voor deze retourstroom zijn ook opslagvoorzieningen nodig. Het ruimtebeslag voor de opslag van deze waterstofdragers is daarom twee keer zo hoog.

Voor de dragers die per buis bij de eindklant komen is geen opslag bij de eindgebruiker verondersteld. Voor gasvormig waterstof en aardgas is geen extra opslag verondersteld buiten de ondergrondse opslag die voor waterstof gepland is en voor aardgas al bestaat in zoutcavernes en gasvelden.

Tabel 43: Ruimtegebruik opslag van waterstofdragers in m² per kton drager

Drager	Dichtheid (ton/m ³)	Ruimte opslag (m ² per kton drager)	Bron	Ruimte opslag (m ² per kton H ₂ eq)
NH ₃	0,735	134	MKBV: bestaande tanks Markt informatie: nieuwe tanks	752
LH ₂	0,071	2.764	Geschaald vanuit bestaande NH ₃ -tanks	2.764
MCH	0,769	197	Geschaald vanuit nieuwe DBT tanks	3.224
DBT	1,040	146	MKBV: bestaande tanks 292; correctie nieuwe tanks volgens markt informatie	2.370
MeOH	0,792	124	Nieuwe tanks: geschaald vanuit NH ₃	985
LSM	0,420	234	Geschaald vanuit nieuwe NH ₃ -tanks	930
NaBH ₄	1,074	183	Geschaald vanuit bestaande NH ₃ -tanks	864*

* Bij dehydrogenering van natriumboorhydride komt de helft van de H₂ uit H₂O. Hierdoor kan opslagvolume gehalveerd worden.

Conversie-installaties

De MKBV geeft voor ammoniak en LOHC het ruimtebeslag van conversie-installaties in m² per kton waterstof. Dit is gebaseerd op de haalbaarheidsstudie naar een ammoniakkraker in Rotterdam. Deze studie is niet openbaar.¹²⁰ Voor LOHC-dehydrogenering vermeldt de MKBV dat eenzelfde voetafdruk per geproduceerde eenheid waterstof is aangenomen als voor een ammoniakkraker omdat er geen betrouwbare informatie is gevonden over het benodigde landoppervlak. Andere gegevens over de benodigde oppervlakten voor conversie-installaties zijn niet gevonden. Een uitvraag onder experts heeft ook geen aanvullende informatie opgeleverd. Om deze reden nemen wij voor alle conversie-installaties hetzelfde ruimtebeslag aan, namelijk 79 m² per kton waterstofequivalent. Dit geldt voor conversies van waterstofdragers naar waterstof en vice versa (synthese vanuit het waterstofnet). Voor het verdampen van vloeibare waterstof en synthetisch methaan veronderstellen we dat de helft van dit oppervlak volstaat.

Vervolgens is per keten het benodigde ruimtebeslag voor de relevante conversies (in m²) bepaald door te vermenigvuldigen met het jaarlijkse volume waterstofequivalent. We bepalen de ruimtelijke investering die hiervoor nodig is door de vierkante meters te vermenigvuldigen met de industriële grondprijs.

Ter controle van de grootteordes vergelijken we opslag en kraken van ammoniak. Opslag in de importhavens betreft 14/365 van het jaarvolume drager dat door een keten wordt afgeleverd, conversie betreft het hele jaarvolume. Het ruimtebeslag voor opslag is dan 14/365 * 752 = 28,8 eenheden, en voor kraken 1 x 79 eenheden, oftewel minder dan driemaal zoveel. Dat lijkt redelijk.

¹²⁰ Het wel openbare *Executive summary pre-feasibility study large-scale industrial ammonia cracking plant* vermeldt een hoger ruimtebeslag van 200-450 m² per kton waterstofcapaciteit, maar hierin is ook oppervlak voor opslag opgenomen.

Buisleidingen

In deze studie rekenen we met een representatief tracé van 200 km. Het ruimtebeslag van een buisleiding is 5 meter aan beide kanten, dus 10.000 m² per km buislengte.¹²¹ Het tracé loopt 180 km door landelijk (landbouw- of natuur-) gebied en 20 km door of langs bebouwde omgeving.

Een buisleiding voor ammoniak of methanol moet nieuw worden aangelegd. Het aardgasnet ligt er al. Het nationale waterstofnet maakt voor het grootste deel gebruik van al bestaande aardgasleidingen; 40 km moet nieuw worden aangelegd om industrieterreinen aan te sluiten waarvan 20 km door landelijk gebied en 20 km door industrieel gebied. LOHC's kunnen door bestaande oliepijpleidingen worden getransporteerd, maar dat deze beschikbaar zijn is niet vanzelfsprekend, daarom gaan we ook hier uit van nieuwe leidingen.

We nemen aan dat de ruimtelijke investering voor nieuw aan te leggen buisleidingen op landbouwgrond 8 euro/m² en op industriegebied 304 euro/m² bedraagt.

Zoals in bijlage A is uiteengezet is de capaciteit van gemodelleerde LOHC- en methanolbuisleidingen niet voldoende om het volledige volume te vervoeren. De ruimtelijke kosten worden daarom gecorrigeerd voor het aantal benodigde buisleidingen (26 voor LOHC, bovendien maal 2 omdat *spent fuel* retour vervoerd moet worden, en 2 voor methanol). Omdat de belemmerde stroken van afzonderlijke leidingen elkaar mogen overlappen, is voor 2 methanolbuisleidingen in totaal een 15 m brede strook nodig. Bij een groter aantal buisleidingen met eenzelfde stof zoals bij de LOHC's is naar verwachting een verdere verdichting mogelijk. In de leidingstraat ZWN (LSNed) en in stroken bij Rotterdam wordt een dagmaat van 1 meter vaak gehanteerd.¹²² Met dit uitgangspunt is een strook van 61 m nodig voor 52 buisleidingen. Een kleiner ruimtebeslag zou ook mogelijk kunnen zijn bij het gebruik van grotere buisdiameters en dus minder benodigde buisleidingen dan de standaardmaat van JRC2. Over de eigenschappen bij grotere buisdiameters hebben we echter geen informatie kunnen vinden.

Tabel 44: Samenvatting waarden voor bepalen ruimtelijke investering buisleidingen voor waterstofdragers

	Bestaande leiding	nieuw op landbouwgrond	nieuw op industriële grond	eenheid
Buisleiding NH ₃ , MeOH *, LOHC	0	180	20	km
aardgasnet	200	0	0	km
H ₂ -net	160	20	20	km
grondprijs		8	304	€ / m ²
oppervlak			10.000	m ² per km lengte
oppervlak MeOH (2 buizen)			15.000	m ² per km lengte
oppervlak LOHC (52 buizen)			61.000	m ² per km lengte

*) MeOH : twee buizen voor voldoende capaciteit.

**) LOHC: 26 buizen voor voldoende capaciteit, plus evenveel retourbuizen.

¹²¹ Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur, Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang, 2023

¹²² Referentie: NTA 8036 (2021), Eisen voor de gezamenlijke ligging van buisleidingsystemen in een leidingenstrook.

10. MILIEU

Voor het publiek belang Milieu hebben we gekozen voor een samengestelde indicator, die bestaat uit luchtvervuiling door transport en emissies uit opslag en conversie, geluid van transport, en habitatschade van transport. Dit zijn aspecten waar waarderingskentallen voor beschikbaar zijn, zodat we de ketens kwantitatief kunnen vergelijken op basis van gemonetariseerde getallen.

Luchtvervuiling door transport (som van NO_x en PM)

Bij het vervoeren van waterstofdragers komen luchtvervuilende stoffen vrij door de verbranding van brandstoffen voor transportmiddelen. We gebruiken kentallen van KiM (gebaseerd op CE)¹²³, uitgedrukt in kilogram NO_x en PM per tonkm, voor vrachtwagens, treinen en binnenvaartschepen.

- We nemen als representatieve getallen de gemiddelde waarden voor het goederenvervoer over weg, water en spoor voor de vier goederencorridors in Nederland.
- We nemen aan dat in 2030 de waarde van vrachtwagenemissies, binnenvaart en spoor nog 85% is van de waarde in 2018-2023 vanwege aangescherpte verbruiksprestaties onder druk van EU-regelgeving en klimaatambities.¹²⁴ Voor 2050 is de aanname dat alle vervoer over de weg, het spoor en de binnenwateren emissieloos verloopt (elektrisch).
- We nemen aan dat het aandeel elektrische treinkilometers 75% bedraagt en dieseltreinkilometers 25%. Dit cijfer is overgenomen van het Europese *Handbook* (CE Delft 2019) voor Nederland. Omdat het transport van vloeibare waterstof relatief inefficiënt gebeurt (veel lagere energiedichtheid dan de andere beschouwde waterstofdragers), wordt een factor van 5x zoveel transportbewegingen verondersteld.
- Voor buisleidingen nemen we aan dat compressie en verpompen elektrisch gebeurt zonder broeikasgasemissies.

De emissies per tonkm worden vervolgens vermenigvuldigd met de milieukosten voor verschillende soorten emissies volgens het Handboek Milieuprijzen van CE Delft.¹²⁵ Dat resulteert in de waarderingskentallen in Tabel 45.

¹²³ O. Jonkeren en J. Francke, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM, Kennisbasis Goederenvervoer, Notitie, Februari 2023. CE Delft, Toekomstverkenning, De prijs van een reis, Verkennende analyse richting 2050, mei 2022.

¹²⁴ De [Europese Commissie](#) en Parlement willen dat nieuwe vrachtwagens in 2030 45% minder CO₂ uitstoten dan in 2019, oplopend tot 90% minder in 2040. We nemen aan dat ook voor binnenvaart en spoor vergelijkbare verbeteringen doorzetten.

¹²⁵ CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.

Tabel 45: Waarderingskentallen voor marginale kosten van luchtvervuiling, som van NO_x en PM (bron KiM 2023 = CE Delft 2022)

Waarderingskentallen voor kosten van luchtvervuiling	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm 2022*	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm 2030*	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm 2050*	Toelichting
Weg	€ 0,11	€ 0,09	€ -	gemiddelde vrachtwagen, KiM
Spoor	€ 0,15	€ 0,13	€ -	gemiddelde goederentrein, KiM
Water	€ 0,14	€ 0,12	€ -	gemiddelde binnenvaart, KiM
Buisleiding, H ₂ -net, aardgasnet	€ -	€ -	€ -	

*) Correctie LH₂: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

**) Niet meegeteld in milieukosten Nederlandse deel van de keten.

Voor de NO_x- en PM-uitstoot van transport naar Nederland over zee in 2030 gebruiken we kentallen van de STREAM-studie van CE Delft voor een *deep sea bulkcarrier* van 35.000-60.000 dwt.¹²⁶ Voor 2050 gaan we uit van de IMO-doelen voor *net-zero* zeetransport. Dat betekent een transitie naar CO₂-neutrale brandstoffen.

Tabel 46: Uitstootcijfers NO_x en fijnstof *deep sea bulkcarrier* (bron STREAM-studie)

Uitstoot van luchtvervuiling	PM (g/tkm) (<i>tank-to-wheel</i>)*	NO _x (g/tkm) (<i>tank-to-wheel</i>)*
<i>Deep sea bulkcarrier</i> 2030	0,003	0,13
<i>Deep sea bulkcarrier</i> 2050	0,000	0,06

Emissies uit opslag en conversie-installaties

JRC2 geeft voor de diverse ketenstappen waaronder conversiestappen de emissies per kilogram waterstofequivalent. De volgende emissies treden op. Emissies van broeikasgassen (kooldioxide, methaan, waterstof, lachgas) worden hier niet beschouwd (publiek belang Duurzaamheid – deel-indicator broeikasgassen).

JRC gaat ervan uit dat deze emissies in de lucht verdwijnen. Wij gebruiken voor de NO_x-uitstoot van ammoniakkrakers een waarde gebaseerd op de haalbaarheidsstudie ammoniakkraker Rotterdam. Het toepassen van DeNO_x-nabehandelingstechniek zal noodzakelijk zijn om een dergelijke installatie in Nederland vergund te krijgen. We gaan ervan uit dat ook voor ammoniaksynthese in Nederland DeNO_x-nabehandeling wordt toegepast, maar niet in het exportland.

In de schaduwkosten voor methaanuitstoot zit een effect als broeikasgas-uitstoot en een milieueffect. Het milieueffect is hier meegeteld. De kosten van methaan die we hier meenemen, bedragen de schaduwprijs van methaan (€ 4,70 per kg methaan) minus het effect dat is meegeteld bij Duurzaam (broeikasgassen).

¹²⁶ CE Delft (2021), STREAM Goederenvervoer 2020. Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer – Versie 2.

Tabel 47: Emissies bij opslag en conversie van waterstofdragers (JRC2)

Emissies opslag en conversie in g/kg H ₂ eq in Nederlandse deel van keten			
drager	ketenstap	soort emissie	g/kg H ₂ eq
DBT/MCH	dehydrogenering	NO _x	0*
NH ₃	opslag	NH ₃	0,0002 x 5,63
NH ₃	kraken	NH ₃	0,007
NH ₃	kraken	NO _x	0,14**
NH ₃	synthese	NH ₃	1,63 x 5,63
NH ₃	synthese	NO _x	1,0 x 5,63 x 7%
LSM	steam reforming	CH ₄	4,73 – 3,63 = 1,07
Emissies opslag en conversie in g/kg H ₂ eq in producerende landen			
NH ₃	opslag	NH ₃	0,0002 x 5,63
NH ₃	synthese	NH ₃	1,63 x 5,63
NH ₃	synthese	NO _x	1,0 x 5,63
NaBH ₄	n.v.t.	--	niet bekend***

*) Bij toepassing van elektrische verwarming.

**) Gebaseerd op de haalbaarheidsstudie ammoniakkraker Rotterdam. Deze studie gaat uit van een emissie-eis die bij een productie van 1 Mton H₂ leidt tot een jaarlijkse NO_x-uitstoot van 140 ton/jaar (93% reductie). Deze waarde is ook gebruikt in de MKBV. Wij gaan ervan uit dat bij ammoniaksynthese eveneens nabehandeling wordt toegepast die de NO_x-uitstoot met 93% reduceert.

***) NaBH₄-conversies worden niet in JRC2 behandeld, en ook in andere literatuur hebben we geen informatie aangetroffen over emissies in de diverse stappen van productie, conversie van de drager en recycling van de *spent fuel*.

Geluid

Milieukosten van geluid zijn berekend door de transportvolumes (tonkm) te vermenigvuldigen met kentallen van KiM/CE.¹²⁷ Voor vloeibare waterstof wordt een correctie op deze getallen toegepast vanwege de lage energiedichtheid: de kosten worden met factor 5 verhoogd. Geluid van installaties wordt niet meegenomen vanwege gebrek aan data.

Tabel 48: Waarderingskentallen voor marginale kosten van geluid (bron KiM 2023 = CE Delft 2022)

Waarderingskentallen voor kosten van geluid	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm*	Toelichting
Weg	€ 0,60	gemiddelde vrachtwagen, KiM
Spoor	€ 0,36	gemiddelde goederentrein, KiM
Water	€ -	gemiddelde binnenvaart, KiM
Buisleiding, H ₂ -net, aardgasnet	€ -	

*) Correctie LH₂: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

¹²⁷ O. Jonkeren en J. Francke, Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM (2022), Kennisbasis Goederenvervoer, Notitie, Februari 2023. CE Delft, Toekomstverkenning, De prijs van een reis, Verkennende analyse richting 2050.

Habitatschade bij transport

De habitat is het woongebied van dieren en planten. Vervoer van waterstofdragers kan schade aan de habitat toebrengen doordat gebruikte infrastructuur oppervlakte in beslag neemt (habitatverlies), de habitat versnipperd of vervuult. Ecologische schade door luchtvervuiling wordt niet meegerekend, evenmin als aantasting van het uitzicht (dit betreft niet de natuur zelf, maar de menselijke beleving ervan), exootplanten die door de infrastructuur een kans krijgen, en lichthinder.

Milieukosten van habitatschade bij transport van waterstofdragers zijn berekend door de transportvolumes (tonkm) te vermenigvuldigen met kentallen van CE.¹²⁸ Voor vloeibare waterstof wordt een correctie op deze getallen toegepast vanwege de lage energiedichtheid: de kosten worden met factor 5 verhoogd. Voor buisleidingen hebben we geen kentallen voor habitatschade gevonden. Hoewel grotendeels ondergronds zal de habitatschade niet nihil zijn. We nemen geen kosten op bij gebrek aan informatie. Dit is dus een onderschatting.

Tabel 49: Waarderingskentallen voor marginale kosten van habitatschade (bron CE Delft 2019)

Waarderingskentallen voor kosten van habitatschade	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm*	Toelichting
Weg	€ 1,51	gemiddelde vrachtwagen
Spoor	€ 1,24	elektrische goederentrein
Water	€ 0,94	gemiddelde binnenvaart
Buisleiding, H ₂ -net, aardgasnet	€ -	geen kentallen

*) Correctie LH₂: de kosten worden met factor 5 verhoogd.

Milieu-effect van calamiteit

Bij een calamiteit met opslag, transport of conversie van waterstofdragers kan naast impact voor mensen ook sprake zijn van impact op het milieu. We hebben onderzocht of dit een aanzienlijk effect is bovenop de eerder besproken milieueffecten. De berekeningsmethode is het vermenigvuldigen van de kans op het incident volgens het nationale risicohandboek met het vrijkomende volume en met de milieuprijs van de stof volgens het milieuprijzenhandboek van CE Delft.

Een beperking is dat niet voor alle waterstofdragers een milieuprijs bekend is, alleen voor ammoniak, methaan en waterstof. Omdat ammoniak de stof is met waarschijnlijk de hoogste milieu-impact hebben we de berekening eerst gedaan voor de keten waarbij het binnenlands transport van ammoniak over de weg plaatsvindt. Daarbij blijkt het effect van de milieucalamiteit 0,1% van de totale milieukosten.

Vanwege dit resultaat, en door het ontbreken van milieuprijzen voor de andere waterstofdragers, hebben we het aspect milieueffecten van calamiteiten verder buiten beschouwing gelaten. Nota bene, voor de habitat in de omgeving van de calamiteit is de impact potentieel zeer groot ('dead zones').

¹²⁸ CE Delft (2019), Handbook on the external costs of transport.

BIJLAGE D: GEWIJZIGDE AANNAMES VOOR 2050

In deze bijlage staan de aannames voor de variant 2050 met conservatieve aannames, en de gevoeligheidsanalyse 2050 met progressieve aannames. Alleen de wijzigingen ten opzichte van de dataset voor 2030 staan hier vermeld. Eerst staan de wijzigingen vermeld die voor zowel de conservatieve variant als voor de gevoeligheidsanalyse gelden, daarna geven we de verschillen.

Volume

We nemen een verviervoudiging van het volume van waterstof-eindgebruik aan ten opzichte van 2030, op grond van het hoge scenario (voor 2030) uit de volumestudie door Berenschot, Arcadis en TNO.

Betaalbaar

De volgende tabel geeft de kosten van invoer van waterstofdragers uit Marokko naar Nederland in 2040, in euro per ton waterstofequivalent afgeleverd bij eindgebruiker. HyDelta heeft geen dataset voor 2050, daarom gebruiken we deze set van 2040 voor 2050. Hierbij is sprake van gebruik van *direct air capture* voor de synthese van methanol en methaan.

Tabel 50: Kosten van invoer van waterstofdragers uit Marokko naar Nederland in 2040, in euro per ton waterstofequivalent bij eindgebruiker afgeleverd

Marokko 2030 HyDelta	H ₂ via NH ₃	H ₂ via LH ₂	H ₂ via MCH	H ₂ via MeOH
Lokale H ₂ -productie	€ 1.830	€ 1.790	€ 2.108	€ 2.154
Gecomprimeerde H ₂ -opslag	€ 32	€ 31	€ 58	€ 42
Aanvullende feedstock	€ -	€ -	€ -	€ 940
H ₂ naar drager conversie	€ 916	€ 514	€ 303	€ 309
Drager export en opslag	€ 210	€ 716	€ 400	€ 63
Transport: Scheepvaart	€ 33	€ 215	€ 423	€ 52
Transport: Buisleiding	€ -	€ -	€ -	€ -
Drager import en opslag	€ 182	€ 651	€ 287	€ 52
Drager naar H ₂ -conversie	€ 298**	€ 188	€ 713	€ 123
Totale kosten *	€ 3.500	€ 4.106	€ 4.292	€ 3.734

*) Importkosten zijn de som tot de eerste horizontale lijn: zonder opslag in de importhaven en conversie naar waterstof.

**) HyDelta rekent niet met toepassing van DeNO_x-nabehandeling bij het kraken van ammoniak. In deze studie gaan we daar wel vanuit.¹²⁹

¹²⁹ De investering in SCR bedraagt volgens IPLO € 3-100/Nm³/per uur. De afgasroom bevat ten hoogste 80 mg/m³ NO_x, dit is 140 ton per jaar, de totale afgasroom is dan 200 Nm³/uur. Per uur wordt (1 Mton/8760 uur =) 114 ton H₂ geproduceerd. Dat brengt de CAPEX-kosten op €5-18/tonH₂. De operationele kosten van SCR bedragen €150-

- Voor LSM nemen we een kostenreductie aan in 2050 van 25% op de importkosten in 2030, vergelijkbaar met methanol en ammoniak volgens HyDelta, en voor de kosten van opslag van 3% net als voor ammoniak. De kosten van *steam reforming* blijven gelijk met 2030. Voor natriumboorhydride nemen we aan dat de energiekosten in het exportland dalen van 3 ct. naar 2 ct. per kWh, en er zijn geen andere aanpassingen.
- De kosten van binnenlands transport in 2050 zijn voor alle modaliteiten gelijk aan 2030.
- De CO₂-prijs stijgt naar 176 euro per ton en de elektriciteitsprijs stijgt naar 98 euro/MWh (bron: KEV).

Energieverlies en emissies

- In 2050 wordt CO₂ voor de synthese van methanol en LSM door *direct air capture* beschikbaar gemaakt. Dit betekent dat CO₂-emissies van de ketens met koolstofhoudende waterstofdragers dalen, en dat het energieverlies toeneemt. Voor het effect op CO₂ zie Tabel 25 in bijlage C.
- De CO₂-uitstoot van zeevaart in 2050 is *net-zero*, in lijn met de doelstellingen van de *International Maritime Organization*. Ook voor NO_x en fijnstof gaan we uit van een daling van emissies naar nul in 2050 door inzet van emissievrije energiedragers zoals vloeibare waterstof en van effectieve nabehandelingstechnieken voor resterende brandstoffen.
- Het energieverlies van binnenlands transport over weg, spoor en water daalt volgens Tabel 30 in bijlage C. Voor buisleidingen is de aanname dat het energiegebruik gelijk blijft.

Betrouwbaarheid

- We nemen aan dat technieken die in 2030 nog lagere TRL's hebben, in 2050 zijn doorontwikkeld tot TRL 9. Dat betekent dat de betrouwbaarheid toeneemt.
- In 2030 is de aanname van de experts dat ketens met decentrale conversie minder betrouwbaar zijn (minder leveringszekerheid). De aanname is dat in 2050 voldoende ervaring met de ketens is opgedaan om deze onzekerheden weg te nemen. We rekenen dus in 2050 voor decentrale conversie met nul eenheden extra opslagbehoefte in de ketens.

Verschillen tussen conservatieve variant en gevoeligheidsanalyse met progressieve aannames

De volgende tabel geeft voor de betreffende onderdelen van de ketens weer welke verschillen we aannemen in de variant 2050 en de gevoeligheidsanalyse

Voor de variant 2050 hanteren we conservatieve aannames voor verbetering van conversieprocessen ten opzichte van 2030 in de orde van 5-7% hogere energie-efficiëntie afhankelijk van de ketenstap (elektrolyse, synthese, DAC en conversie naar waterstof). Sommige van deze aannames zijn ontleend aan IRENA¹³⁰ of JRC1, andere zijn hiervan afgeleide eigen aannames.

00 per verwijderde ton NO_x voor het reagens, plus € 0,33/(Nm³ rookgassen per uur) voor de katalysator. Oftewel € 0,021-0,28 /tonH₂ en 0,058 €/tonH₂, beide verwaarloosbaar ten opzichte van de CAPEX-kosten.

¹³⁰ IRENA (2022), Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II – *Technology review of hydrogen carriers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Voor de gevoeligheidsanalyse was de wens om meer progressieve aannames te kiezen om het effect van deze differentiatie op de eindresultaten te beschouwen. Hiervoor nemen we aannames van IRENA en JRC1 over, aangevuld met eigen aannames.

Tabel 51: Verschillen tussen aannames voor basissituatie 2050 (conservatief) en gevoeligheidsanalyse 2050 (progressief)

	Conservatief: 2050 t.o.v. 2030	Progressief: 2050 t.o.v. 2030
NH ₃ synthese	6% efficiëntieverbetering (eigen aanname)	23% efficiëntieverbetering (IRENA)
NH ₃ kraken	5% efficiëntieverbetering (eigen aanname)	50% efficiëntieverbetering (IRENA)
LOHC hydrogenering	4% efficiëntieverbetering (IRENA-pessimistic)	6% efficiëntieverbetering (IRENA-optimistic)
LOHC dehydrogenering	5% efficiëntieverbetering (eigen aanname)	10% efficiëntieverbetering (eigen aanname)
LH ₂ liquefactie	5% efficiëntieverbetering (IRENA)	26,5% efficiëntieverbetering (IRENA)
LH ₂ verdampen	5% efficiëntieverbetering (eigen aanname)	60% efficiëntieverbetering (IRENA)
CH ₄ synthese	6% efficiëntieverbetering (eigen aanname, gelijk aan NH ₃)	23% efficiëntieverbetering (gelijke verbetering als bij NH ₃ aangenomen)
CH ₄ steam reforming	5% efficiëntieverbetering (eigen aanname, gelijk aan NH ₃)	Efficiëntie gelijk aan conservatief, want uitontwikkelde technologie
Methanol synthese	6% efficiëntieverbetering (eigen aanname, gelijk aan NH ₃)	23% efficiëntieverbetering (gelijke verbetering als bij NH ₃ aangenomen)
Methanol steam reforming	5% efficiëntieverbetering (eigen aanname, gelijk aan NH ₃)	50% efficiëntieverbetering (gelijke verbetering als bij NH ₃ aangenomen)
Direct air capture	5% efficiëntieverbetering (eigen aanname)	37% efficiëntieverbetering *
NaBH ₄ synthese	2050 2 ct./kWh vs. 3 ct./kWh 2030, energie-efficiëntie gelijk aan 2030 (eigen aanname)	Kosten als bij conservatief, energie-efficiëntie 10% hoger dan bij conservatief (eigen aanname)
Water elektrolyse	7% efficiëntieverbetering	12% efficiënter dan 2030 (o.b.v. JRC)
Zeeschepen	10% efficiëntieverbetering (eigen aanname)	20% efficiëntieverbetering (eigen aanname)
Investering LH ₂ binnenvaartschip	€ 25 miljoen (eigen aanname) (2030: € 41 miljoen)	€ 18 miljoen (20% duurder dan NH ₃ of LNG-schip) (eigen aanname)

*) Op basis van IEA (2022), *Direct Air Capture. A key technology for net zero*, April. Deze geeft een range van specifiek energieverbruik in GJ/tonCO₂ van 7,2-9,9 voor *solid* DAC en van 5,5-8,8 voor *liquid* DAC. Voor 2030 nemen we 7,2 GJ/tonCO₂, voor progressief 2050 5,5 GJ/tonCO₂.

BIJLAGE E: TOELICHTING NORMALISATIE

Voor normalisatie is in dit onderzoek zoveel mogelijk aangesloten bij de methode van globale normalisatie. Dat wil zeggen dat er is gewerkt met een vaste normalisatieschaal tussen de hoogste (mogelijke) score en de laagste (mogelijke) score. De hoogste (mogelijke) score is gewaardeerd met 1 en de laagste (mogelijke) met 0. Globale normalisatie gaat uit van de theoretische minimale en maximale score en garandeert zo dat alle berekende scores op alle belangen zich bevinden binnen de bandbreedte waarop genormaliseerd wordt.

De normalisatiebandbreedte tussen de laagste en hoogste score is van belang omdat het voor het gebruik van de weegfactoren uitmaakt of het verschil tussen de minst en best beoordeelde keten bijvoorbeeld bij Betaalbaar 1 eurocent is, 1 euro of 10 euro per kilogram. In de Delphi-enquête is per publiek belang daarom een bandbreedte van waarden gegeven, die aan de deelnemers een referentie gaf voor het wegen van de alternatieven. Hierbij moet opgemerkt worden dat de meeste deelnemers de bandbreedte niet bewust zullen hebben meegewogen in het toekennen van een gewicht aan de publieke belangen.

De beste (theoretische) score is voor dit vraagstuk meestal eenvoudig te bepalen. Dat is de situatie van bijvoorbeeld nul uitstoot, nul ruimtebeslag, of 100% nabijheid. Voor het publieke belang Betaalbaar hebben we als best mogelijke score een kostprijs van 2,50 euro per kilogram waterstof verondersteld, ongeveer de kosten van grijze waterstof (de benchmark). In de basisset worden de best mogelijke scores voor veel belangen ook daadwerkelijk bereikt door één van de alternatieven (eventueel na afronding). De beste score op het belang Betaalbaar wordt zo bij de gemaakte aannames in 2050 bereikt met enkele van de ammoniakalternatieven, de beste score op Nabijheid voor alle wegalternatieven of aansluiting op het aardgasnet, en de beste score op transportveiligheid door de buisalternatieven.

De laagst mogelijke score is meestal niet theoretisch te bepalen, behalve voor Nabijheid. Voor Nabijheid is als laagst mogelijke score 0% gekozen omdat dit de slechtst mogelijke score is (als geen enkel bedrijventerrein via deze keten van waterstof kan worden voorzien).

Voor de andere publieke belangen gebruiken we de in de analyse als laagste voorkomende score op dat belang voor een van de onderzochte varianten. Deze scores zijn per publiek belang waar mogelijk vermeld in Hoofdstuk 6.

Tabel 52: Gebruikte bandbreedte voor normalisatie

Publiek belang	Slechtste score	Beste score
Betaalbaar	Laagste score model	€ 2,50 per kg H ₂ , Deze waarde wordt door keten met hoogste score in 2050 bereikt (benchmark)
Economisch krachtig	Laagste score model	Hoogste score model
Betrouwbaar	Laagste score model	Geen extra opslag t.o.v. bestaande stromen van huidige energiedragers (benchmark)
Veilig – Omgevingsveiligheid	Laagste score model	Geen risico (theoretische score)
Veilig – Cyber & Terrorisme	Laagste score model	Geen risico (theoretische score)
Veilig – Transportveiligheid	Laagste score model	Geen risico (theoretische score)
Duurzaam – Broeikasgasemissies	Laagste score model	Geen uitstoot (theoretische score)
Duurzaam – Materiaalgebruik	Laagste score model	Geen kritisch materiaalgebruik (theoretische score)
Duurzaam - Energieverlies	Laagste score model	100% (geen extra energie nodig boven 120 MJ/kg H ₂) (theoretische score)
Adaptief	Laagste score model	0 (theoretische score)
Rechtvaardig - producerende landen	Laagste score model	0% (<i>true price</i> gelijk aan kosten import) (theoretische score)
Rechtvaardig – keten in Nederland	Laagste score model	0% (<i>true price</i> gelijk aan kosten keten in Nederland) (theoretische score)
Toegankelijk – gelijk kostenniveau	Laagste score model	100% geen meerkosten achterland (theoretische score)
Toegankelijk – nabijheid	0% (theoretische score)	100% bedrijven heeft toegang tot keten (theoretische score (en tevens beste score model)
Ruimte	Laagste score model	Geen ruimtebeslag (theoretische score)
Milieu	Laagste score model	Geen milieubelasting (theoretische score)

BIJLAGE F: TOELICHTING DELPHI EN AHP

Voor de weging van de belangen is gekozen voor een Delphi-proces met diverse stakeholders. Om de besluitvorming gestructureerd te laten verlopen is de Delphi-aanpak gecombineerd met de AHP-methode. Zowel de Delphi-aanpak als de AHP-methode worden hier kort toegelicht.

MODIFIED DELPHI-AANPAK

De Delphi-methode is een onderzoeksmethode waarbij de meningen van een groot aantal deelnemers (experts of stakeholders) worden gevraagd ten aanzien van een onderwerp waar geen consensus over bestaat. Door de antwoorden van de andere deelnemers (anoniem) terug te koppelen, wordt in een aantal rondes geprobeerd tot consensus te komen. De Delphi-methode lost een aantal tekortkomingen van traditionele voorspellingsmethodes (zoals de theoretische benadering, kwantitatieve modellen of extrapolatie) op in gebieden waar nauwkeurige wetenschappelijke wetten niet gevestigd zijn. De methode bereikt dit door de waarde van de opinie van een deelnemer, diens ervaring en intuïtie, te erkennen en te gebruiken als volledige wetenschappelijke kennis ontbreekt. Vergelijkingen met traditionele methoden hebben aangetoond dat de Delphi-methode nauwkeuriger voorspellingen oplevert dan deze traditionele methoden.¹³¹

De zogenaamde *Modified Delphi*-methode is afgeleid van de oorspronkelijke Delphi-methode.¹³² De traditionele Delphi-methode neemt door de verschillende schriftelijke iteratieslagen om tot consensus te komen, veel tijd in beslag. Ook kunnen er vragen zijn die niet eenvoudig in hypothesen te vatten zijn, of wanneer ze in hypothesen gevat worden, te weinig ruimte en vrijheid laten aan de stakeholders/experts om nieuwe ideeën of standpunten toe te voegen buiten die ideeën die door het onderzoeksteam voorbereid zijn. De *Modified Delphi*-methode komt hierin tegemoet. Niet het hele proces vindt schriftelijk en anoniem plaats, maar wel het scoren. In de groepsdiscussie(s) worden de verschillen die geïdentificeerd zijn in de schriftelijke enquête besproken. Met de groepsdiscussie wordt doorlooptijd bespaard. Om te voorkomen dat deelnemers hun persoonlijkheid gebruiken om de discussie hun kant op te sturen, dienen wijzigingen ten opzichte van eerdere antwoorden goed onderbouwd te worden en te verklaren zijn uit de discussie, bijvoorbeeld doordat nieuwe argumenten op tafel komen.

De verschillende deelstappen van de *Modified Delphi*-aanpak voor dit onderzoek zijn als volgt:

¹³¹ Shankar Basu & Roger G. Schroeder (1977), "Incorporating Judgments in Sales Forecasts: Application of the Delphi Method at American Hoist & Derrick," *INFORMS*, vol. 7(3), pages 18-27, May.

¹³² Om de tekortkomingen van traditionele voorspellingsmethoden te bestrijden, werd in de jaren 1950-1960 door RAND de Delphi-methode ontwikkeld. Sindsdien zijn er diverse studies uitgevoerd. Shankar Basu & Roger G. Schroeder (1977), "Incorporating Judgments in Sales Forecasts: Application of the Delphi Method at American Hoist & Derrick," *Interfaces, INFORMS*, vol. 7(3), pages 18-27, May. Dalkey, N. and Helmer, O. (1963). An experimental application of the DELPHI Method to the use of experts. *Management Science*, 9, 3: 458-467. <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458>

1. Opstellen en testen van een briefing over aanpak, indicatoren en deelindicatoren, te beschouwen alternatieven en een beoordelingsformulier. Om misverstanden en onduidelijkheden te voorkomen hebben we het formulier en de toelichting eerst met de begeleidingsgroep getest (op begrijpelijkheid, omvang, balans, neutraliteit, e.d.).
2. Schriftelijke ronde onder een breed samengestelde groep, waarin deelnemers hun oordeel moeten geven en onderbouwen over de paarsgewijze vergelijking van de publieke belangen op grond van verschillende indicatoren.
3. Analyse door het onderzoeksteam van de antwoorden en aggregatie van de individuele scores van respondenten tot een totaalbeeld.
4. Bespreken van de aggregatie van de individuele scores en de meegestuurde argumentatie in de fysieke Delphi-bijeenkomst. Doel is om verschillen in antwoorden boven tafel te krijgen die het resultaat zijn van een incompleet beeld, onbekendheid met relevante argumenten en aspecten, of van onduidelijkheden in de methodiek, bijvoorbeeld hoe iets geïnterpreteerd moest worden.
5. Mogelijkheid tot aanpassing van de individuele scores door de deelnemers naar aanleiding van nieuwe informatie en inzichten.
6. Analyse door het onderzoeksteam van de definitieve antwoorden en aggregatie van de individuele scores van respondenten tot een set wegingsfactoren die worden gebruikt in de MCA.

ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)

AHP is een methode om besluitvorming gestructureerd te laten verlopen.¹³³ De methode wordt gebruikt om de criteria die van belang zijn voor het maken van de juiste keuze van een waarde te voorzien, waarna de mogelijke oplossingen kunnen worden doorgerekend en vastgesteld. Wij gebruiken het om een nauwkeurige benadering van het gewicht van de publieke belangen te bepalen. De kennis en ervaring van de deelnemers aan de hierboven beschreven *Modified Delphi*-methode worden gebruikt om de relatieve omvang van weegfactoren te schatten door middel van paarsgewijze vergelijkingen. Elke respondent vergelijkt het relatieve belang van elk paar publieke belangen of indicatoren en geeft hiervoor een score op een 9-puntschaal.

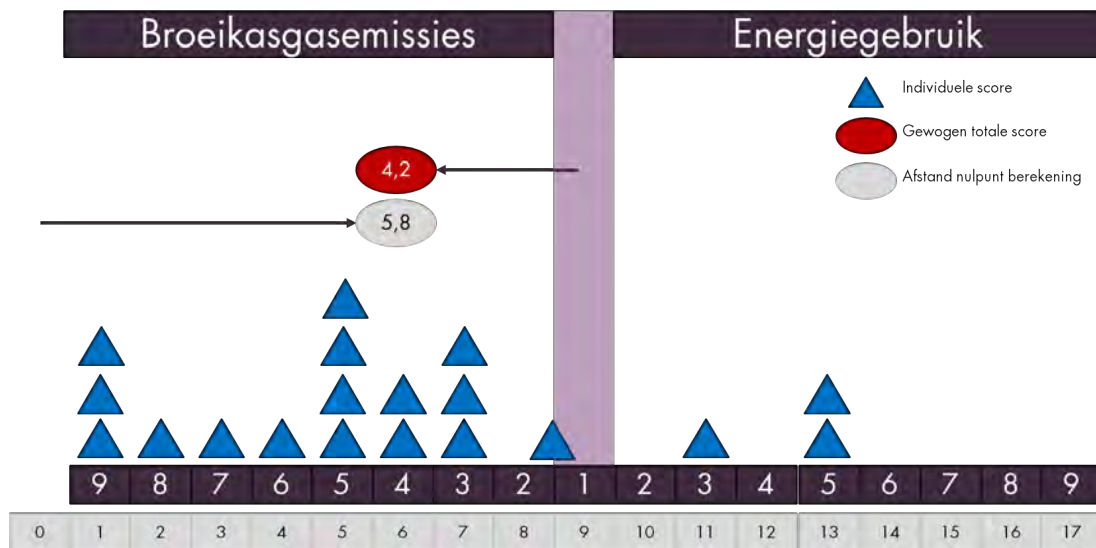
¹³³ R.W. Saaty, The analytic hierarchy process-what it is and how it is used, *Mat/d Modelling*, Vol. 9, No. 3-5, pp. 161-176, 1987. R.W. Saaty, Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making. Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors, *The Analytic Hierarchy/Network Process*, VOL. 102 (2), 2008, pp. 251-318.

Tabel 53: Gebruikte schaal bij scores

9-puntschaal (Saaty's 9-puntschaal)	Numerieke score
Absoluut belangrijker dan	9
(tussen zeer veel en absoluut belangrijker dan)	8
Zeer veel belangrijker dan	7
tussen belangrijker en zeer veel belangrijker dan)	6
Belangrijker dan	5
(tussen enigszins belangrijker en belangrijker dan)	4
Enigszins belangrijker dan	3
(tussen even belangrijk en enigszins belangrijker dan)	2
Even belangrijk	1

In onderstaand voorbeeld wordt de indicator broeikasgasuitstoot door de deelnemers 4,2 x zo belangrijk gevonden als het energiegebruik.

Niet alle 21 deelnemers hebben alle vergelijkingen beoordeeld. Per vergelijking waren wel minimaal 19 bruikbare scores beschikbaar.



Figuur 94: Illustratie individuele scores en gewogen eindscore 19 deelnemers paarsgewijze vergelijking AHP

Het zwaartepunt van alle scores (de 4,2 in dit voorbeeld) is bepaald door de volgende formule op te lossen voor x:

$$\sum_{i=1}^n (v_i - x)$$

Waarbij

i = score van alle deelnemers,

n = aantal deelnemers met een bruikbare score voor vergelijking

v_i = afstand van score tot linkerkant grafiek voor deelnemer i; eerste '9' heeft de afstand 1, laatste '9' heeft de afstand 17

x = afstand van zwaartepunt tot linkerkant van grafiek.

In dit geval komt er een waarde uit van $x=5,8$. Het zwaartepunt ligt dan bij een score van 4,2 voor broeikasgasemissies.

BIJLAGE G: TOELICHTING VIKOR-METHODIEK

De eindscores van de verschillende alternatieven zijn een combinatie van wegingsfactoren die volgen uit het Delphi-proces en van de scores op individuele publieke belangen. De bepaling van de wegingsfactoren is toegelicht in bijlage F en de resultaten zijn beschreven in Hoofdstuk 5. De scores op de individuele publieke belangen zijn te vinden in Hoofdstuk 6. Achtergronden hierbij zijn toegelicht in bijlage C.

We hebben ze gerangschikt volgens de methodiek genoemd VIKOR ('Multicriteria Optimization and Compromise Solution').¹³⁴ Dit levert een genuanceerde uitkomst op: er wordt niet alleen gekeken naar de hoogste score op de combinatie van Delphi-weging en score van ketens van waterstofdragers op individuele publieke belangen, maar ook of een keten op één of meer van de individuele publieke belangen een heel slechte score heeft. Voor diegenen die dit individuele publieke belang zwaar wegen is de keten van waterstofdragers met de allerlaagste score op dit publieke belang waarschijnlijk niet acceptabel.

METHODE

De VIKOR-methode bepaalt de aantrekkelijkheid van een keten aan de hand van:

- 1) de afstand tot de ideale score op elk publiek belang, en
- 2) de afstand tot de minst ideale/de slechtst mogelijke score op elk publiek belang.

De 'ideale score' is een *fictieve* keten die op alle publieke belangen de beste score heeft (de waarde 1). Bijvoorbeeld de combinatie van ammoniak op Betaalbaar en van buisleidingtransport op transportveiligheid.

De 'slechtst mogelijke score' is een *fictieve* keten die op alle publieke belangen de slechtst mogelijke score heeft (de waarde 0). Bijvoorbeeld de combinatie van de score van wegtransport op transportveiligheid en die van natriumboorhydride op Betaalbaar.

De afstand tot deze twee scores kunnen in elke verhouding ten opzichte van elkaar worden gewogen, maar meestal wordt een 50-50 weging gebruikt. Dat hebben we ook in deze studie gedaan:

- 1) De helft van de eindscore is bepaald door de standaard multicriteria-berekening ('Nuts'): weegfactoren x score per publiek belang ('wat willen we het liefst').
- 2) De helft van de eindscore is bepaald door de 'regret'-methode: deze benadeelt alternatieven die in verhouding slecht scoren op één of meer belangen (vergelijk vetorecht: 'wat willen we niet').

De keten die het beste presteert op de combinatie is de keten met de beste overall score. Dit is een keten die redelijk dicht bij de beste score op elk publiek belang ligt en redelijk ver van de

¹³⁴ In het Servisch: VišeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

slechtste score op elk publiek belang. Stel dat drie alternatieven eenzelfde score krijgen op de Nuts-waarde (bijv. 0,5). Dan krijgt het alternatief dat het dichtst bij de slechts mogelijke score ligt op een van de belangen de hoogste regret aftrek en het alternatief dat op alle belangen het verst hiervan verwijderd is de laagste regretwaarde en dus de minste puntenaftrek.

VOORBEELD

Ter illustratie laten we de aanpak zien in een eenvoudig voorbeeld.

Stel we kijken alleen naar de publieke belangen Betaalbaar en Veilig, en we vinden deze belangen even belangrijk (de weegfactoren zijn dus beide 50%).

Er zijn drie alternatieven, die verschillende scores hebben op deze twee publieke belangen, zie Tabel 54. Volgens de standaard MCA-methodiek (nutsscore) krijgen ze alle drie een even hoge score, namelijk 0,5. Er is bij de gekozen weegfactoren geen voorkeur voor één van de drie alternatieven.

Tabel 54: Score van 3 alternatieven volgens standaard MCA-methodiek

Alternatief	Score Betaalbaar (weging 50%)	Score Veilig (weging 50%)	Nutsscore
A	1	0	0,5 (50% x 1 + 50% x 0)
B	0,5	0,5	0,5 (50% x 0,5 + 50% x 0,5)
C	0	1	0,5 (50% x 0 + 50% x 1)

In de VIKOR-methodiek tellen we de genormaliseerde afstand tot de ideale Nutsscore voor de helft mee en gebruiken we voor de andere helft de maximale regretscore. Dit is de maximale genormaliseerde afstand van een alternatief tot de beste score van één van de belangen.

- Voor alternatief A is deze afstand 1 x 50%, omdat A op Veilig een afstand van 1 heeft met een weegfactor van 50%.
- Voor alternatief C is deze afstand 1 x 50%, omdat C op Betaalbaar een afstand van 1 heeft met een weegfactor van 50%.
- Voor alternatief B is de maximale afstand 0,5 x 50%, omdat B op veilig en betaalbaar een afstand van 0,5 heeft met een weegfactor van 50%.

De laagste overallscore is dan het beste alternatief in de VIKOR-methodiek.

De VIKOR-score wordt berekend met de volgende formule:

$$VIKOR = factor * \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} + (1 - factor) * \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+}$$

Waarbij

factor = 50%, dat wil zeggen Nuts-ranking en Regret-ranking tellen even zwaar

S_i = Nutsscore van keten i

S^+ = Beste nutsscore van alle ketens (de ideale nutsscore)

S^- = Slechtste nutsscore van alle ketens

R_i = Regretscore van keten i

R^+ = Beste regretscore van alle ketens

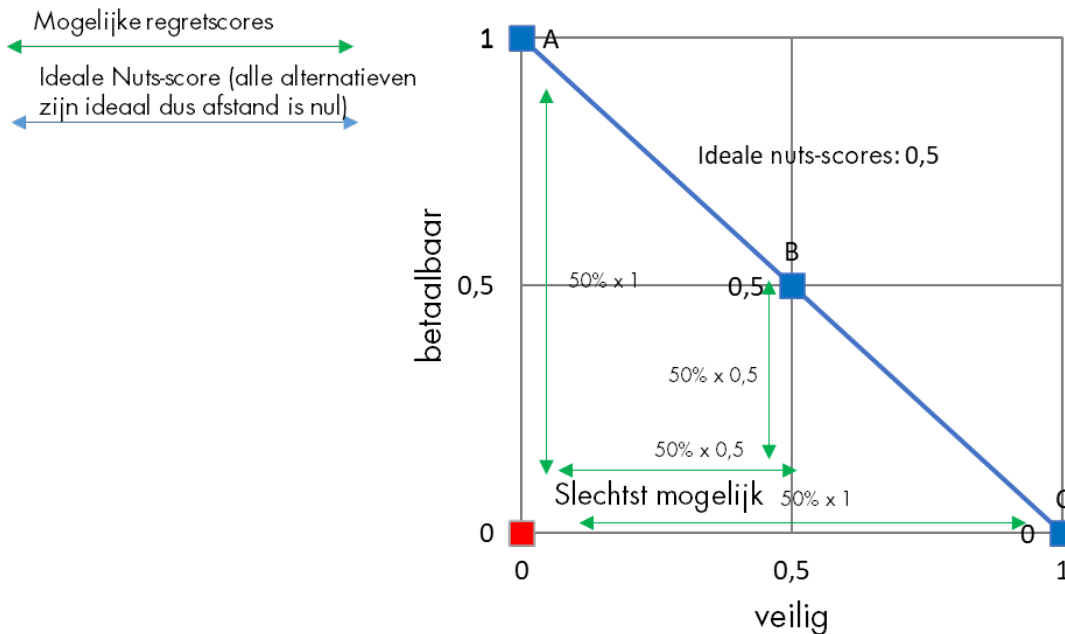
R^- = Slechtste regretscore van alle ketens

In dit voorbeeld is de laagste score de beste. In de presentatie van de eindscores in de hoofdttekst hebben we om geen verwarring te scheppen de eindscore volgens de VIKOR-methodiek omgedraaid: niet 0 maar 1 is de beste score. Alternatief B presteert beter dan A en C omdat het een meer ‘gemiddelde’ score heeft en op geen enkel belang de minste score.

Tabel 55: Score van 3 alternatieven volgens VIKOR-methodiek (standaard en aangepast)

Alternatief	Afstand tot ideale nutsscore	Regret-score Betaalbaar	Regret-score Veilig	Maximaal regret (Ri)	VIKOR-score standaard (laagste = beste)	VIKOR-score omgedraaid (hoogste = beste)
A	0 (0,5 - 0,5)	0 x 50%	1 x 50%	0,5	50% x 0 + 50% x 0,25 / 0,25 = 0,5	0,5 (1 - 0,5)
B	0 (0,5 - 0,5)	0,5 x 50%	0,5 x 50%	0,25	50% x 0 + 50% x 0 / 0,25 = 0	1 (1 - 0)
C	0 (0,5 - 0,5)	1 x 50%	0 x 50%	0,5	50% x 0 + 50% x 0,25 / 0,25 = 0,5	0,5 (1 - 0,5)

De berekening is gevisualiseerd in Figuur 95. Belangrijk om op te merken is dat voor de nutsscore alle belangen gewogen meetellen, en voor de regretscore telt alleen de grootste gewogen afstand tot één van de belangen mee.



Figuur 95: Visualisatie van VIKOR-methodiek voor voorbeeld

BIJLAGE H: VERSCHILLEN TUSSEN LOHC'S

TWEE SOORTEN LOHC: DBT EN MCH

Het principe voor LOHC's is dat de onverzadigde aromatische stof wordt geladen met waterstof in een exotherme hydrogeneringsreactie (bij hoge druk en lage temperatuur), en dat de waterstof wordt vrijgemaakt door een endotherme dehydrogeneringsreactie (zonder druk bij hoge temperatuur). Voor deze studie hebben we gekozen voor twee LOHC's: DBT en MCH. De belangrijkste reden is dat hiervoor voldoende data beschikbaar zijn voor de modellering.

- DBT is de korte naam voor het reversibele paar Dibenzyltolueen (H0-DBT) en perhydrodibenzyltolueen (H18-DBT). De eerste bevat geen waterstof, de tweede bevat 6,16massa% waterstof. DBT wordt al decennia in relatief kleine hoeveelheden gebruikt als stof voor industriële warmtewisseling.
- MCH is de korte naam voor het reversibele paar Tolueen en Methylcyclohexaan. De eerste bevat geen waterstof, de tweede bevat net als H18-DBT 6,12massa% waterstof. Beide zijn bestanddeel van de naftafractie bij olieraffinage. Ook bij aardgaswinning komt tolueen vrij. De ruime beschikbaarheid vertaalt zich in een lagere marktprijs dan van DBT.

Tabel 56 geeft voor beide stoffen de gebruikte waarden voor de modellering in deze studie. De belangrijkste verschillen zijn dikgedrukt. Omdat we niet over alle aspecten voor beide varianten informatie konden vinden hebben we sommige waarden van de andere LOHC overgenomen.

Tabel 56: Gebruikte waarden voor de modellering van DBT en MCH in deze studie.

Eigenschap	Eenheid	DBT	MCH
Soortelijk gewicht	Ton/m ³	H18-DBT 0,91 (heen) H0-DBT 1,04 (retour)	MCH 0,77 (heen) TOL 0,87 (retour)
Toestand tijdens opslag, transport, conversie		Viskeuze, brandbare vloeistoffen. Bij lagere temperaturen neigen de stoffen te klonten	Vluchtige, brandbare en niet viskeuze vloeistoffen
Prijs van materiaal	EUR/kg	5	0,9
Energie-input voor productie van dragermateriaal	MJ/kg	17,2	Niet bekend, we nemen dezelfde waarde aan
H ₂ -gehalte	massa%	6,16 (H18-DBT)	6,12 (MCH)
Veiligheidskenmerken		Brandbaar, niet giftig, potentiële zeer zorgwekkende stof ((p)ZZS)	Brandbaar, giftig, geen ZZS maar bijproduct benzeen wel
CAPEX hydrogenering	MEUR	280 (1000 ktonH ₂ eq/jaar)	Niet bekend, we nemen dezelfde waarde aan
OPEX hydrogenering	%/jaar van CAPEX	1,5	Niet bekend, we nemen dezelfde waarde aan
Energie hydrogenering	MJ/kgH ₂ e _q	1,332	0,9
Verlies H ₂ bij hydrogenering	g/kgH ₂	1	Gelijk aan DBT
CAPEX dehydrogenering	MEUR	Centraal 669 (1000 ktonH ₂ eq/jaar) + 229 (PSA) Decentraal 20 (16,6 ktonH ₂ eq/jaar) + 6 (PSA) Tankstation 4 (373 tonH ₂ /jaar) + 0,5 (PSA) + 0,4 (compressie)	Niet bekend, we nemen dezelfde waarde aan; echter geen PSA voor centrale of decentrale dehydrogenering voor industrieel gebruik
OPEX dehydrogenering	%/jaar van CAPEX	1,5	Niet bekend, we nemen dezelfde waarde aan
Energie dehydrogenering	MJ/kgH ₂ e _q	Centraal/decentraal 45,0 Tankstation 48,6 + 7,7 (compressor)	Centraal/decentraal marktinformatie (elektrisch proces) Tankstation als DBT
Zuiverheid na dehydrogenering		Zuivering met PSA (pressure swing absorption), hoewel niet voor alle industriële eindgebruikers nodig	Marktinformatie - voldoende voor industrieel gebruik, PSA nodig voor fuel cell kwaliteit
Verlies dragermateriaal bij dehydrogenering		0,013%	(marktinformatie)

Bronnen: JRC 1 (2022), Oner and Khalilpour (2022), marktinformatie, RIVM (2022), Clematis et al. (2023), IEA (2019)

