



STRATELLIGENCE

decision support



Vergelijking waterstofproductietechnieken

Multicriteria-analyse op publieke belangen

Vergelijking waterstof- productietechnieken

Multicriteria-analyse op publieke belangen

Stratelligence
Leiden, december 2025
Opgesteld op verzoek van het
Ministerie van Klimaat en Groene Groei
en de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

COLOFON:

Foto voorblad: adobe stockfoto

Het onderzoek Vergelijking waterstofproductietechnieken, Multicriteria op publieke belangen is in opdracht van het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) en de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) uitgevoerd door Gigi van Rhee (Stratelligence) in samenwerking met Remco Hoogma (Dwarsverband) en met bijdragen van Jaco Reijerkerk (Ekinetix).

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

SAMENVATTING

HET ONDERZOEK

Deze studie creëert de feitenbasis waarmee het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) beleidskeuzes kan maken om de verduurzaming van de industrie binnen tien jaar te versnellen en de waterstofmarkt verder van de grond te krijgen. De beleidsfocus voor industriële verduurzaming met waterstof ligt vooralsnog op productie van hernieuwbare waterstof via elektrolyse. Deze markt ontwikkelt zich echter moeizaam. Mede hierdoor verduurzaamt de industrie langzamer dan gepland.

Er zijn ook andere technieken beschikbaar voor de productie van koolstofarme waterstof. Deze kunnen in de komende tien jaar (zichtjaar 2035) bijdragen aan de verduurzaming van de industrie en het opschalen van de waterstofmarkt.

Doel en aanpak

Deze studie maakt inzichtelijk hoe verschillende productietechnieken zich verhouden tot waterstofproductie via elektrolyse met netstroom (de referentie). Hiervoor hebben we een multicriteria-analyse (MCA) uitgevoerd met de publieke belangen uit het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) als criteria: Betaalbaar, Economisch krachtig, Betrouwbaar, Veilig, Duurzaam, Rechtvaardig, Participatief (uitgewerkt als Toegankelijk), Ruimte en Milieu. Hieraan is Adaptief toegevoegd. Aan deze publieke belangen zijn weegfactoren toegekend die tot de in deze MCA besproken eindresultaten leiden. Het ministerie van KGG zou met behulp van de MCA per productietechniek een beleidskeuze kunnen maken om deze wel of niet te stimuleren voor een (on)bepaalde tijd, mogelijk afhankelijk van locatie of eindtoepassing om de industrie de komende tien jaar te helpen te verduurzamen en de waterstofmarkt te helpen opschalen.

Vergeleken productietechnieken

We vergelijken tien productietechnieken (zie ook Tabel A):

1. Elektrolyse met gemiddelde elektriciteitsmix 2035 (referentie),
2. Elektrolyse met direct geleverde hernieuwbare elektriciteit uit wind/zon,
3. Vergassing van biomassa (gekozen is voor houtresten),
4. Vergassing van niet-recyclebaar afval met carbon capture and storage (CCS),
5. Vergisting van biomassa (gekozen is voor rioolslib),
6. Waterontleding (thermolyse),
7. Methaanontleding (pyrolyse),
8. Steam methane reforming (SMR),
9. Steam methane reforming met CCS,
10. Autothermal reforming (ATR) met CCS.

Tabel A: Alternatieven

Categorie	Productietechniek	Icoon	Kenmerken	Uitgangspunt onderzoek
	1. Elektrolyse van water - netstroom (referentie)		Op basis van gemiddelde elektriciteitsmix in 2035	PEM ¹ en alkalische elektrolyse (AEL)
	2. Elektrolyse van water		100% hernieuwbare elektriciteit op basis van wind/zon	Elektrolyse vindt op land plaats
	3. Vergassing - houtresten		Biomassa (hout, landbouwafval en organisch afval)	Gekozen voor houtpellets en houtsnippers
	4. Vergassing - afval		Stedelijk (niet-biogeen) afval, met CCS	Niet anders te verwerken huishoudelijk/industriële afval
	5. Vergisting - rioolslib		Anaerobe vergisting van biomassa	Gekozen voor vergisting van rioolslib
	6. Ontleding - water		Thermolyse van water naar waterstof en zuurstof	Met zeerhogetemperatuur-restwarmte uit metallurgische industrie
	7. Ontleding - methaan		Splitsing van fossiel methaan in waterstof en vaste koolstof	Pyrolyse met plasma-proces
	8. Reforming methaan - SMR		Bestaande SMR zonder CCS	Voldoet niet aan eis van 70% CO ₂ -reductie
	9. Reforming methaan - SMR		Bestaande SMR met retrofit CCS	Retrofit met CCS
	10. Reforming methaan - ATR		ATR met CCS	Nieuwbouw

De studie gaat voor SMR uit van bestaande installaties, zowel met als zonder CCS. SMR zonder CCS haalt de Europees bepaalde 70% koolstofdioxide(CO₂)-reductiedrempel niet, en nieuwbouw zal daarom niet plaatsvinden. Nieuwbouw van SMR met CCS kan de drempel wel halen, maar is niet meegenomen in de vergelijking. Retrofit van bestaande SMR met CCS is wel meegenomen; dit kan de 70%-drempel halen als hier in het ontwerp rekening mee wordt gehouden.

Onderzochte scenario's

We vergelijken de tien productietechnieken uit Tabel A in twee scenario's.

1. Scenario 1, industrieclusters, richt zich op inzet van de productietechnieken voor de industrie in de vijf geografische industrieclusters in 2035. De geproduceerde waterstof wordt geleverd via het landelijk waterstofnetwerk, dat in 2035 de vijf industrieclusters verbindt. Het veronderstelde productievolume waterstof per productiefaciliteit is 50 kton per jaar.

¹ PEM - Proton exchange membrane (elektrolysis) - protonenuitwisselingsmembraan (elektrolyse).

2. Scenario 2, de decentrale industrie, gaat over inzet van de productietechnieken voor de decentrale industrie. De geproduceerde waterstof wordt geleverd via een regionaal waterstofnetwerk dat in 2035 (nog) niet is aangesloten op het landelijk waterstofnetwerk. Het veronderstelde productievolume waterstof per productiefaciliteit is 10 kton per jaar.

Hierbij maken we enkele kanttekeningen:

Nederland heeft onvoldoende rioolslib beschikbaar om het productievolume in scenario 1, industriecusters, realistisch mogelijk te maken. Rioolslibvergisting is daarom geen alternatief in scenario 1.

In scenario 2, de decentrale industrie, zijn geen bestaande SMR-installaties aanwezig. We beschouwen SMR met en zonder CCS daarom niet als reële alternatieven voor de decentrale industrie, omdat de studie uitgaat van reeds aanwezige SMR-installaties.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

De totaalscores per productietechniek zijn berekend voor het zichtjaar 2035 en combineren de genormaliseerde resultaten voor de publieke belangen met de weegfactoren die de opdrachtgever heeft aangeleverd. De totaalscores zijn een maat voor de publieke waarde.

Eerst vatten we per scenario de technieken samen met de hoogste totaalscore op de publieke belangen (zie A en B). Deze hebben maatschappelijk gezien de voorkeur als techniek voor koolstofarme waterstofproductie. Vervolgens kijken we naar beperkingen, waardoor een productietechniek met een hoge totaalscore toch minder geschikt kan zijn voor opschaling van duurzame waterstofproductie voor de industrie (zie C). Ten slotte beoordelen we per scenario welke productietechnieken met hoge scores robuuste mogelijkheden voor opschaling bieden (zie D en E).

A. Welke productietechnieken hebben in de industriecusters de hoogste publieke waarde (scenario 1)?

Met de gekozen weging komen alle onderzochte productietechnieken in de industriecusters beter uit de multicriteria-analyse dan de referentie: elektrolyse met netstroom (mix), zie Figuur A).

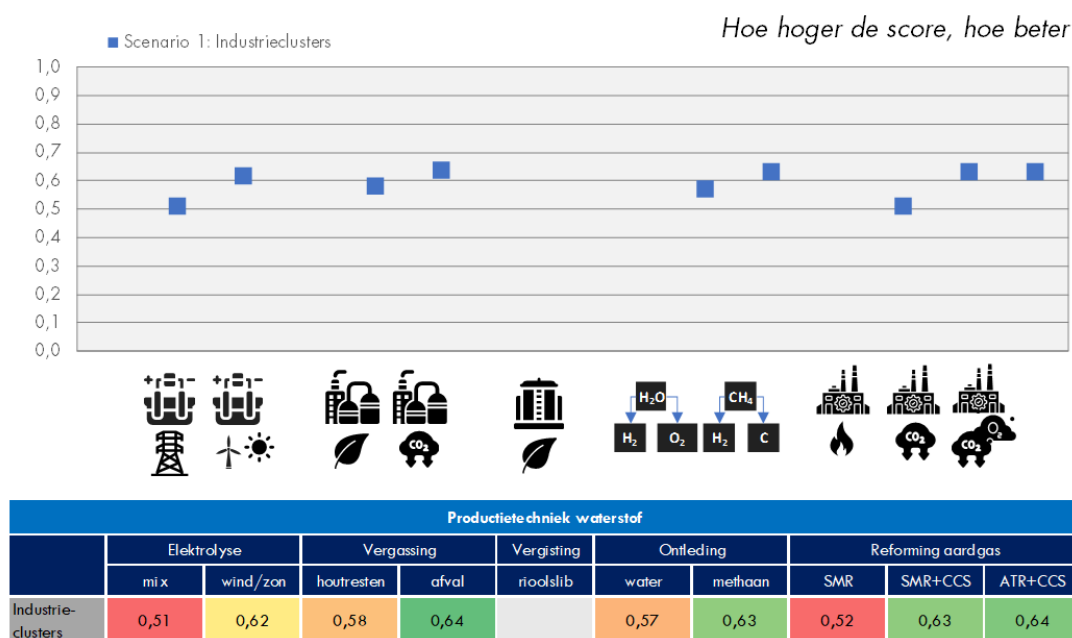
Vier productietechnieken behalen min of meer gelijke hoge totaalscores: vergassing van niet-recyclebaar afval, en drie van de vier op aardgas gebaseerde productietechnieken. Deze hebben elk een 12-13 procentpunten hogere totaalscore dan de referentie, elektrolyse met netstroom.

- Afvalvergassing heeft een hoge totaalscore vanwege hogere scores dan de referentie op Betaalbaar (3,71 euro goedkoper per kilogram waterstof), Duurzaam (43% minder broeikasgasemissies), Adaptief (50% minder risicovolle investeringen), Ruimte (55% minder ruimtebeslag uitgedrukt in grondwaarde) en Milieu (16% minder milieu-emissies).
- Methaanontleding heeft een hoge totaalscore vanwege de voordelen ten opzichte van de referentie op Betaalbaar (3,65 euro goedkoper), Adaptief (49% minder risicovolle investeringen), Ruimte (53% minder ruimtebeslag uitgedrukt in grondwaarde) en Milieu (36% minder milieu-emissies).
- SMR+CCS en ATR+CCS hebben hogere scores op Betaalbaar (3,51 euro en 3,35 euro goedkoper), Adaptief (91% minder risicovolle investeringen), Ruimte (77% minder

ruimtebeslag uitgedrukt in grondwaarde) en Milieu (44% en 41% minder milieu-emissies) en een lagere score op Economisch krachtig (26% lager als gevolg van vooral de import van gas), Duurzaam (o.a. 91% meer broeikasgasemissies) en Rechtvaardig (groter aandeel sociale en milieukosten waarvoor niet wordt betaald).

Ook de andere alternatieve productietechnieken hebben een iets hogere score dan de referentie. Elektrolyse via netstroom, de referentie en huidige beleidsfocus, komt in scenario 1 dus uit op de laagste score. Dit komt vooral door de lage scores op Betaalbaar, Adaptief en Ruimte.

Totaalscore



Figuur A: Totaalscores onderzochte productietechnieken industrieclusters

Alternatieve weging en gevoeligheidsanalyses

Het gebruik van alternatieve sets weegfactoren in plaats van de baselineweging levert verschuivingen op in de totaalscores, rangschikking en verschillen met de referentie.

Gebruik van de weegfactoren van de MCA waterstofdragers en van een neutrale weging resulteert in de hoogste score voor elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit heeft gemiddeld over de drie sets weegfactoren de hoogste score (gemiddeld 0,63). Methaanontleding heeft in twee van de drie sets een hoge score (gemiddeld 0,60). Afvalvergassing en ATR+CCS hebben een hoge score bij de baseline set weegfactoren en een gemiddelde tot hoge score in de alternatieve sets (beide technieken gemiddeld 0,59). De hoge score van deze technieken is dus tamelijk robuust. SMR+CCS behaalt gemiddeld een wat lagere score in geval van een zwaardere weging van Duurzaam en lagere weging van Betaalbaar.

Gevoeligheidsanalyses die verschuivingen in de rangschikking laten zien, zijn:

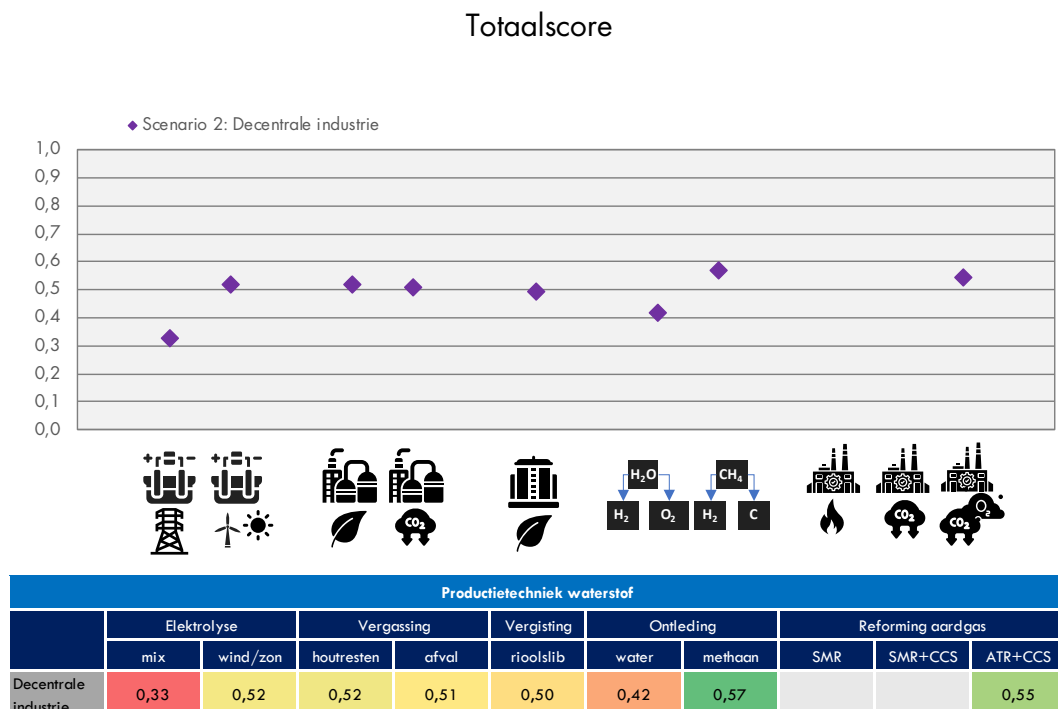
- **De vergelijking met het nulalternatief** voor afvalvergassing: afvalvergassing krijgt dan de hoogste score in scenario 1.

- De analyse bij **lagere elektriciteitsprijzen (-50%)** en **hogere gas- en warmteprijzen (+50%)**: elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit krijgt dan de hoogste score. Om deze reden, en vanwege de hoogste gemiddelde score bij de drie sets weegfactoren, voegen we elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit toe aan de productietechnieken met een hoge publieke waarde.

De overige gevoeligheidsanalyses laten zien dat de totaalscores en rangschikking van de productietechnieken in het algemeen weinig gevoelig zijn voor de onderzochte onzekere uitgangspunten. Het gaat om de impact van de leveringszekerheid energie, van Nederlandse innovatie op het gebied van reactoren en elektrolyzers, van gelijke in plaats van gedifferentieerde marktwaarde voor 100% hernieuwbare waterstof, koolstofarme en niet-koolstofarme waterstof, van het niet meenemen van het ruimtebeslag van de energie en elektriciteitsopwekking, van een kortere lengte van de ringleiding of directe aansluiting in scenario 2, en van een hoger of lager aandeel van de bijproducten dat vermarkt kan worden.

B. Welke productietechnieken hebben bij de decentrale industrie de hoogste publieke waarde (scenario 2)?

Met de gekozen weging komen alle onderzochte productietechnieken voor de decentrale industrie beter uit de multicriteria-analyse dan elektrolyse via netstroom (mix), zie Figuur B.



Figuur B: Totaalscores onderzochte productietechnieken decentrale industrie

Methaanontleding behaalt de hoogste totaalscore. Ten opzichte van de referentie in scenario 2 ligt de score 24 procentpunten hoger. Daarna volgt ATR met twee procentpunten minder.

- Methaanontleding heeft de hoogste totaalscore doordat het op alle publieke belangen redelijk tot goed presteert. Het heeft een hogere score dan de referentie vanwege de hogere score op Betaalbaar (4,65 euro goedkoper dan de referentie), Duurzaam (minder kritiek materiaalgebruik dan elektrolyse), Adaptief (52% minder risicovolle investeringen), Toegankelijk (kleiner kostenverschil tussen productie in de decentrale industrie

en de industrieclusters), Milieu (37% minder milieu-emissies) en Ruimte (19% minder ruimtebeslag uitgedrukt in grondwaarde).

- ATR+CCS heeft een 22 procentpunten hogere totaalscore vanwege de hogere scores op Betaalbaar (4,39 euro goedkoper dan referentie), Duurzaam (minder kritiek materiaalgebruik), Adaptief (65% lagere risicovolle investeringen), Ruimte (31% minder ruimtebeslag uitgedrukt in grondwaarde) en Milieu (21% minder milieu-emissies).

Ook in scenario 2 heeft de referentie, elektrolyse met netstroom, de laagste totaalscore. Dit komt vooral door lage scores op Betaalbaar en Adaptief.

Alternatieve weging en gevoeligheidsanalyses

Het gebruik van alternatieve sets weegfactoren levert verschuivingen op in de totaalscores, rangschikking en verschillen met de referentie.

Gebruik van de weegfactoren van de MCA waterstofdragers resulteert in de hoogste score voor elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Bij een neutrale weging behoudt methaanontleding de hoogste score. Methaanontleding heeft bij twee van de drie sets weegfactoren en ook gemiddeld de hoogste score (gemiddeld 0,48). De hoge score van methaanontleding is dus tamelijk robuust. ATR+CCS heeft gemiddeld over de drie sets weegfactoren een lagere totaalscore (0,41). Deze score is dus minder robuust. Elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en rioolslibvergisting nemen gemiddeld over de drie sets weegfactoren de tweede plek in (gemiddeld 0,45). De laagste gemiddelde scores zijn voor afvalvergassing, houtrestenvergassing en de referentie (gemiddeld 0,35).

Gevoeligheidsanalyses die verschuivingen in de rangschikking laten zien, zijn:

- **De vergelijking met het nulalternatief** voor afvalvergassing: afvalvergassing behaalt dan de op een na hoogste score in scenario 2, direct na methaanontleding.
- De analyse bij **lagere elektriciteitsprijzen** (-50%) en hogere gas- en warmteprijzen (+50%): elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit behaalt dan samen met methaanontleding hoogste score. Om deze reden, en vanwege de hoge gemiddelde score bij de drie sets weegfactoren, voegen we elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit toe aan technieken met een hoge publieke waarde.

De overige gevoeligheidsanalyses laten zien dat de totaalscores en rangschikking van de productietechnieken in het algemeen weinig gevoelig zijn voor de onderzochte onzekere uitgangspunten.

C. Welke factoren kunnen de opschaling van koolstofarme waterstofproductie beperken?

De bijdrage aan de opschaling van duurzame waterstof wordt mede bepaald door beperkingen van grondstoffen en benodigde energie, alternatieve toepassing van deze grondstoffen, toepassingsmogelijkheden qua regelgeving en door andere randvoorwaarden.

Beschikbaarheid grondstoffen en energie

Het opschalingspotentieel van de productietechnieken kan beperkt zijn doordat de grondstoffen niet onbegrensd voorhanden zijn. Dit geldt met name voor houtrestenvergassing en rioolslibvergisting.

- Voor rioolslibvergisting is de productie van 10 kton per jaar in scenario 2 alleen mogelijk bij gebruik van verzameld rioolslib van alle waterzuiveringen in de helft van

Nederland. Een kleinere productieschaal van 1-2 kton per jaar zou wel toepasbaar zijn op een rioolwaterzuiveringsinstallatie met centrale slibvergisting.

- Voor houtrestenvergassing zijn houtsnippers uit binnenlandse productie beperkt beschikbaar. Voor houtpellets kunnen door importeren grotere volumes worden verkregen.

Het volume van het benodigde niet-recyclebaar afval in Nederland is volgens recent onderzoek voldoende voor meerdere installaties zoals aangenomen in scenario 1. Voor waterontleding zijn weinig zeerhogetemperatuur-warmtebronnen beschikbaar.

Uiteraard zijn aardgas, elektriciteit en water ook niet onbeperkt beschikbaar voor waterstofproductie, maar de beschikbaarheid van deze grondstoffen en energiedragers wordt vooralsnog niet als belemmerend gezien voor grootschalige waterstofproductie. Een kanttekening is dat edelmetalen voor PEM-elektrolyzers en waterontleding schaars zijn en de opschaling kunnen begrenzen. Beschikbaarheid van voldoende water kan een probleem worden voor elektrolyzers in het binnenland, als bij droogte een innameverbod geldt.

Concurrerend gebruik grondstoffen en energie

Ook concurrentie met andere toepassingen kan het opschalingspotentieel van de productietechnieken beperken. Rioolslibvergisting, afvalvergassing, vergassing van lokale houtsnippers en waterontleding moeten concurreren met alternatief gebruik van de grondstoffen of schaarse zeerhogetemperatuur-warmte in Nederland.

Alleen voor afvalvergassing met CCS waren binnen de reikwijdte van deze studie voldoende data om dit aspect uit te werken. Het effect van vergelijken met alternatief gebruik van het afval is gunstig voor de totaalscore omdat niet-recyclebaar afval nu nog wordt verbrand met laag rendement en CO₂-uitstoot en andere schadelijke emissies.

Toepassing qua regelgeving

De alternatieve productietechnieken hebben doorgaans niet hetzelfde toepassingspotentieel in de industrie als elektrolyse. Ze kwalificeren niet als hernieuwbare brandstof van niet-biologische oorsprong en kunnen daardoor geen invulling geven aan het beleidsdoel om in 2035 60% hernieuwbare waterstof in de industrie te gebruiken. Alleen elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit heeft een hoge score ten opzichte van elektrolyse met netstroom én levert hernieuwbare waterstof op.

De overige productietechnieken kunnen wel worden gebruikt om de resterende 40% van de industriële waterstof te leveren. Op langere termijn kan het gebruik van fossiele grondstoffen voor waterstofproductie lastiger worden omdat beleid gericht is op het verminderen van fossiele koolstof. In die gevallen zou kunnen worden overgestapt op gebruik van biomethaan of groengas.

Overige randvoorwaarden

Locatiespecifieke randvoorwaarden die inpassing van productietechnieken in de praktijk kunnen hinderen zoals het verkrijgen van een netaansluiting, voldoende ruimte, transportmogelijkheden en vergunningen zijn niet afzonderlijk onderzocht en niet meegewogen in het eindoordeel.

D. Welke productietechnieken met hoge scores bieden kansen voor opschaling van koolstofarme waterstofproductie in scenario 1?

De vijf productietechnieken met hoge scores die opschalingspotentieel hebben en voor 2035 een voldoende hoog Technology Readiness Level (TRL) hebben, zijn voor scenario 1 afvalvergassing, methaanontleding, ATR+CCS, SMR+CCS, en elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Ze hebben een hogere publieke waarde dan elektrolyse met netstroom.

De eerste vier productietechnieken voldoen aan de eis voor koolstofarme waterstof, maar niet aan de eis voor hernieuwbare waterstof die in 2035 60% van de productie moet uitmaken. De techniek die hier wel aan voldoet is elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit. Deze zou gunstiger uit de analyse komen als de netaansluitkosten en elektriciteitskosten een minder grote impact zouden hebben op Betaalbaar.²

De overige productietechnieken (houtrestenvergassing en waterontleding) bieden geen of minder kansen voor opschaling van koolstofarme waterstofproductie vanwege een te laag TRL in richtjaar 2035 voor commerciële toepassing. SMR zonder CCS voldoet niet aan de eis voor koolstofarme waterstof.

E. Welke productietechnieken met hoge scores bieden kansen voor opschaling van koolstofarme waterstofproductie in scenario 2?

De drie productietechnieken die opschalingspotentieel hebben en voor 2035 een voldoende hoog TRL hebben, zijn voor scenario 2 methaanontleding, afvalvergassing en elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Ze hebben een hogere score dan elektrolyse met netstroom.

Methaanontleding komt naar voren als meest kansrijke productietechniek om de opschaling van koolstofarme waterstof te versnellen. Afvalvergassing heeft in scenario 2 een gemiddeld lagere totaalscore over alle sets weegfactoren dan methaanontleding, maar een hogere publieke waarde als de bestaande verbranding van afval (zonder CCS) wordt voorkomen.

Deze twee productietechnieken voldoen aan de eis voor koolstofarme waterstof, maar niet aan de eis voor hernieuwbare waterstof. Elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit voldoet daar wel aan en zou de hoogste score kunnen krijgen als de netaansluitkosten en elektriciteitskosten een minder grote impact zouden hebben op Betaalbaar.²

De overige productietechnieken bieden geen of minder kansen voor opschaling vanwege lagere of minder robuuste totaalscores (ATR+CCS), een te laag TRL in richtjaar 2035 voor commerciële toepassing, of beperkte beschikbaarheid of concurrerend gebruik van grondstoffen (houtresten, zeerhogetemperatuur-warmte en rioolslib).

BELEIDSAANBEVELINGEN

Het doel van deze studie is het opleveren van een feitenbasis en niet het doen van beleidsaanbevelingen. Desalniettemin geven we hier enkele suggesties naar aanleiding van bevindingen die uit het onderzoek en de gesprekken met stakeholders naar voren zijn gekomen.

1. *Hoogte ETS versus kosten CCS.* Het is belangrijk dat CO₂-afvang en -opslag financieel aantrekkelijker is dan uitstoten van CO₂. Als het niet haalbaar is om de kosten bij CCS

² De kosten van elektriciteit zijn overgenomen uit de Klimaat- en energieverkenning 2024 (inschatting 2035) en de netwerkkosten zijn gebaseerd op de tarieven per 1 januari 2025. Er zijn signalen dat beide kostenposten veel hoger uit kunnen gaan vallen. Tegelijkertijd wordt onderzocht of de elektriciteitsprijzen (variabel en netaansluiting) voor de industrie gematigd kunnen worden.

voor scenario 2 onder de ETS-prijs te brengen, dan is af te raden om CCS-afhankelijke productietechnieken toe te passen op plekken waar CCS te duur is.

2. *Ondersteuningsmaatregelen afstemmen op techniek:* De onderzochte productietechnieken hebben elk verschillende voor- en nadelen. Ze vragen daarom om andersoortige ondersteuningsmaatregelen. Denk aan het bevorderen van ontwikkeling en demonstratie en gebruik van biomethaan bij methaanontleding, retrofitten van bestaande SMR-installaties met CCS, inzet op verlaging van elektriciteits- en netwerkkosten voor elektrolyse en het combineren van waterontleding met nieuwe kerncentrales,.
3. *Waterstofproductie versus sturen op andere waardeketens:* De onderzochte productietechnieken zijn vergeleken bij dezelfde omvang van waterstofproductie. Hierdoor zijn verschillen tussen de productietechnieken als het gaat om andere (neven)functies niet goed zichtbaar. We adviseren om ook deze andere aspecten te betrekken in de keuze voor beleid ter ondersteuning of ontmoediging. Het gaat om het belang van andere eindproducten naast de productie van waterstof (zoals koolstofproducten), het hoogwaardiger verwerken van bestaande afvalproducten (vergeleken met verbranding), de productie van waardevolle tussenproducten (syngas voor chemische industrie) en waardering van de rol van elektrolyzers bij het balanceren van het energiesysteem.

AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Gedurende het onderzoek kwamen we verschillende vragen, witte vlekken en onzekerheden tegen die verder onderzoek verdienen:

1. Onderzoek naar de impact van flexibele contracten en lagere nettarieven op kostenreductie van elektrolyse.
2. Toetsen en verifiëren van de impact op de omgevingsveiligheid, met name het risico van de CO₂-keten en de verschillen tussen de productieprocessen voor meer nauwkeurigere scores.
3. Analyse van milieuvergunningen van bestaande of geplande waterstofproductie-installaties voor nauwkeurigere informatie over de milieu-impact.
4. Uitbreiding van de vergelijking voor: 1) aanvullende technieken zoals pyrolyse van biomassa (met biochar als bijproduct) en pyrolyse van niet-recyclebaar huishoudelijk afval, 2) gebruik van groengas of biomethaan in plaats van fossiel aardgas, en 3) de situatie van industriecluster Chemelot die vanwege de ligging in het binnenland afwijkt van de situatie in scenario 1.
5. Doorontwikkeling van indicatoren om de systeemwaarde en de toekomstbestendigheid van een techniek te kunnen betrekken in de publieke belangen Economisch krachtig en/of Adaptief.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	i
Inhoudsopgave	x
Afkortingen en begrippen	xiii
HOOFDSTUK 1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Verantwoording	2
1.3 Leeswijzer	3
Vergelijking waterstofproductietechnieken Deel A: Methodiek	4
HOOFDSTUK 2 Waterstofproductietechnieken	5
2.1 Selectie waterstofproductietechnieken	5
2.2 Vergelijking	7
2.3 Uitgangspunten van modellering	10
HOOFDSTUK 3 Methodiek multicriteria-analyse	13
3.1 Bepalen van de criteria	13
3.2 Bepalen van de scores op de publieke belangen	15
3.3 Normalisatie van de scores op de publieke belangen	16
3.4 Weging van de publieke belangen	16
3.5 Rangschikking van de alternatieven	18
3.6 Gevoeligheidsanalyses	18
3.7 Wijze van presentatie resultaten	19
Vergelijking waterstofproductietechnieken Deel B: Resultaten	21
HOOFDSTUK 4 Scores op publieke belangen	22
4.1 Betaalbaar	22
4.2 Economisch krachtig	23
4.3 Betrouwbaar	25
4.4 Veilig	26
4.5 Duurzaam	30
4.6 Adaptief	34
4.7 Rechtvaardig	35
4.8 Toegankelijk	38
4.9 Ruimte	41
4.10 Milieu	42
HOOFDSTUK 5 Totaalscores	44
5.2 Randvoorwaarden en kenmerken per productietechniek	49

5.3 Gevoeligheidsanalyses.....	51
Vergelijking waterstofproductietechnieken Deel C: Conclusies en aanbevelingen	55
HOOFDSTUK 6 Conclusies en aanbevelingen	56
6.1 Conclusies.....	56
6.2 Beleidsaanbevelingen	63
6.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek	65
Literatuurlijst	67
Bijlage A: Data per waterstofproductietechniek	70
Elektrolyse van water (netgebonden en direct hernieuwbare elektriciteit)	70
Vergassing van houtresten	72
Vergassing van afval met Carbon Capture and Storage (CCS)	75
Vergisting van rioolslib	77
Ontleding van water (thermolyse)	80
Ontleding van methaan (pyrolyse)	83
Steam methane reforming met en zonder CCS	85
Autothermal reforming met CCS.....	87
Bijlage B: Algemene uitgangspunten berekening	90
Infrastructuurkosten	90
Kosten en uitgangspunten energie	92
Kosten en uitgangspunten CO ₂	94
Kosten en uitgangspunten grondstoffen	95
Waarde waterstof.....	98
Opbrengsten (bij)producten	99
Economische uitgangspunten	101
Bijlage C: Achtergronden berekening	102
Betaalbaar	102
Economisch Krachtig	104
Betrouwbaar	108
Veilig	114
Duurzaam	126
Adaptief	130
Rechtvaardig	132
Toegankelijk.....	133
Ruimte	134
Milieu.....	138
Bijlage D: Gevoeligheidsanalyses	143
D1. Impact leveringszekerheid energie	143
D2. Impact Nederlandse innovatie en CAPEX op Economisch krachtig	144
D3. Impact gelijke marktwaarde waterstof op Economisch krachtig.....	145
D4. Impact weglaten ruimtebeslag energie op Ruimte	146
D5. Impact kortere waterstofverbinding in scenario decentrale industrie.....	147
D6. Impact van hogere en lagere energieprijzen.....	151
D7. Impact van hogte aandeel te vermarkten bijproducten	153

D8. Impact van vergelijking met nulalternatief afvalstroom	155
D9. Gevoeligheid voor verschillende sets weegfactoren	161
Bijlage E: Toelichting normalisatie	165
Bijlage F: Toelichting VIKOR-methodiek	167
Methode	167
Voorbeeld	168

AFKORTINGEN EN BEGRIPPEN

AEL	Alkalische elektrolyse
ATR	Autothermal reforming - autothermische reforming
AVI	Afvalverbrandingsinstallatie
BoP	Balance of plant - essentiële ondersteunende componenten en hulpsystemen die nodig zijn voor een efficiënte werking, exclusief de hoofdininstallatie (reactor, elektrolyser).
CAPEX	Capital expenditures - kapitaaluitgaven
CCS	Carbon capture and storage - koolstofafvang en -opslag
CCU	Carbon capture and use - koolstofafvang en gebruik
CH ₄	Methaan
CO ₂	Kool(stof)dioxide
DF	Dark fermentation – een vorm van anaërobe vergisting
EHS	Extra hoogspanningsnet, 380 kV
ERE	Emissiereductie-eenheid
ETS	EU emissions trading system – EU emissiehandelssysteem
FID	Final investment decision - definitieve investeringsbeslissing
GJ	Gigajoule
Groengas	Groengas is een alternatief voor aardgas, CO ₂ -neutraal en wordt geproduceerd onder andere uit gft-afval, mest en slib.
GWP	Global Warming Potential
H ₂	Waterstof
IPCEI	Important project of common European interest - belangrijk project van gemeenschappelijk Europees belang
JRC	Joint Research Centre
KEV	Klimaat- en energieverkenning
KGG	Ministerie van Klimaat en Groene Groei
LCA	Life cycle analysis - levenscyclusanalyse
LNG	Liquid natural gas - vloeibaar aardgas
MCA	Multicriteria-analyse, MCA waterstofdragers, studie uitgevoerd in 2024
MER	Milieueffectrapport
MJ	Megajoule
MW	MegaWatt
NMVOS	Vluchtige organische stoffen zonder methaan
N ₂ O	Distikstofmonoxide ('lachgas')
NO _x	Stikstofoxiden
NPE	Nationaal plan energiesysteem
O ₂	Zuurstof
OPEX	Operational expenses - operationele kosten
OWE	Opwekking van waterstof door elektrolyse - subsidieregeling
PEM	Proton exchange membrane (elektrolysis) - protonenuitwisselingsmembraan (elektrolyse)
PM ₁₀	Fijnstof (particulate matter) met afmeting kleiner dan 10 micrometers in doorsnede

PM _{2.5}	Fijnstof (particulate matter) met afmeting kleiner dan 2,5 micrometers in doorsnede
PPA	Power purchase agreement - elektriciteitsafnameovereenkomst ³
PSA	Pressure swing adsorption – drukschommelingsadsorptie, een waterstofzuiverings-techniek
RARE	Raffinagereductie-eenheid
RFNBO	Renewable fuel of non-biological origin - hernieuwbare brandstof van niet-biologische oorsprong
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie
SMR	Steam methane reforming - stoommethaanreforming
SO _x	Zwaveloxiden
SRF	Solid recoverable fuel - vaste, herwinbare brandstof: een restfractie die bestaat uit biomassa, kunststoffen, textiel en papier, die resteert nadat nascheiding van mineralen en metalen heeft plaatsgevonden en die ongeschikt is voor traditionele vormen van (materiaal)recycling.
TRL	Technology Readiness Level. De TRL's geven de mate van ontwikkeling van een technologie aan, waarbij TRL 1 staat voor technologie aan het begin van de ontwikkeling en TRL 9 voor technologie die technisch en commercieel gereed is.
True price	True price is de marktprijs van een product met daarbij opgeteld de sociale en milieukosten waarvoor niet wordt betaald.
UPW	Ultra puur water
VIKOR	Rangschikingsmethode multicriteria-analyse, in het Servisch: VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
VOC/VOS	Vluchtige organische componenten / stoffen
WoL	Wind op Land
WoZ	Wind op Zee
ZHT	Zeer hoge temperatuur

³ In deze studie betreft het specifiek een elektriciteitsafnameovereenkomst tussen een groene elektriciteitsproducent en een producent van waterstof.

1.1 AANLEIDING

De Nederlandse industrie moet en wil graag verduurzamen. Een van de verduurzamingsroutes is koolstofarme waterstof. Dit betreft waterstof met tenminste 70% broeikasgasemissiereductie ten opzichte van de 'fossiele standaard' overeenkomstig Europese regelgeving.

De beleidsfocus voor het verduurzamen van de industrie met waterstof ligt vooralsnog op productie van hernieuwbare waterstof⁴ via elektrolyse. De markt voor waterstofproductie via elektrolyse komt echter moeizaam van de grond. Mede hierdoor verduurzaamt de industrie langzamer dan gepland en gaan bedrijven niet over tot een Final Investment Decision (FID) voor het bouwen van grootschalige elektrolyzers. Ter illustratie: van de zeven projecten voor grootschalige elektrolyse (>100 MW) waaraan eind 2022 een 'Important Project of Common European Interest' (IPCEI)-subsidie is toegekend, hebben er tot op heden twee projecten een FID genomen.

Er zijn ook andere technieken dan elektrolyse voor de productie van koolstofarme waterstof. Deze kunnen mogelijk op korte termijn bijdragen aan de verduurzaming van de industrie en het opschalen van de waterstofmarkt. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) en het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) willen daarom inzichtelijk maken hoe deze productietechnieken zich verhouden tot het produceren van waterstof via elektrolyse, de referentie. Hiervoor hebben RVO en KGG Stratelligence gevraagd om een multicriteria-analyse (MCA) uit te voeren, die de publieke belangen uit het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) als criteria gebruikt.

Het gaat om de volgende 10 publieke belangen:

- Betaalbaar
- Economisch krachtig
- Betrouwbaar
- Veilig
- Duurzaam
- Adaptief
- Rechtvaardig
- Participatief⁵
- Ruimte
- Milieu

Het publieke belang Adaptief maakt geen onderdeel uit van de publieke belangen in het NPE. Dit belang is in afstemming met de opdrachtgever hieraan toegevoegd. Omdat de ontwikkeling van de waterstofmarkt vele onzekerheden kent, is Adaptief een kenmerk dat publieke waarde

⁴ In Europese regelgeving wordt de term 'hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong' gebruikt, in het Engels afgekort tot RFNBO - Renewable fuel of non-biological origin.

⁵ 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.

heeft. Een productietechniek met een hoge score op Adaptief heeft bij veranderende omstandigheden minder last van vroegtijdig af te schrijven activa (*stranded assets*) of lock-in-effecten.

In deze studie vergelijken we de volgende productietechnieken:

1. Elektrolyse met gemiddelde elektriciteitsmix 2035 (referentie),
2. Elektrolyse met direct geleverde hernieuwbare elektriciteit uit wind/zon,
3. Vergassing van biomassa (gekozen is voor houtresten),
4. Vergassing van niet-recyclebaar afval met carbon capture and storage (CCS),
5. Vergisting van biomassa (gekozen is voor rioolslib),
6. Waterontleding (thermolyse),
7. Methaanontleding (pyrolyse),
8. Steam methane reforming (SMR),
9. Steam methane reforming met CCS,
10. Autothermal reforming (ATR) met CCS.

De productietechnieken beoordelen we voor twee scenario's:

1. Het eerste scenario, industrieclusters, richt zich op de inzet van productietechnieken voor de industrie in de vijf geografische industrieclusters in 2035. De geproduceerde waterstof wordt geleverd via het landelijk waterstofnetwerk. Het landelijk waterstofnetwerk verbindt in 2035 de vijf industrieclusters.
2. Het tweede scenario, de decentrale industrie, gaat over de inzet van productietechnieken voor de decentrale industrie. De geproduceerde waterstof wordt geleverd via een regionaal waterstofnetwerk dat in 2035 (nog) niet is aangesloten op het landelijk waterstofnetwerk.

Het doel van de MCA is om de feitenbasis te creëren waarmee het ministerie van KGG beleidskeuzes kan maken om de verduurzaming van de industrie binnen tien jaar te versnellen en de waterstofmarkt verder van de grond te krijgen. Deze beleidskeuzes zijn afhankelijk van de weging van de verschillende publieke belangen en de politieke context. Een uitkomst naar aanleiding van de MCA kan zijn dat per productietechniek een beleidskeuze wordt gemaakt om deze wel of niet te stimuleren voor een (on)bepaalde tijd, mogelijk afhankelijk van locatie of eindtoepassing.

1.2 VERANTWOORDING

Uitgangspunt voor deze studie is het gebruik van bestaande literatuur ten aanzien van de technologie-, kosten- en marktontwikkeling voor waterstofproductietechnieken. Wij hebben hierbij gebruikgemaakt van een brede set databronnen. We hebben onder andere onderzoek van Hydrogen Europe, het Joint Research Centre (JRC) en TNO geraadpleegd. Van het JRC hebben we zowel de kostenstudie als de LCA-studie van import waterstofdragers gebruikt. Daarnaast benutten we bronnen van de MCA-studie over waterstofdragers van Stratelligence (MCA waterstofdragers) en de wetenschappelijke literatuur. De combinatie van deze en andere bronnen heeft tot nieuwe inzichten geleid en ook witte vlekken en inconsistenties zichtbaar gemaakt.

Geen enkele studie neemt de complete voor dit onderzoek gekozen set productietechnieken onder de loep, en ook niet vanuit het oogpunt van alle onderscheiden publieke belangen. Hierdoor was 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. Dit hebben we gedaan door middel van interviews en het verzamelen van aanvullende marktinformatie. Er zijn interviews gehouden met 'vertegenwoordigers' van verschillende productietechnieken. In enkele gevallen is gebruik gemaakt van vertrouwelijk verkregen data. Deze

informatie is niet herleidbaar verwerkt. Hierbij hebben we telkens de informatie vergeleken met openbaar beschikbare data om in te schatten of de geleverde waarden plausibel zijn. Daarnaast hebben we tussenresultaten besproken met TNO en JRC om de plausibiliteit te toetsen en om aanvullende data te verkrijgen.

In de literatuur is relatief veel te vinden over de technische en marktontwikkeling van waterstof en waterstofketens, maar nog weinig over verschillende publieke belangen van eindgebruikers, omwonenden, 'maatschappij' en natuur genoemd in het NPE. Om die publieke belangen te kunnen beoordelen is een concretisering van elk publiek belang nodig. In het NPE is deze concretisering beperkt uitgewerkt. We hebben daarom in de MCA waterstofdragers eigen inzichten, kennis en methodieken ontwikkeld om bruikbare indicatoren voor deze studie te vinden. Deze indicatoren zijn in de voorliggende studie zoveel mogelijk hergebruikt en aangepast of aangevuld waar nodig of wenselijk.

In deze opdracht heeft de opdrachtgever de te gebruiken weegfactoren voor de tien publieke belangen aangeleverd.

Tijdens het onderzoek is verschillende keren overlegd met de opdrachtgever en begeleidingsgroep. De aanpak van het onderzoek en de resultaten zijn gepresenteerd in drie stakeholderbijeenkomsten die het ministerie van KGG en RVO hebben georganiseerd (31 maart, 14 mei, 17 juni 2025). Feedback uit de overleggen en bijeenkomsten heeft voor enkele aspecten geleid tot een verdiepingsslag in het najaar. De uitkomsten hiervan zijn verwerkt in dit rapport.

1.3 LEESWIJZER

Dit rapport bestaat uit drie delen en bevat verschillende bijlagen met achtergrondinformatie.

Deel A Methodiek, gaat in op de gebruikte methodiek.

- Hoofdstuk 2 beschrijft de onderzochte productietechnieken van waterstof, de beide scenario's en de belangrijkste uitgangspunten.
- Hoofdstuk 3 presenteert de gevolgde methodiek van de multicriteria-analyse.

Deel B Resultaten, beschrijft de verschillende resultaten: de scores op de publieke belangen en de totaalscores.

- Hoofdstuk 4 presenteert per publiek belang de genormaliseerde scores voor de productietechnieken voor beide scenario's.
- Hoofdstuk 5 toont de uitkomsten van de combinatie van de scores op de indicatoren en de weegfactoren. Voor beide scenario's wordt een rangschikking gepresenteerd.

Deel C bevat in Hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

In de bijlagen is de volgende achtergrondinformatie opgenomen:

- Bijlage A beschrijft per productietechniek de verschillende aannames en procesdiagrammen.
- Bijlage B bevat algemene aannames over uitgangspunten die voor meer productietechnieken zijn gebruikt: energieprijzen, prijzen van bijproducten, infrastructuurkosten en overige economische uitgangspunten.
- Bijlage C licht de publieke belangen toe en beschrijft hoe we deze geconcretiseerd hebben en per publiek belang de gebruikte data uit literatuurbronnen.
- Bijlage D bevat de resultaten van de gevoeligheidsanalyses.
- Bijlage E gaat in op de gebruikte normalisatie.
- Bijlage F geeft achtergrond bij de gebruikte VIKOR-methodiek.

VERGELIJKING WATERSTOFPRODUCTIETECHNIEKEN

DEEL A: METHODIEK

HOOFDSTUK 2 WATERSTOFPRODUCTIETECHNIEKEN

Voor dit onderzoek zijn verschillende waterstofproductietechnieken naast elkaar gezet. Samen met de opdrachtgever hebben we hierover keuzes gemaakt die uitmondden in tien verschillende productietechnieken met bijbehorende kenmerken en uitgangspunten en leveringsketens voor twee verschillende scenario's. De geselecteerde productietechnieken, kenmerken, uitgangspunten en scenario's zijn hieronder toegelicht.

2.1 SELECTIE WATERSTOFPRODUCTIETECHNIEKEN

De tien waterstofproductietechnieken kunnen worden verdeeld over vijf categorieën, zie Tabel 1. Binnen de verschillende categorieën zijn meerdere technieken mogelijk. In deze studie zijn er een tot drie technieken per categorie.

Tabel 1: Alternatieven: de vergeleken waterstofproductietechnieken

Categorie	Productietechniek	Icoon	Kenmerken	Uitgangspunt onderzoek
	1. Elektrolyse van water – netstroom (referentie)		Op basis van gemiddelde elektriciteitsmix in 2035	Proton exchange membrane (PEM) en alkali-sche elektrolyse (AEL)
	2. Elektrolyse van water - wind/zon		100% hernieuwbaar	Elektrolyse vindt op land plaats
	3. Vergassing - hout-resten		Biomassa (hout, landbouwafval en organisch afval)	Gekozen voor houtpellets en houtsnippers
	4. Vergassing - afval		Stedelijk (niet-biogeen) afval, met CCS	Niet anders te verwerken huishoudelijk/industriële afval
	5. Vergisting - rioolslib		Anaerobe vergisting van biomassa	Gekozen voor vergisting van rioolslib
	6. Ontleding - water		Thermolyse van water naar waterstof en zuurstof (O ₂)	Met zeerhogetemperatuur (ZHT)-restwarmte uit metallurgische industrie
	7. Ontleding - methaan		Splitsing van fossiel methaan in waterstof en vaste koolstof	Pyrolyse met plasmaproces
	8. Reforming methaan - SMR		Bestaande SMR zonder CCS	Voldoet niet aan eis van 70% koolstofdioxide (CO ₂)-reductie
	9. Reforming methaan - SMR		Bestaande SMR met CCS	Retrofit met CCS
	10. Reforming methaan - ATR		ATR met CCS	Nieuwbouw

Hierna stellen we de waterstofproductietechnieken kort voor. De uitgebreide beschrijvingen, met processchema's en de voor de modellering gehanteerde data, worden gegeven in bijlage A.

Het is belangrijk om op te merken dat de inschatting of een productietechniek in 2035 reëel op voldoende schaal toepasbaar is, in principe geen onderdeel uitmaakte van de selectie vooraf. Bevindingen hierover tijdens het onderzoek, zoals Technology Readiness Level (TRL), vermelden we en nemen we mee in de conclusies.

Elektrolyse van water (netgebonden resp. direct hernieuwbare elektriciteit)

Watelektrolyse is het chemische proces om water te splitsen in waterstof en zuurstof door gebruik van elektriciteit. Hier komt ook warmte bij vrij. Dit gebeurt in elektrolyzers: modulair opgebouwde apparaten die tot zeer grote productie-installaties kunnen worden geschakeld (van kW tot GW). Elektrolyzers kunnen worden aangesloten op het elektriciteitsnet of rechtstreeks verbonden met wind- of zonneparken.

Vergassing van biomassa

De term vergassing verwijst naar de chemische omzetting van vaste of vloeibare stoffen, met behulp van zuurstof, naar een gas. Als grondstof gaan we uit van uit de Baltische staten ingevoerde houtpellets en houtsnippers uit binnenlands bos- en landschapsbeheer. Na voorbehandeling van de biomassa vindt de vergassing in de reactor plaats, waarbij een waterstofrijk gasmengsel (syngas met water en methaansporen) ontstaat. Na zuivering wordt de CO₂ gescheiden van waterstof en afgevangen voor nuttige toepassing.

Vergassing van afval

Vergassing van niet-herbruikbaar of recyclebaar huishoudelijk en industrieel afval (in het vervolg kortweg afval) is een alternatief voor (storten of) verbranden. Dit past in de circulaire economie: afval afbreken tot bruikbare chemicaliën is hoogwaardiger dan energieproductie, zeker als dat met laag rendement gebeurt. Het proces levert waterstof en een CO₂-stroom op die kan worden afgevangen en opgeslagen (CCS). We gaan uit van 94%⁶ afvang van de CO₂. We veronderstellen dat de grondstof volledig uit niet-biogeen afval bestaat.

Vergisting van biomassa

Naast vergassing is vergisting een andere techniek om met biomassa als grondstof waterstof te maken. Bij anaerobe vergisting, ook wel 'dark fermentation' (DF) genoemd, produceren anaerobe micro-organismen waterstof door omzetting van koolhydraatrijke biomassa (zonder licht). We hebben voor de modellering gekozen voor de casus vergisting van rioolslib, een afvalstroom die nu veelal wordt vergist naar biogas en digestaat.

Ontleding van water (thermolyse)

Water ontleeft normaliter bij temperaturen boven 2000 °C in een stap tot waterstof en zuurstof. Door gebruik te maken van meerdere reactiecycli kan water al bij lagere temperaturen worden gesplitst in waterstof en zuurstof. Water ontleeft dan in stappen via een zich herhalende reeks van tussenliggende reacties en met behulp van stoffen die tijdens het proces worden gerecycled. De reactiecycli-techniek is nog experimenteel. We schatten deze in 2035 op TRL 6. Voor de modellering zijn we uitgegaan van reactiecycli met ceriumoxide en van de metallurgische industrie als bron van zeerhogetemperatuur-warmte (1200 °C).

⁶ Hetzelfde afvangpercentage als bij ATR is verondersteld.

Ontleding van methaan (pyrolyse)

Ontleding van methaan, ook wel methaanpyrolyse genoemd, is het chemische proces om waterstof en vast koolstof te vormen door droge splitsing van methaan (bij afwezigheid van water). Er zijn verschillende technieken voor ontleding van methaan op verschillende TRL's, in de hoofd-categorieën thermische, katalytische en plasmareactie. Wij hebben gekozen voor de plasma-route. Deze techniek wordt al commercieel toegepast.⁷ In deze studie is aardgas gekozen voor het proces, maar het kan ook met hernieuwbaar methaan.

Steam methane reforming van aardgas met en zonder CCS

Steam methane reforming (SMR) is het chemische proces om aardgas samen met water (stoom) om te zetten naar waterstof en koolstofmonoxide (CO). De CO wordt vervolgens deels of volledig naar CO₂ omgezet, afhankelijk van de vraag (is er alleen behoefte aan waterstof, of ook aan CO voor chemie?). SMR is de dominante industriële methode voor de huidige productie van fossiele waterstof (TRL 9), ontwikkeld aan het begin van de 20^e eeuw. Het is mogelijk om bestaande of nieuwe SMR-installaties te voorzien van CO₂-afvang ten behoeve van opslag (CCS). Het te behalen afvangpercentage hangt af van de technische uitvoering. Wij hebben bij SMR+CCS gekozen voor de variant waarbij door ondervuring met een deel van de geproduceerde waterstof 70% CO₂ wordt afgevangen.

Autothermal reforming van aardgas met CCS

Net als SMR is autothermische reforming (ATR) een chemisch proces om aardgas samen met water (stoom) om te zetten naar waterstof en CO₂ afhankelijk van de vraag (is er alleen behoefte aan waterstof, of ook aan CO voor chemie?). Deze studie gaat uit van maximale waterstofopbrengst. Een belangrijk verschil ten opzichte van SMR is het gebruik van zuurstof bij ATR. De reactie levert waterstofrijk syngas op, dat wordt gescheiden in waterstof en een CO₂-stroom die door de zuiverheid efficiënt kan worden afgevangen en opgeslagen (CCS). We gaan uit van 94% afvang van de CO₂.⁸

2.2 VERGELIJKING

2.2.1 Vergelijking van productietechnieken

In principe vergelijken we de effecten van verschillende productietechnieken per geproduceerde kilogram waterstof. Dit is correct als het gaat om extra waterstofproductie en niet om een kosten-batenvergelijking van een verduurzamingsproject van een bestaande faciliteit of proces.

We gaan bij de vergelijking uit van aanvullende waterstofproductie, niet om vervanging van bestaande productie. In het geval van SMR en SMR met CCS hebben we op grond van overleg met stakeholders gekozen voor vergelijking op basis van bestaande productie en retrofit met CO₂-afvang. SMR zonder CCS haalt de Europees bepaalde 70% CO₂-reductiedrempel niet, en nieuwbouw zal daarom niet plaatsvinden. Retrofit van bestaande SMR met CCS is wel meegenomen; dit kan de 70%-drempel halen als hier in het ontwerp rekening mee wordt gehouden. Een nieuw te bouwen SMR, die om te voldoen aan CO₂-reductie-eisen met CCS zou worden uitgerust, valt buiten de scope van deze studie.

⁷ Monolith heeft in de VS een grote operationele installatie. In Nederland werkt de firma Thoriant aan deze techniek (spin-off van TNO, Universiteit Maastricht en Brightsite).

⁸ Bron: Hydrogen Europe (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways. Report 2024.*

Acht van de tien onderzochte waterstofproductietechnieken vermeld in Tabel 1 gebruiken een breed verkrijgbare grondstof (commodity), terwijl de overige twee, afvalvergassing en vergisting van rioolslib, gebruik maken van een te contracteren afvalstroom. Die afvalstroom wordt nu ook verwerkt voor andere doeleinden, maar de route naar waterstof biedt mogelijk maatschappelijke voordelen ten opzichte van de huidige verwerking. Voor afvalvergassing en vergisting van rioolslib noemen we de huidige verwerking van de afvalstroom het nulalternatief.

Nulalternatieven voor afvalvergassing en vergisting van rioolslib

Het niet meenemen van het nulalternatief voor deze productietechnieken betekent een risico voor onjuiste scores. Daarom maken we een vergelijking op hoofdlijnen ten opzichte van het nulalternatief als gevoeligheidsanalyse. Een volledige vergelijking van deze twee productietechnieken ten opzichte van het nulalternatief past niet binnen deze studie.

Het nulalternatief in het geval van afvalvergassing is dat afval wordt verbrand in een afvalverbrandingsinstallatie (AVI) waarbij de CO₂ wordt geëmitteerd naar de lucht. Op termijn zullen AVI's overigens ook CCS of carbon capture and use (CCU) gaan toepassen.⁹ Met de warmte van de verbranding wordt stoom en daarmee elektriciteit opgewekt. Het rendement van AVI's is rond de 20% afval naar elektriciteit en 23% afval naar warmte.¹⁰

Het nulalternatief in het geval van rioolslibvergisting is het gebruik van rioolslib voor de productie van biogas.¹¹ Dit wordt omgezet in elektriciteit en warmte voor eigen lokaal gebruik, en een klein deel wordt na opwerking ingevoed op het net in de vorm van groengas (grotendeels biomethaan). Het resterende slib dat uit de vergistingstoren komt, wordt samengeperst en na transport in een centrale slibverbrander verbrand (zonder CCS).

We vergelijken in een gevoeligheidsanalyse het nulalternatief voor een deel van de publieke belangen. De vergelijking heeft namelijk niet op alle belangen effect en we kunnen voor een deel van de belangen de effecten niet eenvoudig bepalen door complexiteit van de vergelijking en gebrek aan data over de nulalternatieven. Een complete vergelijking met het nulalternatief is wel goed mogelijk bij evaluatie van een specifiek project op een specifieke locatie, waarbij zowel de bestaande als nieuwe situatie gedefinieerd zijn.

2.2.2 Scenario's

De productietechnieken vergelijken we voor twee scenario's, zie Figuur 1.

Scenario 1: industrieclusters is representatief voor de vijf industrieclusters die in 2035 aangesloten zullen zijn op het landelijke waterstofnetwerk. We veronderstellen dat het representatieve cluster aan de kust gelegen is, ook al is dat voor Chemelot niet het geval.¹² Voor invoeding op het landelijke waterstofnetwerk zal een aansluit- en transportvergoeding worden betaald. Druk en zuiverheid van de waterstof moeten voldoen aan de eisen die voor het landelijke waterstofnetwerk gesteld zullen worden. Omdat deze nog niet zijn vastgesteld, gaan we uit van een

⁹ Een aantal AVI's vangt al een (deel van hun) CO₂ af en levert dit aan derden voor hergebruik (carbon capture and utilisation (CCU)).

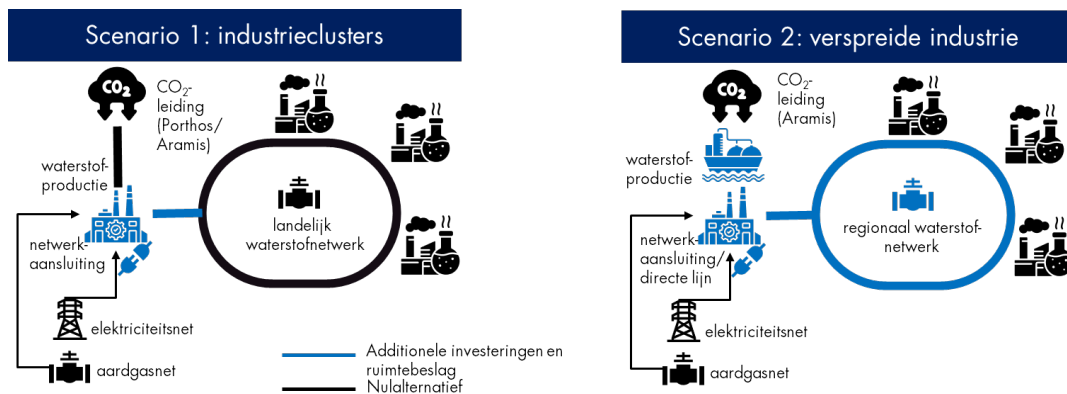
¹⁰ <https://ned.nl/nl/dataportaal/energie-productie/elektriciteit/afvalcentrales>

¹¹ Van de ruim 300 RWZI-locaties hebben er 68 een vergister. Samen verwerken die 90% van de totale hoeveelheid slib, mede door aanvoer van slib van andere RWZI-locaties. (TAUW, 2022).

¹² De verschillen tussen de scenario's en de situatie op Chemelot worden besproken in paragraaf 5.1.3.

druk van 50 bar¹³ en 99,5% zuiverheid.¹⁴ We nemen aan dat in een industriecluster 50% van bijproducten zoals warmte/stoom en zuurstof aan andere industrieën kunnen worden verkocht.

Scenario 2: decentrale industrie is representatief voor industrie die verspreid over Nederland gevestigd is en per 2035 nog niet is aangesloten op het landelijke waterstofnetwerk. Bij de productie van waterstof voor decentrale industrie is de aanleg van een eigen regionaal waterstofnetwerk nodig. We veronderstellen dat in 2035 niet (meer) wordt gekozen voor de levering via de weg, water of spoor. De investeringen en operationele kosten voor het regionale net en het ruimtegebruik nemen we mee in de analyse. Deze investeringen en kosten worden dus niet via een aansluit- en transportvergoeding betaald zoals bij het landelijke waterstofnetwerk in scenario 1. We hebben ons daarbij laten inspireren door de casus Brick Valley.¹⁵ De veronderstelde druk in het regionale waterstofnetwerk is 16 bar, de lengte 50 km en de veronderstelde zuiverheid is gelijk gesteld aan de eisen die we in scenario 1 veronderstellen (99,5% zuiverheid). We nemen aan dat 50% van de bijproducten aan andere gebruikers (industrie, rioolwaterzuiveringsinstallaties, warmtenetten) kunnen worden verkocht. Voor digestaat gaan we uit van 100%. Warmte wordt niet aan de industrie geleverd maar voor een lokaal warmtenet gebruikt.



Figuur 1: Nieuw aan te leggen infrastructuur per scenario: blauw is nieuw, zwart is bestaand.

In deze twee representatieve scenario's houden we geen rekening met uiteenlopende lokale contexten van individuele waterstofproductie-installaties, zoals welke faciliteiten er ter plekke beschikbaar zijn (stoom, opslag voor grondstoffen en energie), of een installatie energie (rest-warmte) en stoffstromen (grond- en hulpstoffen, bijproducten) kan uitwisselen met buurbedrijven, hoeveel ruimte beschikbaar is (fysiek en veiligheids- en milieuruimte)? Dit zijn aspecten die sterk kunnen verschillen en die impact hebben op publieke belangen als Betaalbaar, Betrouwbaar en Veilig. Voor de vergelijking in deze MCA is het niet mogelijk dit te differentiëren.

2.2.3 Volume

We vergelijken de prestaties voor alle productietechnieken per geproduceerde én via het netwerk geleverde hoeveelheid waterstof (in kg of kton). De schaal waarop productie plaatsvindt

¹³ De operationele druk in fase 2 ligt volgens een presentatie van Gasunie tussen de 30 en 50 bar.

¹⁴ Voorlopig advies van Gasunie is een minimale zuiverheid van 98% ([Officiële Bekendmakingen+2](#) Gasunie+2 Officiële Bekendmakingen+2), terwijl marktpartijen pleiten voor minimaal 99,5%. ([Officiële Bekendmakingen+4](#) Officiële Bekendmakingen+4 Hynetwork+4). Europese standaardisatie lijkt zich te richten op 99,5%.

¹⁵ [Website Brick Valley](#).

is voor de waarden per kilogram van invloed. Door schaalgroottevoordelen kunnen bijvoorbeeld de kosten en het ruimtebeslag per kilogram lager zijn. De schaalgrootte zal in een industrieel cluster hoger zijn dan voor decentrale industrie.

Omdat er ook verschillen zijn in de efficiëntie en productie-uren (of vollasturen) voor de onderzochte productietechnieken hebben we een representatieve waterstofproductiecapaciteit (kton/jaar) per scenario geselecteerd: 50 kton/jaar voor scenario 1 en 10 kton/jaar voor scenario 2. Dit is een eerlijkere vergelijking dan eenzelfde schaalgrootte in MW. De referentiejaarproductie (in kton/jaar) bepaalt hoeveel bruto productiecapaciteit (in MW) er per techniek nodig is.

De keuze van 50 kton/jaar voor industrieclusters (ongeveer 380 MW in geval van elektrolyse en 210 MW voor de overige productietechnieken) is samen met de begeleidingscommissie gemaakt op grond van een analyse van productieplannen in de vijf Cluster Energie Strategieën (CES 3.0). Voor de decentrale industrie is samen met de begeleidingscommissie en Stichting Cluster Zes gekozen voor 10 kton/jaar (ongeveer 75 MW in geval van elektrolyse en 40 MW voor de overige productietechnieken). De gebruikte kentallen zijn door schaling in overeenstemming gebracht met de gekozen productieschaal per scenario.

Kanttekeningen bij de scenario's

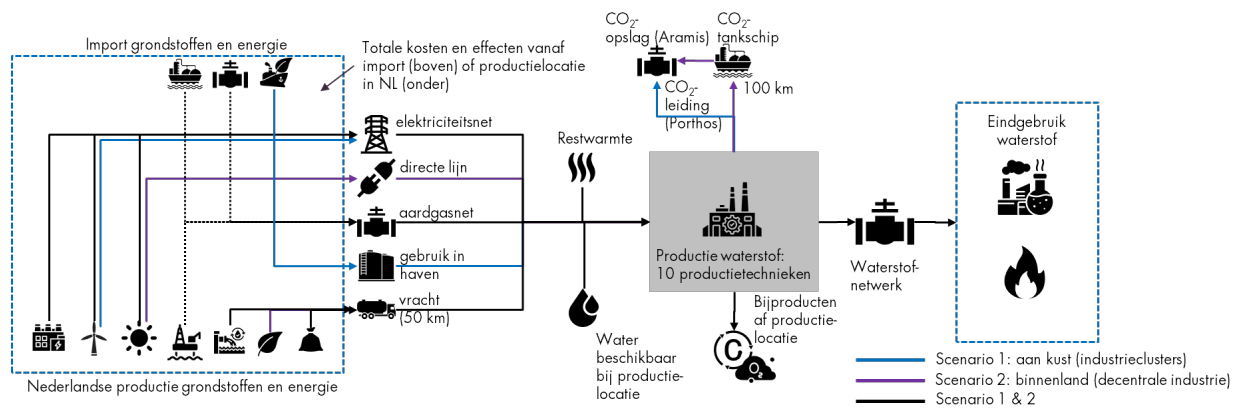
Voor de modellering van de productietechniek SMR is in overleg met de stakeholders besloten uit te gaan van een al bestaande SMR-installatie. Vanwege de eisen voor broeikasgasemissiereductie ligt nieuwbouw van SMR zonder CCS namelijk niet voor de hand. SMR met CCS als nieuwbouw is een potentieel alternatief, maar dit is in deze studie niet onderzocht. Hierdoor zijn SMR en SMR+CCS niet beschouwd als reële productietechnieken voor de decentrale industrie, en zijn ze daarom niet opgenomen in scenario 2.

Tijdens de modellering van de productietechniek rioolslibvergisting is bovendien duidelijk geworden dat er in Nederland onvoldoende rioolslib voorhanden is om het veronderstelde waterstofproductievolume in scenario 1 realistisch mogelijk te maken. Rioolslibvergisting is daarom niet opgenomen in de resultaten van scenario 1.

2.3 UITGANGSPUNTEN VAN MODELLERING

Dit onderzoek focust op de productietechnieken voor waterstof en het transport via buisleiding naar de eindgebruiker. Daarbij nemen we de grondstoffenketens mee, onderscheiden we welke energie uit buitenland en uit Nederland komt en bepalen we wat de totale emissies hiervan in het buitenland en in Nederland zijn. Van links naar rechts toont Figuur 2:

- Grondstoffen en energie, afkomstig uit Nederland of in Nederland ingevoerd,
- Transport van grondstoffen en energie naar de productielocatie,
- Toevoer van restwarmte en water naar de productielocatie,
- De productielocatie zelf,
- Afvoer van waterstof (rechts), bijproducten (onder) en CO₂ (boven),
- Eindgebruik van waterstof in de industrie.



Figuur 2: Scope van de MCA-studie

Wat er binnen de blauwe rechthoeken (links en rechts) gebeurt, is buiten scope van de vergelijking. De uitzonderingen zijn keteneffecten die relevant zijn voor de beoordeling van de productieketenalternatieven in Nederland, zoals de totale kosten, energie-efficiëntie, emissies en de importleveringszekerheid. Er wordt geen opsplitsing naar winning, productie en transport gemaakt.

Tabel 2 vat de uitgangspunten voor de modellering samen. Zie ook Bijlage B.

Tabel 2: Uitgangspunten modellering

Energie	Uitgangspunten
Elektriciteit	Elektriciteitsmix: Nederlandse mix van gascentrale, wind en zon en emissies o.b.v. Klimaat- en Energieverkenning (KEV). In 2035 is 80% hernieuwbaar. Elektriciteit 100% hernieuwbaar uit Nederland (netto geen import): - Scenario 1: wind op zee voor scenario 1 via power purchase agreement (PPA) - Scenario 2: zon/wind met directe verbinding aangevuld met een PPA via netaansluiting
Aardgas	Aardgas: in 2035 15% eigen productie (KEV 2024-prognose 2035 is 14%), 20% groengasbijmenging, rest import per buisleiding vanuit Noorwegen en vloeibaar aardgas (LNG) uit Verenigde Staten. Aanname: hoogcalorisch gas via aardgasnet.
(Rest)warmte	(Rest)warmte: afkomstig uit directe omgeving – geen transportafstand maar levering bij installatie.
Grondstoffen	Uitgangspunten
Biomassa	Biomassa voor vergassing: - Scenario 1: houtpellets afkomstig uit Baltische staten en vervoerd via kustvaart (3000 km) - Scenario 2: houtsnippers afkomstig uit omgeving decentrale industrie en vervoerd via weg (gemiddeld 50 km) Biomassa voor vergisting: rioolslib afkomstig uit meerdere rioolwaterzuiveringsinstallaties op gemiddeld 50 km afstand, vervoerd over de weg.
Afval	Afval: afkomstig uit omgeving productielocatie (gemiddeld 50 km) en vervoerd over de weg.
Water	Water is afkomstig uit zoet oppervlaktewater (scenario 2) of zeewater (scenario 1). Het onttrekken van zoet oppervlaktewater veroorzaakt milieueffecten. Brijnproductie als gevolg van zuivering wordt in zee geloosd. Voor scenario 2 betekent dit brijntransport over de weg. Er zijn ook andere waterbronnen mogelijk (effluent, brak oppervlaktewater). Gebruik van andere bronnen kan effect hebben op de scores.
Bijproducten	Uitgangspunten
Fossiele CO ₂	Afgevangen CO₂: - Scenario 1: invoeding via Porthos-netwerk naar Aramis-invoerpunt tegen kosten per ton CO₂. - Scenario 2: transport via binnenvaartschip naar Aramis-zeeleiding. Kosten en emissies van transport apart gemodelleerd, Aramis-opslag tegen kosten per ton.
Koolstofproduct	Prijs af fabriek ¹⁶ – geen transport meegenomen
Aziijnzuur, isoboterzuur, digestaat	Prijs af fabriek – geen transport meegenomen
Warmte (stoom)	Prijs af fabriek – geen transport meegenomen
Zuurstof	Prijs af fabriek – geen transport meegenomen
Biogene CO ₂	Prijs af fabriek – geen transport meegenomen

¹⁶ Dit is de prijs die een fabrikant vraagt voor een product wanneer het de fabriek verlaat. Dit betekent dat de prijs exclusief transport- en andere kosten is.

Dit hoofdstuk licht de gevolgde aanpak van de multicriteria-analyse toe en de presentatiewijze van de resultaten. Multicriteria-analyses worden op verschillende terreinen waaronder energie-vraagstukken 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. Deze zijn zoveel mogelijk gekwantificeerd, zo mogelijk gemonetariseerd, en in andere gevallen kwalitatief beoordeeld door experts.

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

1. Identificeren van de alternatieven (de te beoordelen productietechnieken en scenario's, zie Hoofdstuk 2),
2. Bepalen van de criteria,
3. Bepalen van de scores van de alternatieven,
4. Normalisatie van de scores op de criteria (de publieke belangen),
5. Weging van de criteria (de publieke belangen),
6. Rangschikking van de alternatieven op de totaalscore en maat voor de publieke waarde,
7. Gevoeligheidsanalyse.

De eerste stap is in het vorige hoofdstuk 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.

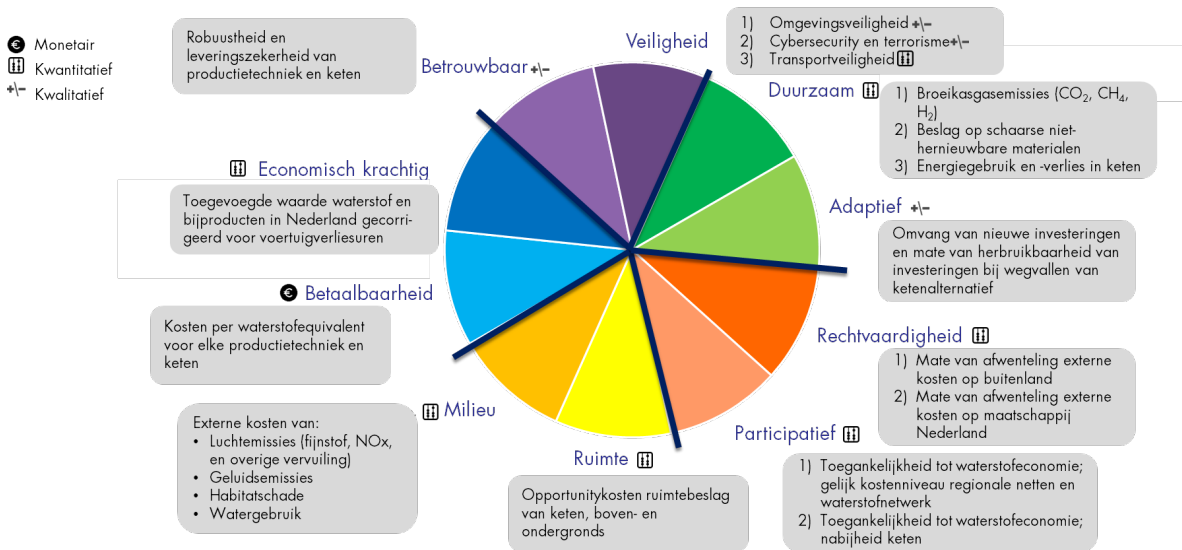
3.1 BEPALEN VAN DE CRITERIA

De criteria in de MCA zijn de publieke belangen zoals gehanteerd in het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE)¹⁷:

- Betaalbaar
- Economisch krachtig
- Betrouwbaar
- Veilig
- Duurzaam
- Rechtvaardig
- Participatief
- Ruimte
- Milieu

¹⁷ Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2023), Nationaal Plan Energiesysteem.

Een publiek belang dat in het NPE ontbreekt, is Adaptief. Wij hebben dit als extra publiek belang toegevoegd. Adaptiviteit is relevant vanwege de onzekerheid over toekomstige waterstofontwikkelingen.



Figuur 3: Overzicht van 10 publieke belangen en bijbehorende 16 indicatoren

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

Figuur 3 vat de publieke belangen samen. We hanteren hierbij de volgorde uit het NPE, waarbij Adaptief is toegevoegd na Duurzaam en Participatief is gewijzigd in Toegankelijk. Elk publiek belang is concreet gemaakt door het voor dit onderzoek te vertalen naar een of meer indicatoren. Deze zijn opgenomen in Figuur 3 en Tabel 3. Informatie over de concretisering, gebruikte bronnen en uitgangspunten bij de modellering is te vinden in bijlage C.

Tabel 3: Indicatoren per publiek belang (in volgorde NPE)

Publiek belang	Indicatoren
Betaalbaar	Kosten per eenheid waterstof (€ per kton waterstof)
Economisch krachtig	Toegevoegde waarde van waterstof en bijproducten per eenheid waterstof, gecorrigeerd voor de kosten van (vervoers)congestie en maatschappelijke kosten van gebruik van infrastructuur (€ per kton waterstof)
Betrouwbaar	Robuustheid en leveringszekerheid van productietechniek en keten (inclusief grondstoffen, energie en afvoer CO₂) uitgedrukt in betrouwbaarheidsscore (aantal risicopunten)
Veilig	- Omgevingsveiligheid (Potentiële slachtoffers per jaar per kton waterstof) - Cybersecurity en terrorisme (Potentiële slachtoffers per jaar per kton waterstof) - Transportveiligheid (€ per jaar per kton waterstof)
Duurzaam	- Broeikasgasemissies (Kosten van broeikasgasemissies CO₂, methaan (CH₄), lachgas (N₂O) (directe broeikasgassen) en waterstof (H₂) (indirect broeikasgas) per jaar per kton waterstof) - Kritiek materiaalbeslag per eenheid waterstof (Waarde van materiaal in € per kton waterstof) - Energiegebruik/verlies (Megajoule (MJ) per kg waterstof)
Adaptief	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 productietechniek zich niet voldoende ontwikkelt (€ per kton waterstof)
Rechtvaardig	- Mate van afwenteling van externaliteiten op buitenland (kosten van externaliteiten van grondstoffen- en energie-import in € per kton waterstof) gedeeld door importkosten in € per kton waterstof) - Mate van afwenteling van externaliteiten van waterstofproductie op de omgeving in Nederland (kosten van externaliteiten van Nederlandse activiteiten in € per kton waterstof) gedeeld door kosten in Nederland in € per kton waterstof)
Toegankelijk	- Gelijk speelveld qua kosten voor eindgebruikers in beide scenario's (€ per kton waterstof gedeeld door € per kton waterstof in situatie met laagste kosten) - Nabijheid tot keten op bedrijventerreinen (oppervlak bedrijventerreinen met toegang tot betreffende infrastructuur gedeeld door oppervlak bedrijventerreinen in Nederland)
Ruimte	Opportunitetskosten ruimtebeslag additionele infrastructuur in Nederland (waarde in € per kton waterstof)
Milieu	Externe kosten als gevolg van fijnstof- en emissies van stikstofoxiden (NO_x), geluidsemissies, habitatschade, ecotoxiciteit en smogvorming van methaan (€ per jaar per kton waterstof)

3.2 BEPALEN VAN DE SCORES OP DE PUBLIEKE BELANGEN

De score op de publieke belangen is vooral gebaseerd op informatie uit de bestaande literatuur. Witte vlekken zijn 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 (bijvoorbeeld 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.¹⁸ 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 rangschikking zijn, zoals bij omgevingsveiligheid en cyberrisico, of een nieuwe indicator, zoals voor de publieke belangen Adaptief en Betrouwbaar.

3.3 NORMALISATIE VAN DE SCORES OP DE PUBLIEKE BELANGEN

Om de scores per publiek belang ondanks de verschillende eenheden (kilogrammen, ++, euro's) te kunnen combineren tot een totaalscore per keten, worden alle ketens per publiek belang op een nieuwe schaal afgebeeld, die tussen 0 en 1 loopt. Scenario 1 en 2 gebruiken dezelfde normalisatieschaal.¹⁹

Voor de verdeling tussen de 0 (de minimale score) en de 1 (de maximale score) zijn lokale en globale normalisatie mogelijk. Bij lokale normalisatie hangt de beoordeling sterk af van de ketens die beschouwd worden en van hun scores op de individuele publieke belangen. De genormaliseerde scores kunnen sterk veranderen als er een ander alternatief wordt toegevoegd, of als een van de scores van een alternatief verandert. Hierdoor worden vergelijkingen minder inzichtelijk.

Bij *globale normalisatie* speelt dit probleem niet. De scores komen altijd uit op de schaal tussen 0 en 1, en de bandbreedtes tussen minimum en maximum en het effect van de weegfactoren blijven gelijk. Dit is een voordeel. We gebruiken daarom zoveel mogelijk deze methode.

Uitdaging is dat het niet altijd mogelijk is de minimale en maximale theoretische waarden eenvoudig te bepalen. Wanneer dit niet mogelijk is, hebben we de (afgeronde) hoogste of laagste score van alle alternatieven in de twee scenario's in deze studie gebruikt.

In Bijlage E staat voor elk publiek belang welke minimum- en maximumwaarde voor normalisatie zijn gebruikt.

3.4 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 een totaalscore.

De opdrachtgever heeft samen met de begeleidingscommissie een set weegfactoren aangeleverd die als basis dienen voor de weging in dit onderzoek, zie Kader 1 en Figuur 4.

¹⁸ 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 te kunnen vergelijken. Bijv. een keten die beslag legt op landbouwgrond waar een buisleiding doorheen loopt en de grond dus nog wel gebruikt kan worden, versus een keten waar vooral ruimtebeslag nodig is op een industrieterrein waar die grond niet tegelijk voor andere doeleinden gebruikt kan worden.

¹⁹ We gebruiken hiervoor een lineaire min-max-normalisatie. Dit is de meest gebruikte aanpak. Andere methoden zijn complexer en worden minder vaak gebruikt.

Kader 1: Toelichting gekozen weegfactoren (bron opdrachtgever)**Weging publieke belangen MCA waterstofproductietechnieken**

De weging van de publieke belangen voor de multicriteria-analyse waterstofproductietechnieken vanuit het beleid is vastgesteld tijdens een consensus-sessie met leden van de begeleidingscommissie. Hierin zijn vertegenwoordigd het beleidsdepartement van Klimaat en Groene Groei, het beleidsdepartement van Infrastructuur en Waterstaat en van Rijksdienst van Ondernemend Nederland. De leden werken aan de volgende dossiers: verduurzaming van de industrie via de waterstofroute; hernieuwbare en koolstofarme waterstof; waterstof in het energiesysteem; cluster 6; biograndstoffen; en afvalstoffen. Er is dus sprake van een evenwichtige afspiegeling van het toepassingsgebied van deze MCA.

Het doel van de MCA is om de waterstofproductietechnieken in kaart te brengen die de industrie in de komende circa tien jaar meer handelingsperspectief biedt om te verduurzamen, door het bestaande grijze waterstofgebruik te verduurzamen, of door de overstap te maken van aardgas naar hernieuwbare of koolstofarme waterstof om de processen te verduurzamen, met name waar elektrificatie geen optie is. Met verduurzamen wordt in deze context met name het reduceren van broeikasgasemissies bedoeld om de klimaatdoelen te behalen. Daarom krijgen de publieke belangen Betaalbaar en Duurzaam relatief hoge weegfactoren.

Ook het publiek belang Betrouwbaar krijgt een bovengemiddelde weegfactor. Leveringszekerheid van waterstof is essentieel, wat betekent dat de productietechnieken zich rond 2035 bewezen moeten hebben en dat inputstromen een hoge betrouwbaarheid (beschikbaarheid) moeten hebben. Hoewel toegang tot waterstof-(infrastructuur) essentieel is, krijgt het publieke belang Toegankelijkheid een relatief lage weegfactor. Reden hiervoor is dat de waterstofproductietechnieken in de gekozen scenario's op dit punt niet zeer onderscheidend zullen zijn.

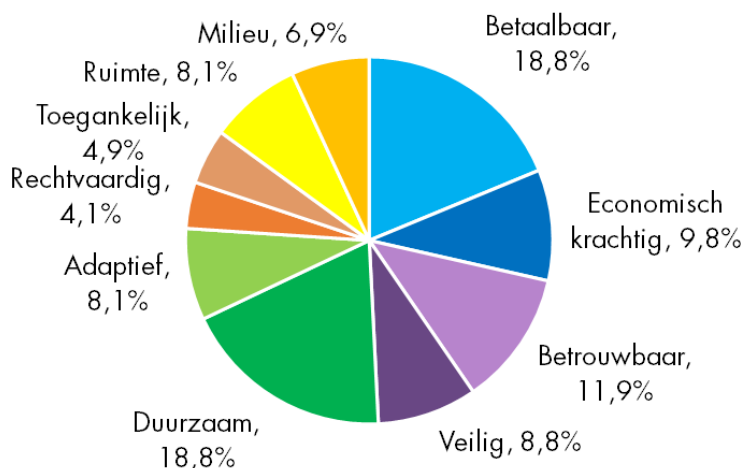
Voor wat betreft het publiek belang Economisch krachtig wordt onderkend dat de waterstofproductiemethode behoort bij te dragen aan het verdienvermogen van Nederland en het creëren van toegevoegde waarde of het verhogen van de productiviteit. Hierbij speelt enerzijds het behoud van de Nederlandse industrie – waarmee een sterk verband is met het publiek belang Betaalbaar – en anderzijds de kansen voor de Nederlandse waterstofmaakindustrie als toeleverancier van technologie, systemen en componenten. Dit laatste is niet specifiek onderdeel van deze MCA. Per saldo krijgt het publiek belang Economisch krachtig een gemiddelde weegfactor.

Betreffende het publiek belang Adaptief wordt onderkend dat bepaalde waterstofproductietechnieken kunnen leiden tot gestrande activa. Hier wordt een belangrijke rol toegedicht aan de investeerder om dit in zijn risicoanalyse mee te wegen. Vanuit duurzaamheid in de breedte, is het wenselijk dat activa zo veel mogelijk kunnen worden (her)gebruikt bij veranderde marktomstandigheden. In totaliteit krijgt het publieke belang Adaptief een weegfactor iets onder het gemiddelde.

Het is evident dat de waterstofproductietechnieken aan de vigerende wet- en regelgeving moeten voldoen voor wat betreft veiligheid, gezondheid en milieu en daarmee aan de kwaliteit van de leefomgeving. Oftewel, het kunnen voldoen aan wet- en regelgeving is een randvoorwaarde voor de 'licence to operate'. Om deze reden krijgen in de context van deze MCA de publieke belangen Milieu en Veilig relatief lage weegfactoren. Hierbij wordt opgemerkt dat 'cyber security' een steeds signifikanter veiligheidsaspect wordt, waarmee wet- en regelgeving gelijke tred behoort te houden.

Evenzo wordt onderkend dat ruimte in Nederland schaars is. Er lopen verschillende trajecten op het gebied van ruimte waarmee al richting wordt gegeven aan welke activiteiten op welke locaties mogelijk zijn en waar (ondergrondse) infrastructuur kan worden gerealiseerd. Om deze reden krijgt het publieke belang Ruimte ook een weegfactor onder het gemiddelde.

Het publieke belang Rechtvaardig krijgt de laagste weegfactor. Aan dit concept zitten vele kanten: kosten die de overheid maakt versus het principe van de vervuiler betaalt; herkomst van de grondstoffen en de lokale impact van winning en productie ervan; de effecten op toekomstige generaties voor de keuzes die nu worden gemaakt. Omdat er verscheidene kanten aan zitten, hebben de leden van de begeleidingscommissie hier een lage weging aan gegeven.



Figuur 4: Gebruikte weegfactoren baseline (bron opdrachtgever)

3.5 RANGSCHIKKING VAN DE ALTERNATIEVEN

Een eenvoudige multicriteria-analyse combineert de scores op de publieke belangen met de weegfactoren tot een totaalscore. 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 ketens te ordenen op grond van afnemende Nutsscores. De keten met de hoogste Nutsscore verdient de voorkeur, de keten met de op een na hoogste Nutsscore volgt daarna, enzovoorts.

In een dergelijke aanpak wordt alleen gekeken naar de hoogste Nutsscore en niet of een keten wellicht op een publiek belang heel slecht presteert. 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 allerlaagste 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*²⁰ bepaalt de aantrekkelijkheid van een keten 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. In bijlage F is meer informatie te vinden over de VIKOR-methodiek en een getallenvoorbeeld.

3.6 GEVOELIGHEIDSANALYSES

Tot slot hebben we een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de robuustheid van de resultaten van de individuele scores en van de totaalscore te bepalen. Het gaat om de volgende gevoeligheidsanalyses:

- Impact leveringszekerheid energie;
- Impact van Nederlandse innovatie op het gebied van reactoren en elektrolyzers;

²⁰ In het Servisch: VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje.

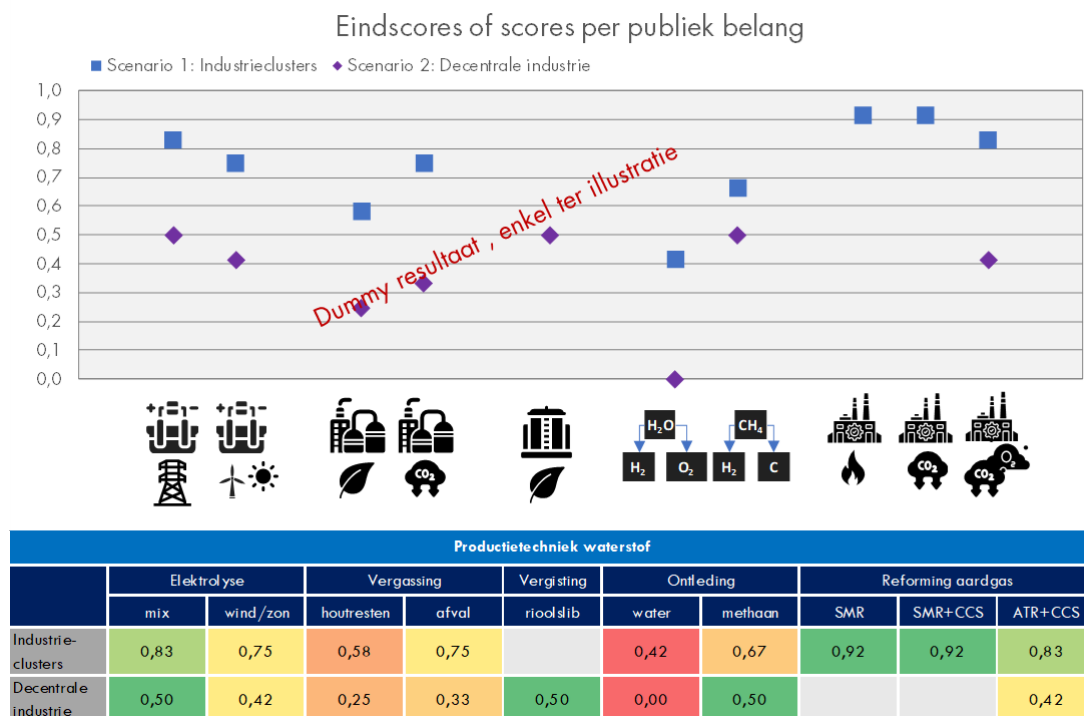
- Impact van gelijke in plaats van gedifferentieerde marktwaarde voor 100% hernieuwbare waterstof (RFNBO), koolstofarme en niet-koolstofarme waterstof;
- Impact van het niet meenemen van het ruimtebeslag van de energie en elektriciteitsopwekking;
- Impact van een kortere lengte van de ringleiding of directe aansluiting in scenario 2;
- Impact van hogere en lagere energieprijzen;
- Impact van een hoger of lager aandeel van de bijproducten dat vermarkt kan worden.
- Impact van vergelijking ten opzichte van het nulalternatief, met name voor afvalvergassing en in beperkte mate voor rioolslibvergisting;
- De gevoeligheid voor verschillende sets weegfactoren, naast de aangeleverde set door de opdrachtgever:
 - een set weegfactoren ontleend aan de MCA waterstofdragers;
 - *gelijke* weging van de publieke belangen (elk publiek belang 10%).

De resultaten van deze analyses zijn opgenomen in bijlage D.

3.7 WIJZE VAN PRESENTATIE RESULTATEN

Er is een compacte weergave nodig om de scores van de tien productietechnieken in een Figuur te tonen. De in de volgende hoofdstukken gebruikte weergave lichten we toe.

Figuur 5 toont als illustratie de resultaten van de industrieclusters (scenario 1) in blauw en de resultaten voor de decentrale industrie (scenario 2) in paars.



Figuur 5: Voorbeeld visualisatie

Op de x-as zijn de tien productietechnieken afgebeeld:

1. elektrolyse met elektriciteitsmix in 2035,
2. elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit wind/zon,
3. vergassing van houtresten (pellets, snippers),

4. vergassing van niet-recyclebaar huishoudelijk/industrieel afval met CCS,
5. vergisting van rioolslib,
6. ontleding van water – thermolyse,
7. ontleding van methaan – pyrolyse,
8. steam methane reforming,
9. steam methane reforming met CCS,
10. autothermal reforming met CCS.

Op de y-as staan de genormaliseerde scores per publiek belang of de totaalscore. De hoogste score (1) is de (in theorie) meest gunstige score. Onder de grafiek is een Tabel toegevoegd van de waarden. De achtergrondkleuren in de Tabel laten zien welke alternatieven de meest gunstige (groen) via minder gunstige (oranje en geel) naar de minst gunstige score (rood) hebben volgens rangschikking. Omdat de kleuren variëren op basis van de rangschikking van de productietechnieken per scenario kunnen ketens met ogenschijnlijk dezelfde score toch een andere kleur krijgen.

VERGELIJKING WATERSTOFPRODUCTIETECHNIEKEN

DEEL B: RESULTATEN

HOOFDSTUK 4 SCORES OP PUBLIEKE BELANGEN

In dit hoofdstuk worden de individuele resultaten op de tien publieke belangen toegelicht en de genormaliseerde scores per publiek belang getoond voor de twee scenario's in 2035. Meer informatie over de achtergronden bij de berekening en de gebruikte data zijn te vinden in bijlagen B en C.

4.1 BETAALBAAR

Figuur 6 toont de genormaliseerde scores voor Betaalbaar van de verschillende productietechnieken in scenario 1 en 2. Hoe hoger de score, hoe lager de kostprijs per kilogram waterstof. De gebruikte bandbreedte is 2 euro (score 1) tot 11 euro (score 0). Let op: dit betekent dat hoe hoger de score is, hoe lager de kostprijs. Per genormaliseerd procentpunt verschil gaat het om 0,09 euro.

Opgemerkt moet worden dat dit geen representatieve marktprijzen zijn maar indicatieve productiekosten, omdat een aantal kostenposten niet is meegenomen, zoals winst en risico-opslag, btw en eventuele locatiespecifieke kosten zoals kosten van veiligheidsvoorzieningen. Het gaat in deze studie om de onderlinge vergelijking en niet om de absolute kosten.

Resultaat en verklaring

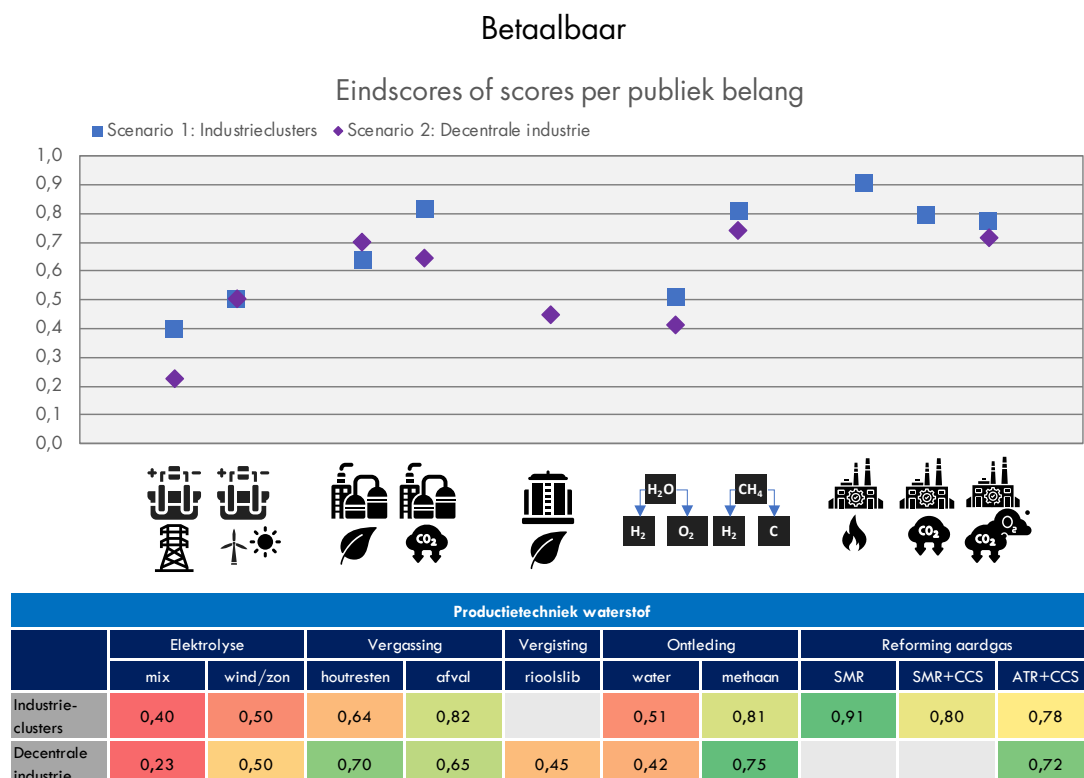
De hoogste score ofwel de laagste kosten hebben de fossiele alternatieven met als eerste in scenario 1 SMR zonder CCS. Daarna volgen door afvalvergassing, methaanontleding, SMR + CCS, en ATR + CCS. In scenario 2 heeft methaanontleding de hoogste score. ATR + CCS, vergassing van houtsnippers en afvalvergassing volgen daarna. De laagste scores ofwel de hoogste kosten hebben elektrolyse, ontleding van water²¹ en vergisting van rioolslib.

Vergassing van regionale houtsnippers (scenario 2) heeft een hogere score dan vergassing van geïmporteerde houtpellets (scenario 1) vanwege de hogere inkoopkosten van geïmporteerde houtpellets ten opzichte van binnenlandse houtsnippers. Rioolslibvergisting heeft hoge kosten, maar ook waardevolle bijproducten (zie Economisch krachtig). Rioolslib is 'gratis' maar heeft door transport en elektriciteitsgebruik hogere kosten. De kosten van elektrolyse bestaan voor een groot deel uit netwerkkosten (2 euro per kg waterstof)²², tenzij gebruik wordt gemaakt van een directe verbinding met duurzame elektriciteitsopwekking (scenario 2). In dat geval kan het aansluitvermogen lager zijn en vallen de kosten lager uit.

²¹ De prijs en beschikbaarheid van zeerhogetemperatuur (ZHT)-warmte is onzeker, net als de efficiëntie van het productieproces op basis van ZHT-warmte in plaats van concentrated solar power (waar de meeste studies vanuit gaan). De kostprijs kan dus nog hoger uitvallen.

²² Bij aansluiting op het EHS-net (verondersteld in scenario 1) liggen de kosten iets lager dan 2 euro per kilogram waterstof, bij aansluiting op het HS-net (verondersteld in scenario 2) liggen de kosten iets boven de 2 euro per kg waterstof. Dit is op basis van huidige netwerkkosten. Toekomstige tarieven zijn heel onzeker. Die kunnen verdubbelen maar ook dalen als er een oplossing komt voor stijgende netwerkkosten.

De kosten van het waterstofnetwerk in scenario 2 zijn bij gebruik van een composietringleiding²³ gunstiger²⁴ qua kosten per kilogram waterstof dan bij gebruik van staal²⁵ zoals in het landelijke waterstofnetwerk.



Figuur 6: Scores waterstofproductietechnieken op Betaalbaar voor scenario 1 en 2

4.2 ECONOMISCH KRACHTIG

De genormaliseerde scores voor het publieke belang Economisch krachtig zijn getoond in Figuur 7 voor de verschillende productietechnieken bij scenario 1 en 2. Hoe hoger de score, hoe hoger de waarde voor Nederland. De genormaliseerde waarde is de toegevoegde waarde van de waterstof en van verkochte bijproducten voor Nederland, gecorrigeerd voor de kosten van (vervoers)congestie²⁶ en publieke infrastructuurkosten. De gebruikte bandbreedte is 0,0 euro (score 0) tot 27,3 euro (score 1) per kilogram waterstof. Per genormaliseerd procentpunt verschil gaat het om 0,27 euro. In de berekening van de toegevoegde waarde is een inschatting gebruikt voor welk deel van de investeringen ten goede komt aan de Nederlandse economie.

²³ Bij de regionale netten gaan we uit van het materiaal RTP: thermoplastische leidingen, doorgaans van polyethyleen (PE), polyamide-11 of PVDF, die versterkt zijn met een hoogwaardige synthetische vezel zoals glas, aramide of koolstof.

²⁴ Bijna 60% lager, 12 ct. in plaats van 27 ct. per kilogram waterstof.

²⁵ X42-staal, compatible met waterstof (JRC1).

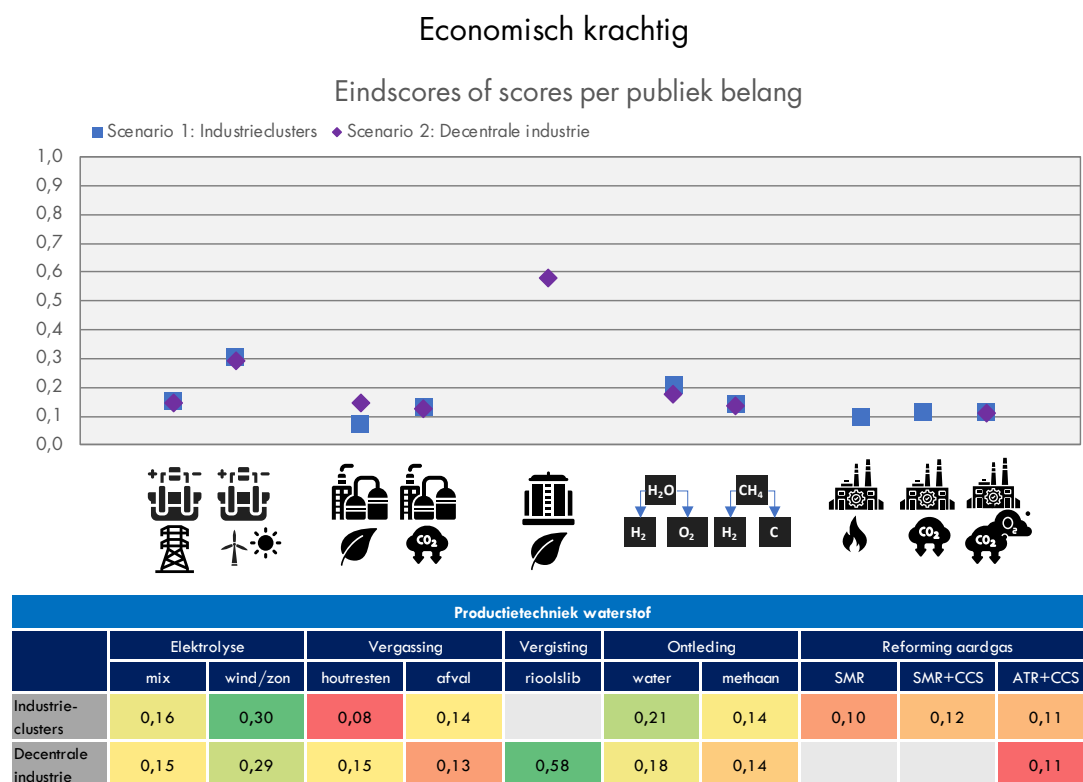
²⁶ Bedoeld wordt congestie op wegen, spoor en wateren, niet op het elektriciteitsnetwerk.

Resultaat en verklaring

Vanwege EU-beleid uitgaande van een veronderstelde marktwaarde van 8 euro per kilogram hernieuwbare waterstof, 4 euro voor koolstofarme waterstof en 3,5 euro voor fossiele waterstof, ligt de waarde voor Economisch krachtig tussen de 2,1 en 15,9 euro per kilogram.²⁷

De hoogste waarde heeft rioolslibvergisting vanwege significante extra opbrengsten uit de bijproducten die vrijkomen bij productie van waterstof. Deze opbrengsten zijn zelfs hoger dan de opbrengsten van de waterstof. Ontleding van water via thermolyse en elektrolyse hebben ook een hogere score vanwege afgegeven restwarmte en zuurstof die deels als bijproduct worden benut.

De Nederlandse toegevoegde waarde op de waterstof is in het algemeen lager dan de marktwaarde doordat een deel van de opbrengsten naar import van kapitaaluitgaven (CAPEX), grondstoffen en energie gaat. Dit geldt voor bijna alle productietechnieken omdat deze houtresten importeren, aardgas gebruiken en ook een deel van de CAPEX wordt verondersteld uit het buitenland te komen. Alleen bij rioolslibvergisting is geen import aangenomen. Door de hogere waarde van CAPEX-import en door de lagere opbrengsten van bijproducten is de toegevoegde waarde in scenario 2 iets lager dan in scenario 1. Bij vergassing van houtresten is productie in de regio juist gunstiger doordat de houtige biomassa uit de omgeving komt en dus niet geïmporteerd wordt.



Figuur 7: Scores waterstofproductietechnieken op Economisch krachtig voor scenario 1 en 2

²⁷ Deze aannames zijn onzeker. Om het effect van de gemaakte keuze te laten zien is een gevoeligheidsanalyse gedaan waarin we voor alle productieroutes dezelfde marktwaarde hebben gekozen.

In beide scenario's veroorzaakt het transport van grondstoffen en energie verlaging van de scores door de maatschappelijke kosten van (vervoers)congestie en het gebruik van het transportsysteem. Deze vallen echter in het niet bij de overige bedragen.

4.3 BETROUWBAAR

De genormaliseerde scores voor Betrouwbaar zijn getoond in Figuur 8. Hoe hoger de score, hoe betrouwbaarder de keten is beoordeeld. Het gaat om een relatieve score. Een keten zonder risico's voor betrouwbaarheid krijgt de score 1. De keten met de meeste risico's krijgt een score van 0 (12 risicopunten). Per genormaliseerd procentpunt verschil gaat het om 0,12 risicopunt.

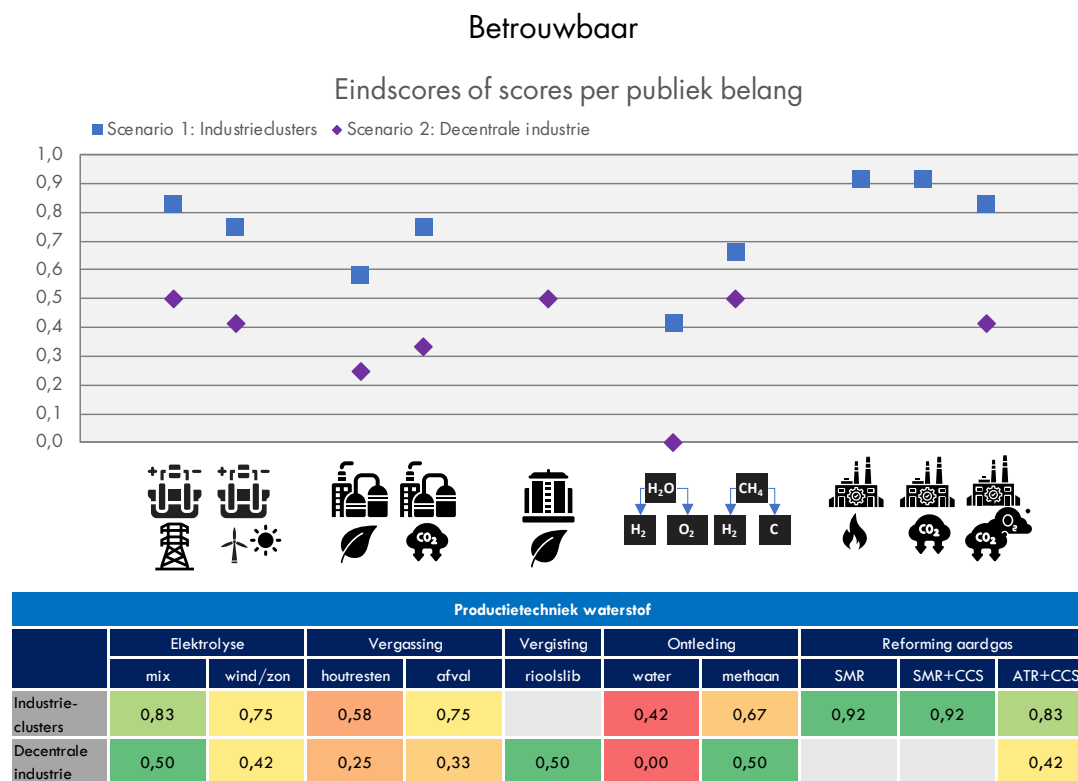
Resultaat en verklaring

SMR heeft in beide scenario's de hoogste score. Dit komt doordat de productietechniek het laagste risico heeft, er geen grondstoffenrisico's zijn verondersteld en ook de energieleveringsrisico's minimaal zijn. Waterontleding heeft de laagste score. Dit komt door hoge productierisico's vanwege de lage TRL, en de wat hogere leveringsrisico's van energie (ZHT-warmte). De risico's voor leveringszekerheid (uitgedrukt in punten) zijn gemiddeld hoger in scenario 2 dan in scenario 1. Redenen zijn:

- De veronderstelde lagere betrouwbaarheid van een regionaal waterstofnetwerk versus het landelijke waterstofnetwerk door het ontbreken van 24/7-monitoring en back-upfaciliteiten voor elektriciteitsvoorziening en waterstofproductie en caveerneopslag.
- Het risico op een innamestop voor oppervlaktewater in het binnenland in tijden van droogte.
- De leveringszekerheid van elektriciteit wordt in scenario 2 minder betrouwbaar verondersteld dan in scenario 1 door meer netcongestie (2 risicopunten vs. 1 risicopunt). Voor 100% hernieuwbare elektriciteit is het leveringszekerheidsrisico nog een punt hoger verondersteld.
- De levering van binnenlandse houtsnippers in scenario 2 is minder betrouwbaar verondersteld dan van import van houtpellets in scenario 1 door beperkte beschikbaarheid, net als de levering van ZHT-warmte.

Het leveringsrisico van waterstof aan afnemers per productietechniek is meestal gelijk voor beide scenario's. Voor houtrestenvergassing en methaanontleding veronderstellen we juist een voordeel (1 punt) in scenario 2 ten opzichte van scenario 1 doordat de techniek op de schaal-grootte in scenario 2 een hogere TRL heeft dan in scenario 1 (naar verwachting in 2035).

Disclaimer: Bij gebrek aan vergelijkende studies die informatie geven over onderdelen die een rol spelen bij Betrouwbaar hebben we een kwalitatieve inschatting gemaakt die is besproken met en aangevuld door stakeholders. Het gaat om relatieve scores. Een twee keer zo hoge score betekent niet dat een alternatief twee keer zo betrouwbaar is, maar dat het betrouwbaarder wordt ingeschat dan een productietechniek die een lagere score heeft.



Figuur 8: Scores waterstofproductietechnieken op Betrouwbaar voor scenario 1 en 2

4.4 VEILIG

In deze paragraaf worden allereerst de samengevoegde resultaten voor het publieke belang Veilig beschreven, zie Figuur 9. Vervolgens worden de resultaten per deelindicator toegelicht: omgevingsveiligheid (niet-opzettelijke calamiteiten), bescherming tegen cyberaanvallen en terrorisme (opzettelijke verstoringen en incidenten) en transportveiligheid.

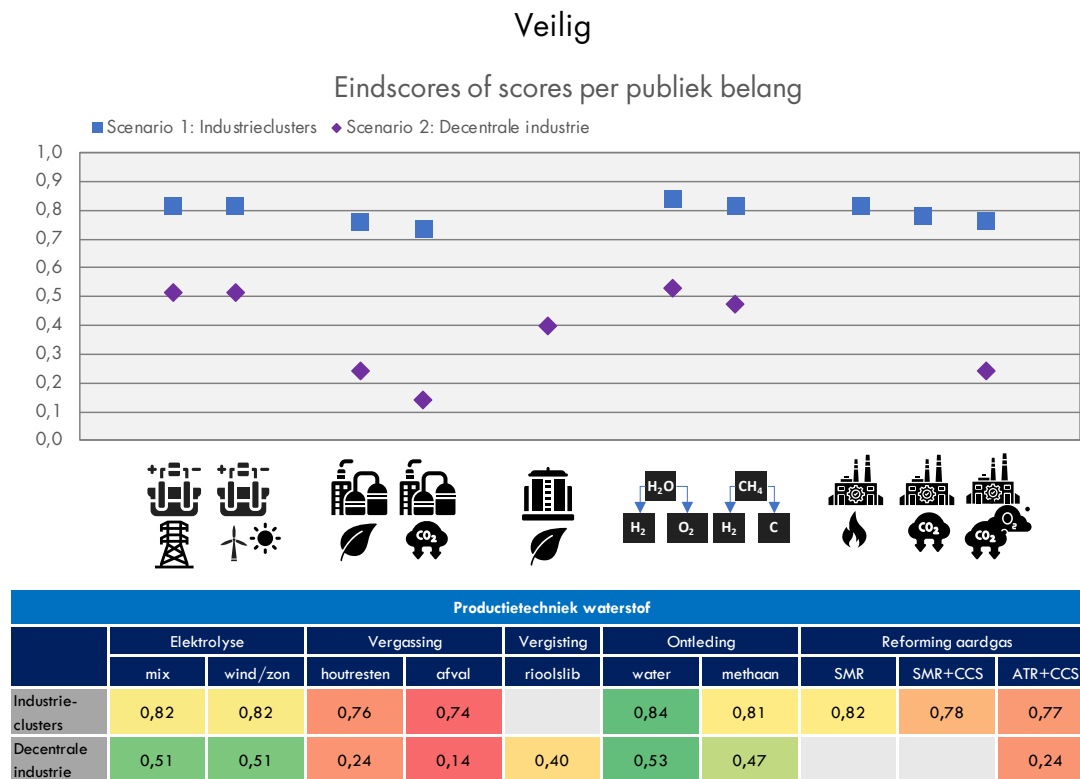
Hoe hoger de score, hoe veiliger de keten is beoordeeld. Het gaat om een relatieve score. De combinatie van de minst veilige beoordelingen per deelindicator krijgt de score 0. Een keten zonder veiligheidsrisico krijgt een score van 1.

Resultaat en verklaring

In scenario 1 hebben veel productietechnieken een vergelijkbare score. De hoogste score heeft waterontleding, maar de andere productietechnieken liggen daar maximaal 10%-punten onder (zie Figuur 9).

De scores in scenario 2 liggen minimaal 31%-punten per kilogram waterstof lager door schaal-nadelen. Dit nadeel wordt groter als er ook sprake is van CO₂-opslag en transport (afvalvergassing en SMR/ATR met CCS) en transportrisico's bij het vervoer van houtsnippers over de weg in plaats van houtpellets per zeeschip (houtrestenvergassing).

Disclaimer: Bij gebrek aan vergelijkende studies die informatie geven over kansen en effecten van incidenten met de onderzochte productietechnieken hebben we op basis van de beperkte bronnen een kwalitatieve inschatting gemaakt die deels is besproken met de stakeholders. Deze inschatting berust op een gedetailleerde en systematische uitwerking. Deze beoordeling heeft grote onzekerheidsmarges.

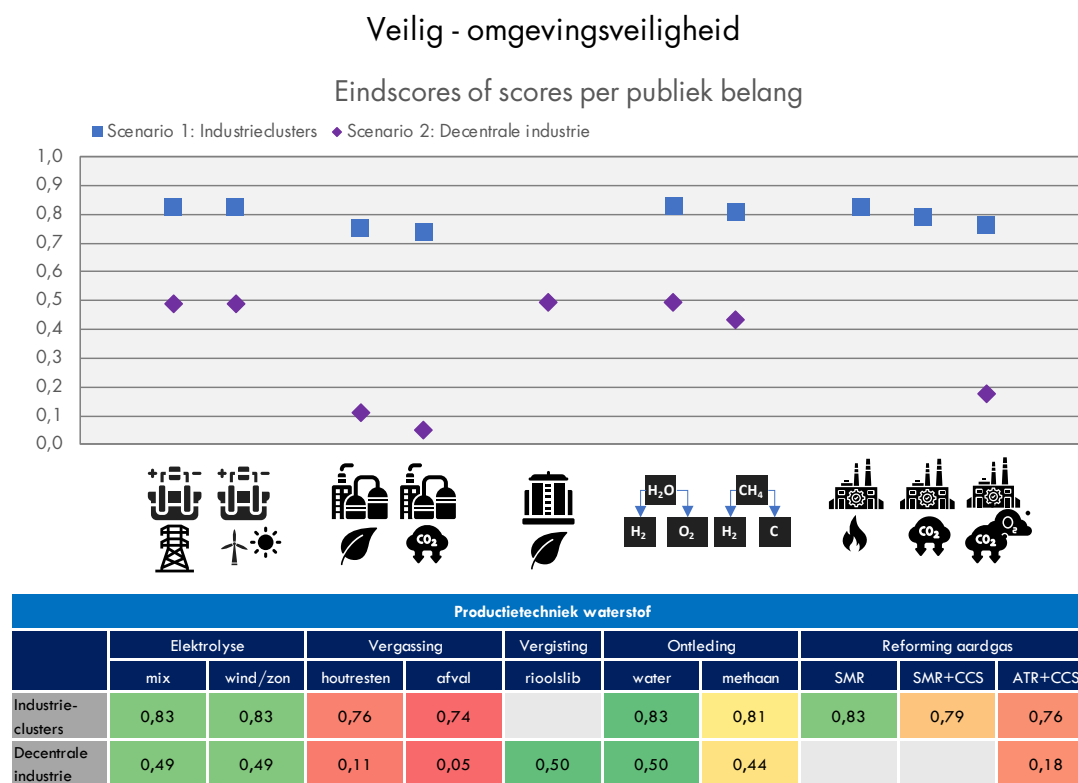


Figuur 9: Scores waterstofproductietechnieken op Veilig voor scenario 1 en 2

Omgevingsveiligheid (deelindicator)

In scenario 1 bepaalt het externe veiligheidsrisico van de productie van waterstof het risico. De totale risico's lopen niet veel uiteen, zie Figuur 10. Waterontleding, SMR en elektrolyse hebben de hoogste scores, maar die zijn niet veel hoger dan voor de andere productietechnieken.

In scenario 2 liggen de risico's per kilogram waterstof hoger doordat het effect bij een incident bij opslag of productie per kilogram waterstof hoger is dan in scenario 1 (nadeel kleinere schaal van scenario 2). Tijdelijke opslag van CO₂ en transport per binnenvaartschip naar het invoerpunt van Aramis veroorzaken ook een (beperkte) toename van het risico, met name in scenario 2 omdat daar vloeibare CO₂ per schip naar het Aramis-invoedingspunt moet worden getransporteerd. De productierisico's zijn echter groter dan de bijdrage van de CO₂-opslag en transport. Bij biomassa- en afvalvergassing veroorzaakt het transport en de opslag van houtsnippers en afval een kleine bijdrage aan het risico in vergelijking met productierisico's van waterstof.



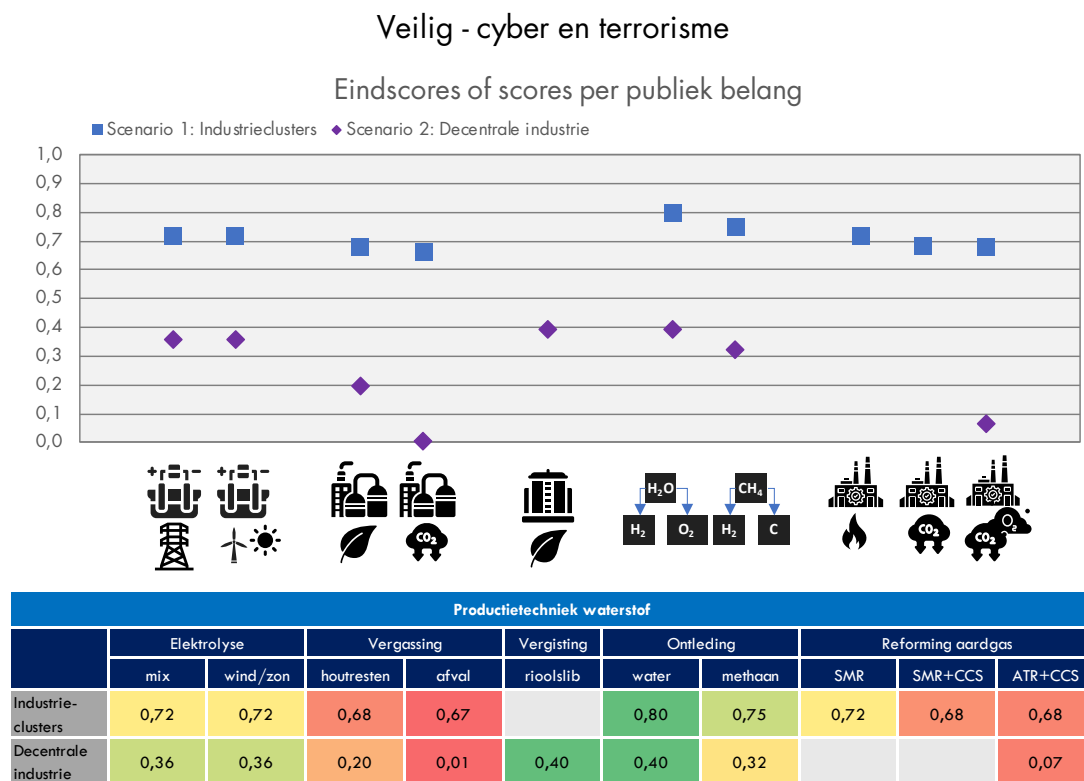
Figuur 10: Scores waterstofproductietechnieken op Omgevingsveiligheid voor scenario 1 en 2

Cybersecurity en terrorisme (deelindicator)

De scores voor de meeste productietechnieken op het gebied van cybersecurity en terrorisme liggen dicht bij elkaar in scenario 1, zie Figuur 11. We veronderstellen op basis van de eerdere uitspraken van experts in de sessie voor de MCA waterstofdragers dat een cyber- of terrorisme-aanval eerder gericht zal zijn op een installatie waarbij meer schade kan worden aangericht dan op een waarbij dat minder het geval is. De productietechnieken met een groot effect bij een niet-opzettelijk omgevingsincident – de vorige deelindicator – hebben om deze reden een hoger risico en een lagere score gekregen dan de productietechnieken waarbij het effect bij een incident lager ligt. Het risico van een aanval op de opslag van houtpellets/houtsnippers en afval en transport over de weg is daarom relatief lager verondersteld dan het risico bij omgevingsveiligheid.

In scenario 2 zijn de risico's per kilogram waterstof hoger doordat het effect bij een incident bij de opslag of productie per kilogram waterstof hoger ligt dan in scenario 1 (nadeel kleinere schaal van scenario 2). De kans dat een aanval gericht is op een kleinere installatie zoals in scenario 2 schatten we half zo groot als in scenario 1. Het totale effect bij een incident is kleiner, een aanval is dus minder interessant, maar het is wellicht wel eenvoudiger om de installatie te benaderen dan in een industrieel cluster.

Ditzelfde geldt voor het regionale waterstofnetwerk. Dit veroorzaakt in scenario 2 ongeveer de helft van het risico. In scenario 1 is het risico van de waterstofleiding beperkt, doordat het alleen om het (additionele) aansluitgedeelte gaat. Het landelijke waterstofnetwerk is ook zonder deze productiefaciliteiten aanwezig, de productie voegt hier geen extra risico toe.



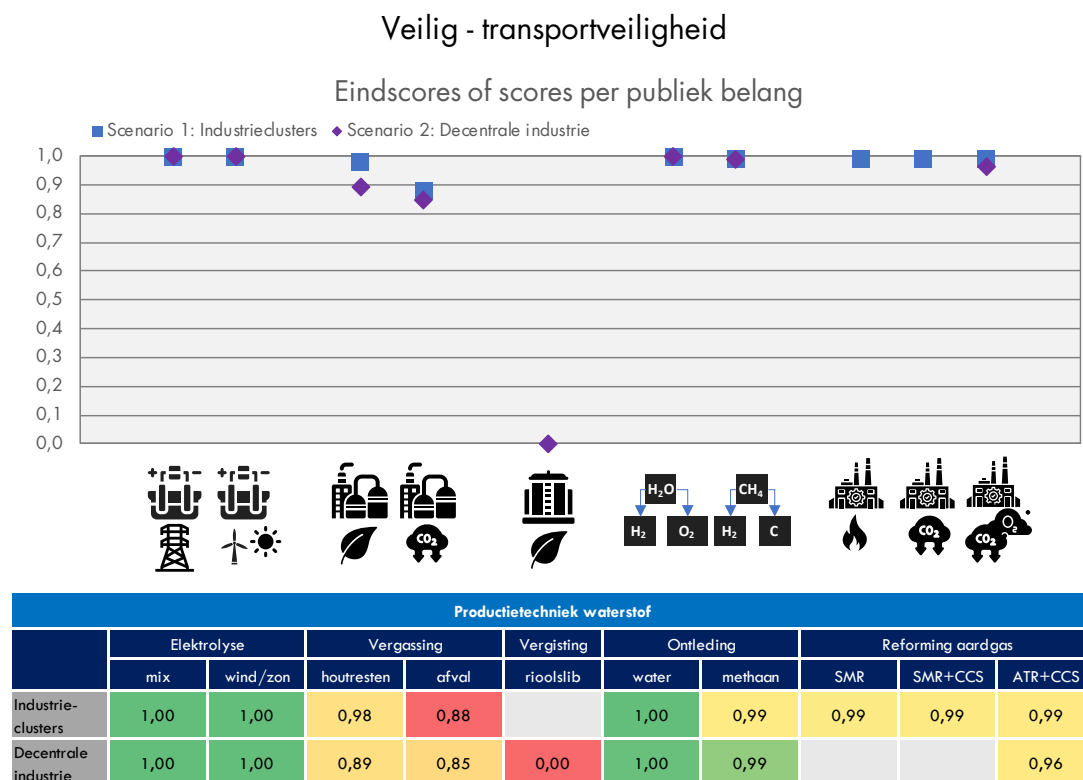
Figuur 11: Scores waterstofproductietechnieken op Cyberveiligheid en terrorisme voor scenario 1 en 2

Transportveiligheid (deelindicator)

Transport over de weg levert hogere risico's op verkeersongevallen op dan transport over water (en ook over spoor, maar spoorvervoer van grondstoffen of producten speelt in deze studie geen rol). Transport van grondstoffen en energie via buisleiding of kabel (elektriciteit) veroorzaakt geen verkeersongevallen en dus ook geen risico's.

De productietechnieken die afhankelijk zijn van de levering van grondstoffen zoals houtresten, afval en rioolslib hebben daarom een lagere score op deze deelindicator, zie Figuur 12. In scenario 2 is bij enkele productietechnieken sprake van afvoer van CO₂ via binnenvaartschip. In die gevallen liggen de scores ook iets lager.

Vanwege de grote hoeveelheden rioolslib die nodig zijn, die grotendeels worden aangevoerd over de weg, en de lage energiedichtheid van het natte rioolslib krijgt rioolslibvergisting de laagste score.



Figuur 12: Scores waterstofproductietechnieken op Transportveiligheid voor scenario 1 en 2

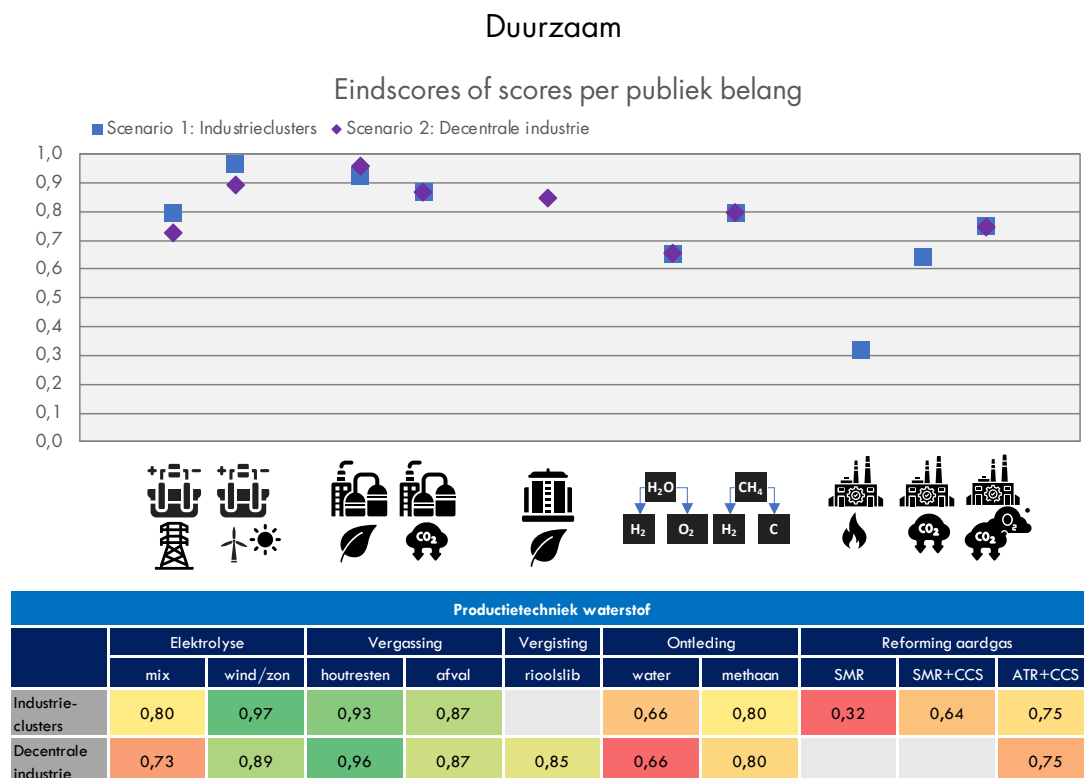
4.5 DUURZAAM

In deze paragraaf worden eerst de samengevoegde resultaten voor het publieke belang Duurzaam beschreven, zie Figuur 13. Vervolgens worden de resultaten per deelindicator toegelicht: broeikasgasemissies, energieverlies en materiaalgebruik.

De score op Duurzaam is een combinatie van drie kwantitatieve scores. De combinatie van de minst duurzame beoordelingen per deelindicator krijgt de score 0. Een theoretische keten die geen kritieke grondstoffen nodig heeft, geen broeikasgasemissies oplevert en geen extra energie vraagt om een kilogram waterstof te produceren krijgt een score van 1.

Resultaat en verklaring

De hoogste score op Duurzaam krijgen elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit en houtrestenvergassing. Dit wordt verklaard door geen tot weinig broeikasgasemissie, een gemiddelde score op energieverlies en geen tot gemiddeld beslag op kritieke materialen. Waterontleding heeft weinig broeikasgasemissie, maar door het hoge energieverlies en materiaalbeslag is de gewogen score relatief laag. SMR heeft de laagste score vanwege de hoge broeikasgasemissie die bij de gebruikte weging niet volledig wordt gecompenseerd door de energie-efficiëntie en het lage materiaalbeslag.



Figuur 13: Scores waterstofproductietechnieken op Duurzaam voor scenario 1 en 2

Broeikasgasemissies (deelindicator)

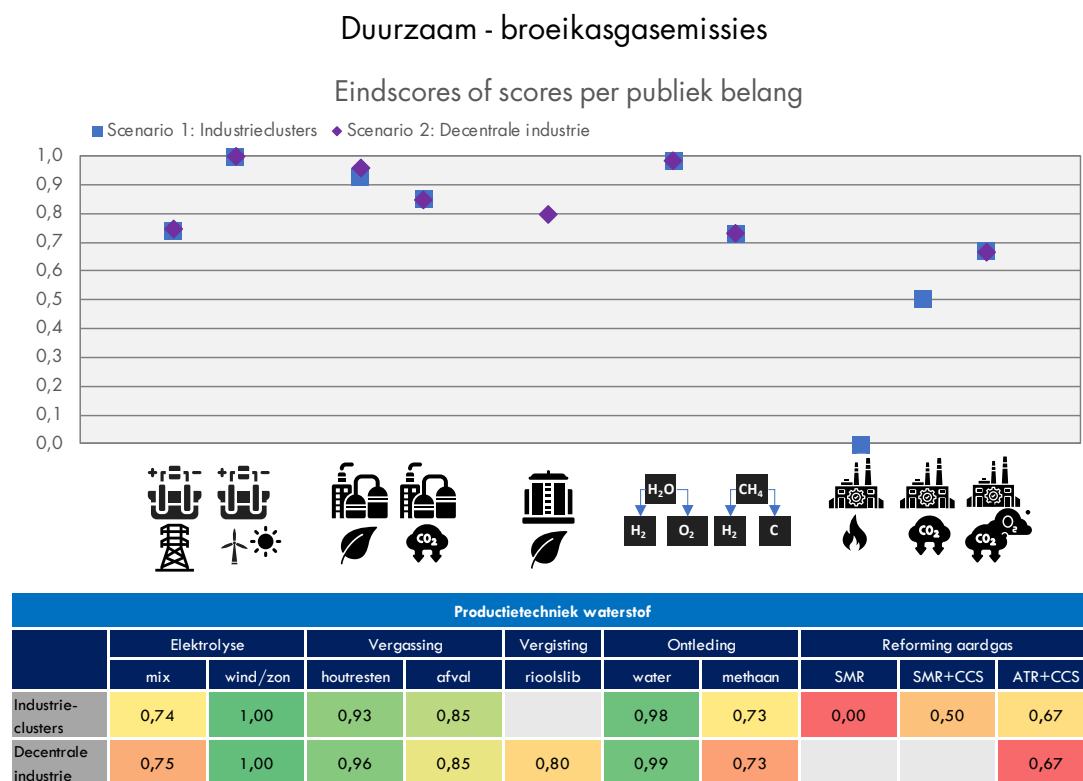
De ketens met de hoogste score op het gebied van broeikasgassen zijn de ketens waarbij tijdens de productie geen (fossiele) CO₂-uitstoot en overige broeikasgasverliezen optreden. Alle CO₂-equivalenten zijn in de berekening aan de productie van waterstof toegerekend, ook indien restwarmte of andere bijproducten nuttig kunnen worden gebruikt.

Transport en elektriciteitsgebruik vanuit het net levert indirecte CO₂-uitstoot op. Doordat elektrolyse met 100% hernieuwbare opwek geen transport van grondstoffen²⁸ nodig heeft en 100% hernieuwbare elektriciteit gebruikt, is de broeikasgasemissie zo goed als nul en krijgt deze productietechniek de hoogste score, zie Figuur 14. Daarna volgt waterontleding vanwege het deels nog fossiele elektriciteitsgebruik. Dan volgen houtrestenvergassing en afvalvergassing, rioolslibvergisting en gevolgd door elektrolyse via netstroom. Vervolgens komen de fossiele ketens vanwege ketenverliezen van methaan en omdat ook bij CCS CO₂-uitstoot optreedt: niet alle CO₂ kan worden afgevangen.²⁹

²⁸ Behalve via leidingen elektrisch verpompt water.

²⁹ Bij SMR+CCS is 70% afvang verondersteld, bij ATR+CCS en afvalvergassing 94%. Het gebruikte aardgas is een mix van 15% Nederlandse offshore winning, 20% groengas, 30% Amerikaanse LNG en 35% Noors gas. Als de groengasbijmengverplichting voor 2035 niet wordt gerealiseerd vallen de scores voor de aardgasgebruikende productietechnieken lager uit vanwege de hogere fossiele emissies.

De scores verschillen nauwelijks tussen de scenario's. Per kilogram waterstof zijn er ongeveer evenveel broeikasgasemissies, behalve bij houtrestenvergassing. Dit is het gevolg van de hogere uitstoot voor het transport van houtpellets uit de Baltische staten ten opzichte van het wegtransport van binnenlandse houtsnippers. Niettemin heeft uitstoot door transport beperkte invloed, mede door de verdere verduurzaming van transport (elektrisch en met schonere brandstoffen). Het elektriciteitsgebruik voor de compressie van waterstof in scenario 1 veroorzaakt in enkele gevallen een fractie lagere score dan in scenario 2. In scenario 2 is de compressiestap voor deze productietechnieken niet nodig.



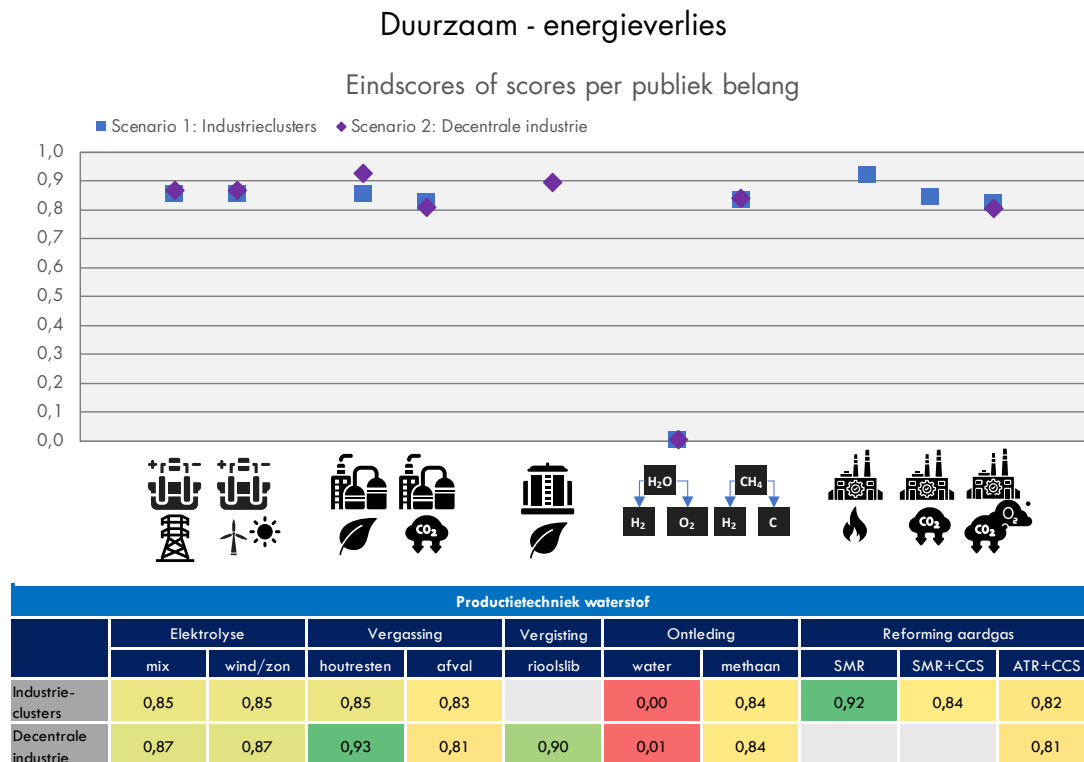
Figuur 14: Scores waterstofproductietechnieken op Broeikasgasemissies voor scenario 1 en 2

Energieverlies (deelindicator)

Het energieverlies voor een kilogram waterstof betreft energie voor de productiestappen, voor transport, het eventueel comprimeren en verliezen door lekkage. In het geval van CCS is er ook energie nodig voor het afvangen en opslaan van CO₂. De energie kan bestaan uit toegevoerde elektriciteit, aardgas of warmte, of uit het gebruik of verlies van de grondstoffen (biomassa, afval, zuurstof). Als het totale energieverlies gelijk is aan de energie-inhoud van een kilogram waterstof dan krijgt de keten een score van 1. Als de laagst mogelijke score is het energiegebruik van waterontleding gebruikt. Er is geen correctie toegepast voor de energie-inhoud van eventuele bijproducten.

De score op energieverlies is gegeven in Figuur 15. Met uitzondering van waterontleding lopen de scores niet heel erg uiteen. Het energieverlies van waterontleding is enkele malen hoger dan van andere productietechnieken. Dit is ZHT-warmte (1200 °C) die in onze casus verondersteld wordt te komen uit de metallurgische industrie (in literatuur veelal uit concentrated solar power of nucleaire hitte).

De meest energie-efficiënte processen zijn SMR en vergassing van houtsnippers (scenario 2) gevolgd door rioolslibvergisting. Daarna volgen de overige productietechnieken, die dicht bij elkaar liggen. Energiegebruik voor het transport van de producten is min of meer verwaarloosbaar.



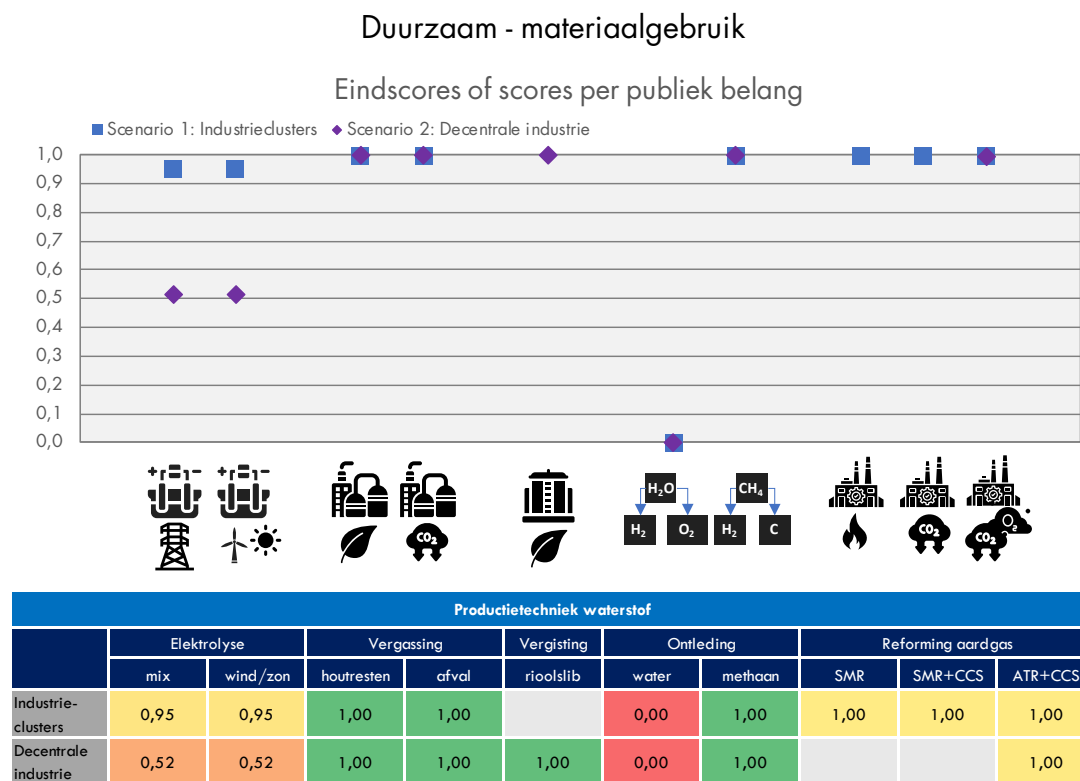
Figuur 15: Scores waterstofproductietechnieken op Energieverlies voor scenario 1 en 2

Materiaalgebruik (deelindicator)

De score voor materiaalgebruik gaat over de omvang van het beslag op kritieke materialen die nodig zijn voor de productie: katalysatoren en eventueel chemicaliën. De score van 1 is gegeven voor ketens die geen beslag leggen op als kritiek aangemerkte materialen. De score van 0 is gegeven aan ketens met het hoogste materiaalbeslag in deze studie.

Waterontleding heeft de laagste score, omdat per kilogram waterstof ongeveer 0,5 kilogram cerium nodig is (als bestanddeel van CeO_2), zie Figuur 16. Het materiaal wordt gerecycled, maar de waterstofproductie legt hier wel beslag op. De waarde hiervan hebben we op ruim 1500 euro per *kiloton* waterstof begroot.

Voor elektrolyse is ook behoefte aan edelmetalen als katalysatoren, waarbij PEM (€ 732 euro per kton) een groter beslag hierop legt (scenario 2) dan AEL (€ 70 per kton) (scenario 1). Het materiaalgebruik van de andere ketens (€ 0 - € 6 per kton waterstof) valt hiertegen weg.



Figuur 16: Scores waterstofproductietechnieken op Materiaalgebruik voor scenario 1 en 2

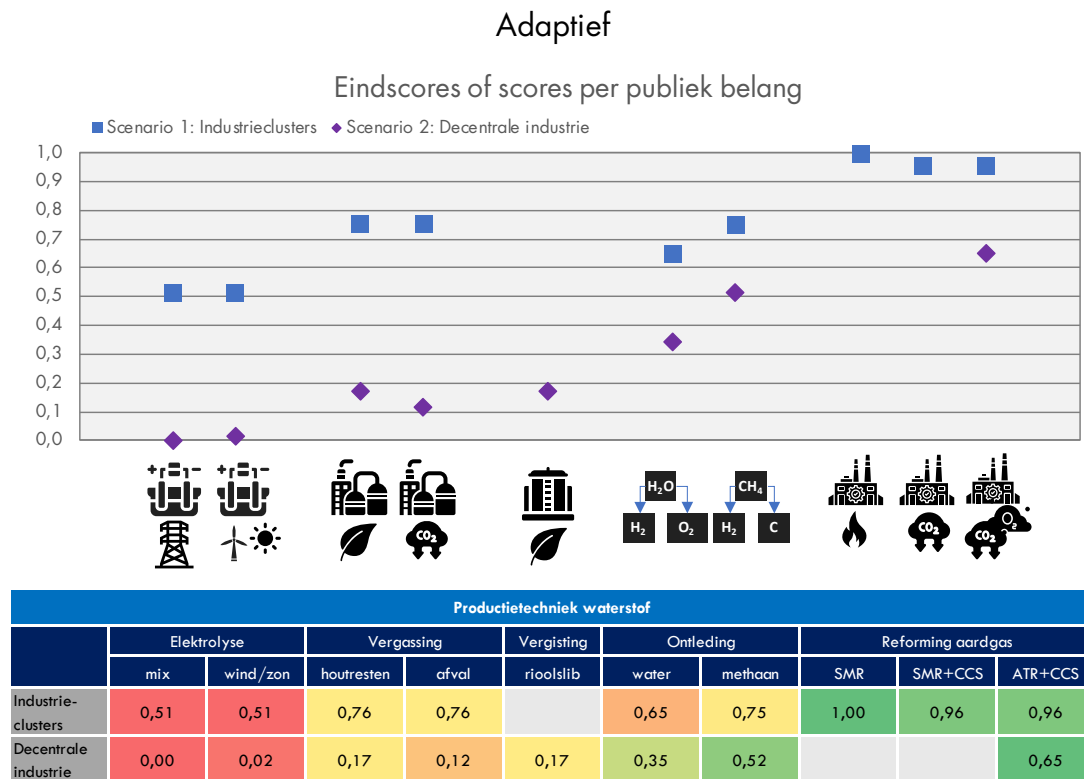
4.6 ADAPTIEF

De genormaliseerde scores voor het publieke belang Adaptief worden getoond in Figuur 17 voor de verschillende productietechnieken. Hoe hoger de score, hoe minder risicovolle investeringen er nodig zijn. De gebruikte bandbreedte is 33 euro (score 0) tot 0 euro (score 1) aan risicovolle investeringen per kilogram waterstof. Risicovol betekent dat investeringen additioneel moeten worden gedaan en dat ze geen andere toepassing hebben.

Resultaat en verklaring

SMR zonder CCS heeft de hoogste score. Dit komt doordat we aannemen dat de SMR faciliteiten er al zijn. Er zijn daarom geen additionele investeringen nodig. ATR en beide vergassings technieken hebben een hoge score in scenario 1 doordat de productiefaciliteit deels herbruikbaar is voor syngasproductie. In scenario 2 liggen de risicovolle investeringen hoger doordat niet alleen geïnvesteerd moet worden in CCS, maar ook in installaties voor het vloeibaar maken, lokale CO₂-opslag en transport van de CO₂. Bovendien nemen we aan dat syngasproductie als terugvaloptie niet realistisch is. De reden is dat er momenteel geen afzetmarkt buiten de industrieclusters voor syngas is en die markt de komende jaren niet wordt verwacht.

De hoogste risicovolle investeringen zijn nodig voor elektrolyse. Dit is het gevolg van de hoge CAPEX van de elektrolyse. De scores zijn lager voor scenario 2 vanwege de schaalnadelen ten opzichte van scenario 1.



Figuur 17: Scores waterstofproductietechnieken op Adaptief voor scenario 1 en 2

4.7 RECHTVAARDIG

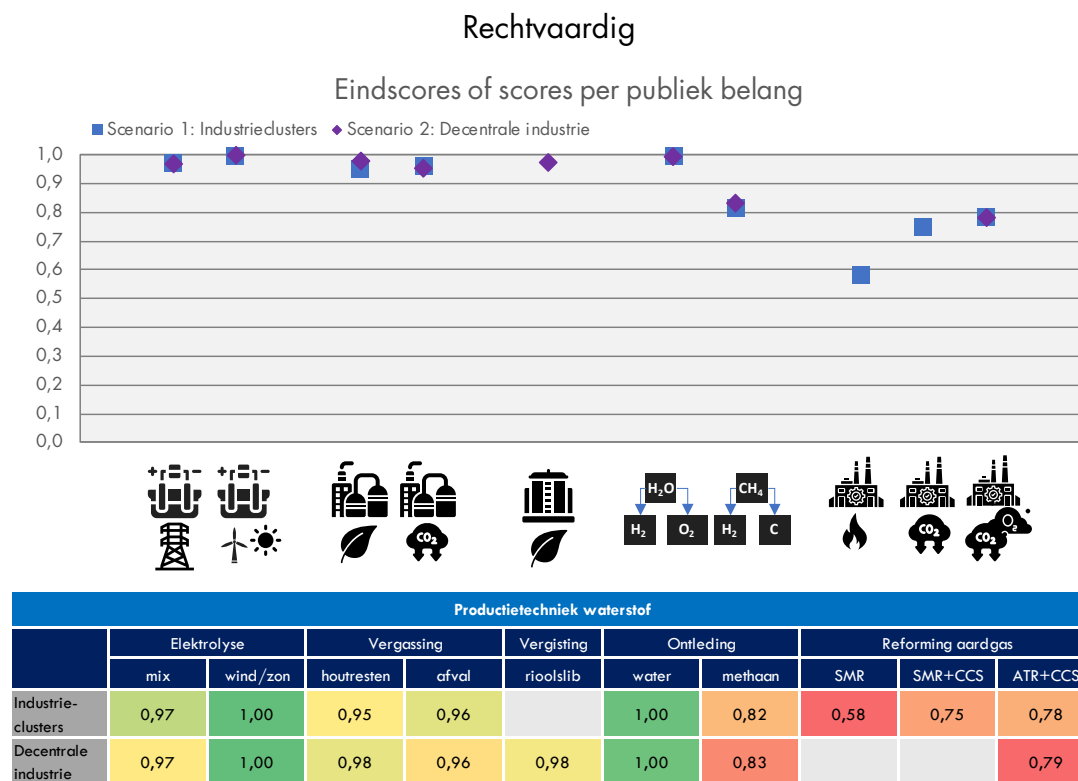
In deze paragraaf worden allereerst de samengevoegde resultaten voor het publieke belang Rechtvaardig beschreven, zie Figuur 18. Vervolgens wordt ingezoomd op de resultaten per deelindicator: rechtvaardigheid richting het buitenland en rechtvaardigheid in het binnenland.

Hoe hoger de score, hoe kleiner het verschil is tussen de *'true price'*³⁰ 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 waarbij de *true price* 2x de werkelijke prijs blijkt te zijn, krijgt de score 0.

Resultaat en verklaring

De hoogste scores hebben elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en waterontleding. De reden is dat er nauwelijks milieubelasting optreedt (alleen brijnafvoer bij waterzuivering) en geen transport van grondstoffen in binnen- of buitenland nodig is. De *true price* is daarom gelijk aan de betaalde kosten. De technieken die gebruik maken van substantiële hoeveelheden aardgas hebben een lagere score. Dit komt door de emissies van methaan en CO₂ in binnen- en buitenland.

³⁰ True price is de marktprijs van een product met daarbij opgeteld de sociale en milieukosten waarvoor niet wordt betaald.

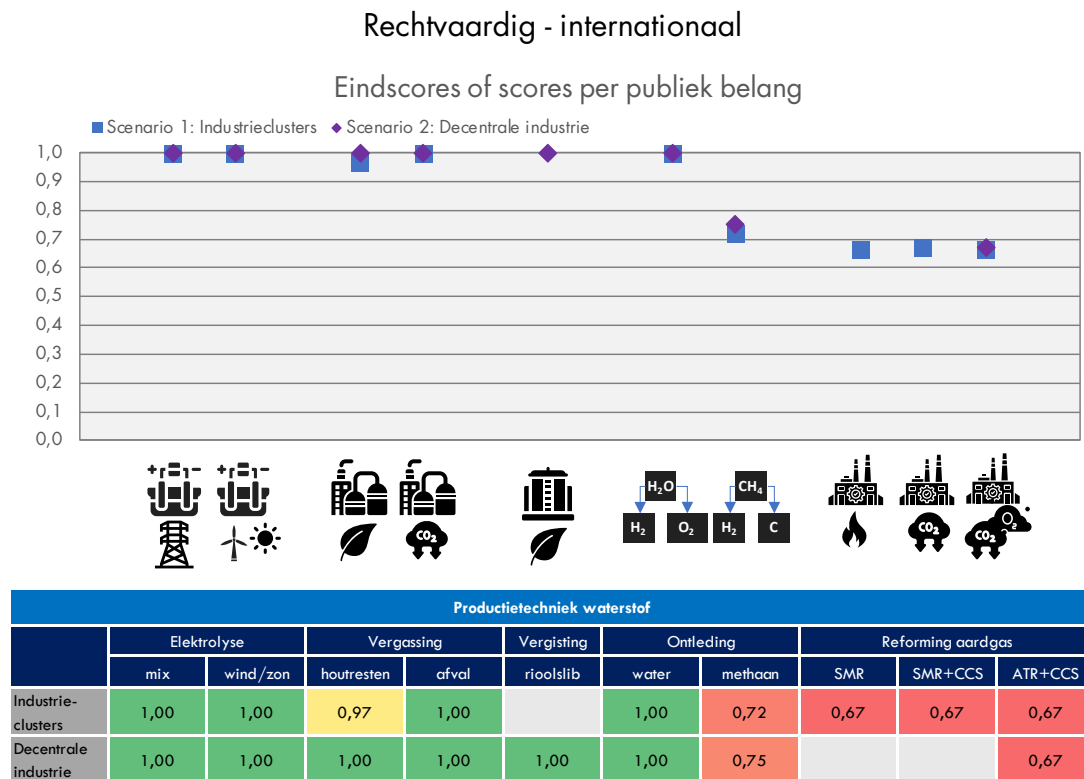


Figuur 18: Scores waterstofproductietechnieken op Rechtvaardig voor scenario 1 en 2

Afwenteling van externe kosten op buitenland (deelindicator)

De hoogste scores hebben productietechnieken waarbij het verschil tussen de *true price* en de berekende kostprijs voor de uit het buitenland afkomstige grondstoffen en energie dicht bij elkaar liggen: dit is het meest rechtvaardig. Productietechnieken waarbij er geen externe kosten op het buitenland worden afgewenteld, omdat er geen import van grondstoffen of energie plaatsvindt, hebben de hoogste score: 1. Gebruik van aardgas levert de laagste score op. Methaan- en CO₂-emissies bij de winning en het transport van het aandeel aardgas (65%) dat geïmporteerd wordt, worden afgewenteld. De score voor SMR ligt niet op nul vanwege de normalisatieschaal waarbij voor de laagst mogelijke score de *true price* 2x de werkelijke prijs is, zie Figuur 19.

Houtrestenvergassing in scenario 1 heeft een iets lagere score dan in scenario 2. Dit is het gevolg van de import van houtpellets (emissies kustvaart). Methaanontleding heeft een iets lagere score in scenario 1 dan in 2, omdat in scenario 2 de investeringen die naar het buitenland vloeien hoger zijn. De verhouding tussen externaliteiten en importuitgaven wordt daardoor gunstiger.

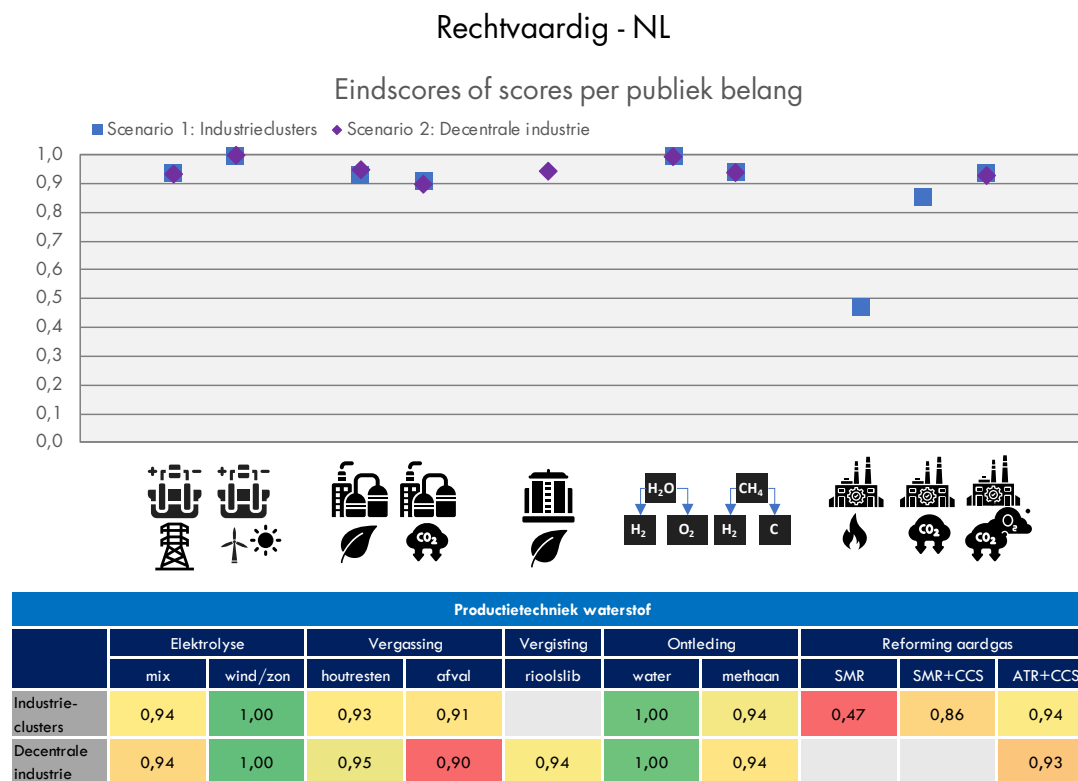


Figuur 19: Scores waterstofproductietechnieken op Afwenteling buitenland voor scenario 1 en 2

Afwenteling van externe kosten in binnenland (deelindicator)

De score op Rechtvaardig voor de omgeving in Nederland wordt bepaald door de activiteiten in Nederland. De hoogste scores hebben productietechnieken waarbij het verschil tussen de *true price* en de berekende kostprijs voor de Nederlandse activiteiten dicht bij elkaar liggen.

De hoogste scores hebben elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit en waterontleding, zie Figuur 20. De reden is dat er nauwelijks verschil is tussen de *true price* en de werkelijke prijs door het ontbreken van CO₂-emissie, milieukosten en transportongevallenrisico's. De laagste score heeft SMR door de hoge CO₂-emissie. De score voor SMR ligt niet op nul vanwege de normalisatieschaal waarbij voor de laagst mogelijke score de *true price* 2x de werkelijke prijs is.



Figuur 20: Scores waterstofproductietechnieken op Afwenteling binnenland voor scenario 1 en 2

4.8 TOEGANKELIJK

In deze paragraaf beschrijven we het samengevoegde resultaat voor het publieke belang Toegankelijk. Vervolgens lichten we de resultaten per deelindicator toe: 1) een toegankelijk of zoveel mogelijk vergelijkbaar kostenniveau ten opzichte van de meest gunstige locatie en 2) de nabijheid van de infrastructuur.

Een keten die voor alle bedrijven toegankelijk is en waarvoor de kosten niet hoger liggen dan de meest gunstige locatie krijgt een score van 1. Een score van 0 krijgt een keten die voor 0% van de bedrijven toegankelijk is en die 50% hogere meerkosten ten opzichte van de meest gunstige locatie heeft.

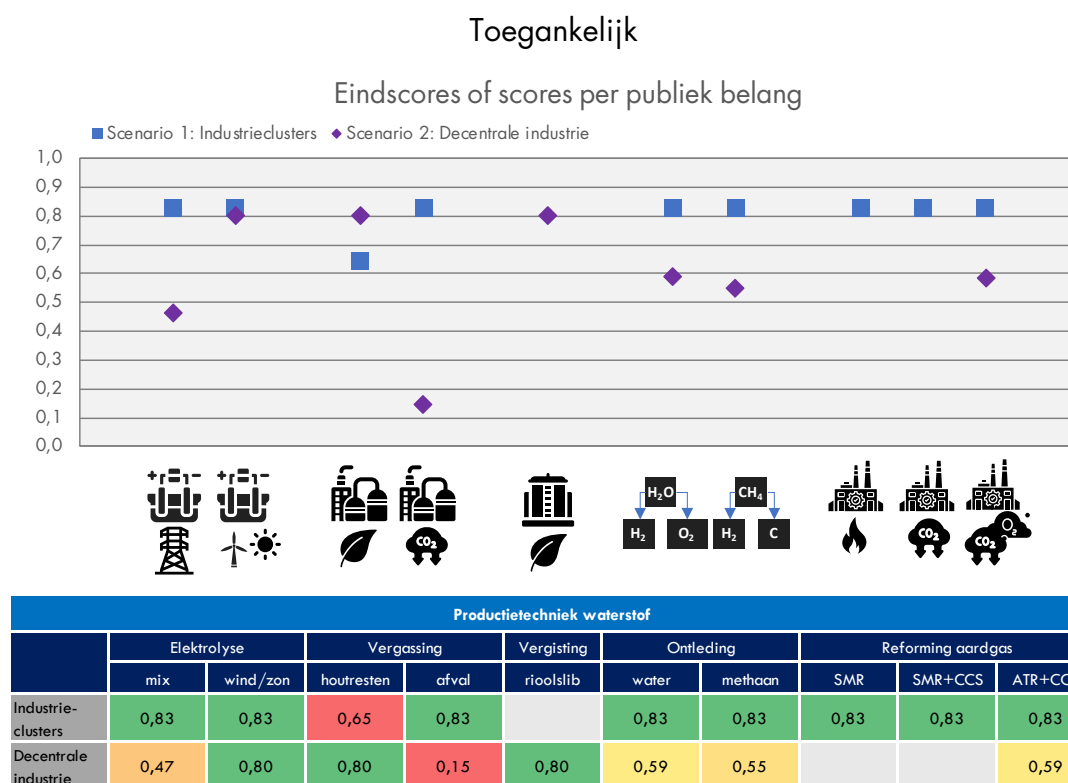
Resultaat en verklaring

Figuur 21 laat het gewogen resultaat zien voor het publieke belang Toegankelijk. Voor de meeste productietechnieken zijn de scores voor scenario 1 gelijk en is de score voor scenario 2 significant lager dan in scenario 1. De lagere score in scenario 2 is het gevolg van zowel een lagere score op nabijheid als een minder toegankelijk kostenniveau in scenario 2 door schaalnadelen qua productie en de nadelen van duurdere opslag van CO₂. Alleen voor elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit liggen de scores voor scenario 1 en 2 bij elkaar. De lagere score op nabijheid voor scenario 2 is het gevolg van de definitie van de indicator. In scenario 2 gaat het om het aantal hectares bedrijventerrein van de decentrale industrie³¹ die afhankelijk is van

³¹ Het aantal hectares bedrijventerrein hebben we ingeschat op basis van de bedrijventerreinen in de gemeenten die vallen onder de 11 concentratiegebieden uit HyRegions. Dit kan een onderschatting zijn.

een regionaal waterstofnetwerk ten opzichte van het totaal aantal hectares bedrijventerrein in Nederland. Omdat de grote industrieclusters in scenario 1, die in 2035 een aansluiting op het landelijke waterstofnetwerk hebben, in totaal meer hectares bevatten, krijgen ze een hogere score dan de decentrale industrie. Met het voorziene landelijke waterstofnetwerk worden meer bedrijven bereikt dan met de voorziene regionale netwerken samen.

Vergassing van houtresten is gunstiger in scenario 2 dan in scenario 1. Dit komt door de hogere kosten voor houtpellets in scenario 1 dan voor houtsnippers in scenario 2. Het kostenverschil hiervan is groter dan het schaalnadeel voor scenario 2. De hoeveelheid houtsnippers die nodig is en de beperkte binnenlandse beschikbaarheid ervan maken de keuze voor de duurdere houtpellets min of meer noodzakelijk bij een productievolume van 50 kton in scenario 1.



Figuur 21: Scores waterstofproductietechnieken op Toegankelijk voor scenario 1 en 2

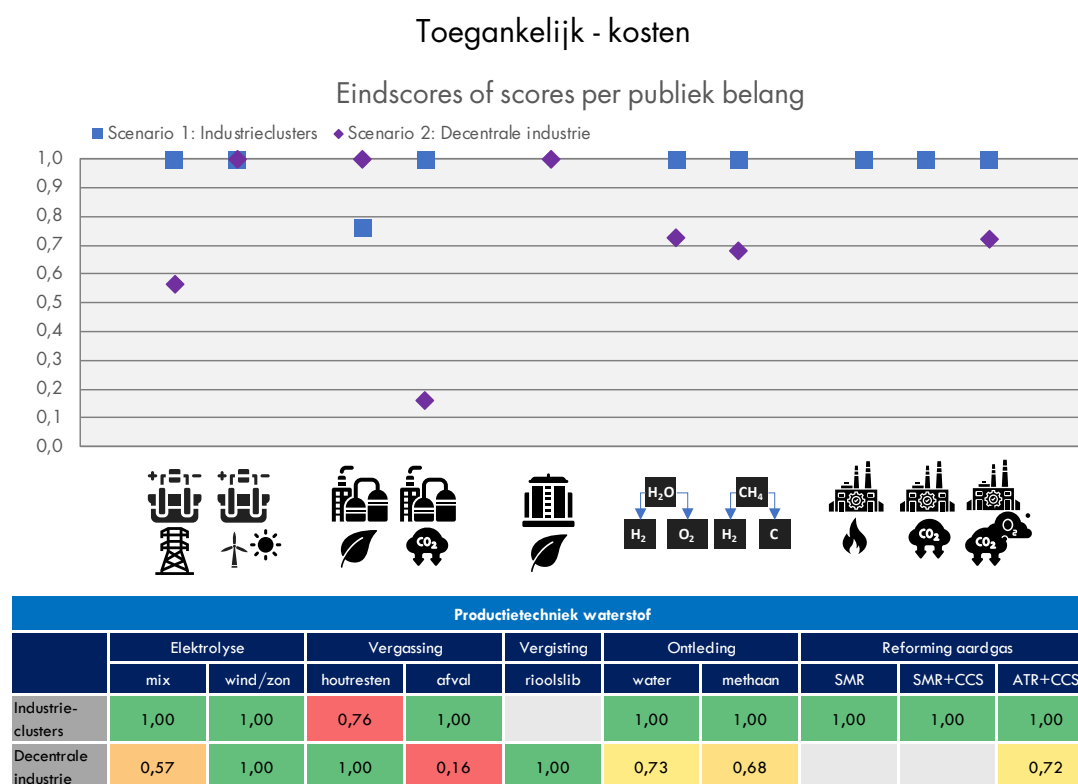
Toegankelijk kostenniveau (gelijk speelveld)

Elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit heeft geen significant verschil in kostenniveau ten opzichte van de meest gunstige locatie voor de productietechniek, zie Figuur 22.

Bij de andere productietechnieken die voor beide scenario's zijn berekend bestaat wel een meer gunstige locatie, nl. productie in scenario 1. Scenario 1 is gunstiger door het grotere schaalniveau waardoor de CAPEX en onderhoudskosten per kilogram waterstof lager uitvallen. Bij elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit is wel sprake van een schaalvoordeel in scenario 1 (lagere CAPEX en onderhoudskosten). Dit voordeel wordt gecompenseerd door de lagere netwerkcosten voor elektriciteit in scenario 2 vanwege de directe aansluiting op een zonne- of windpark.

Naast het schaalnadeel hebben productietechnieken die CCS gebruiken in scenario 2 een groter nadeel vanwege de kosten van het vloeibaar maken en transport van de CO₂ dat niet per buisleiding maar per schip naar de Aramis-opslag wordt vervoerd.

In de vergelijking van vergassing van houtresten komt scenario 2 als meest gunstig naar voren. Dit wordt veroorzaakt door het prijsverschil tussen houtpellets (scenario 1) en houtsnippers (scenario 2). Het prijsverschil is groter dan het schaalnadeel in scenario 2.



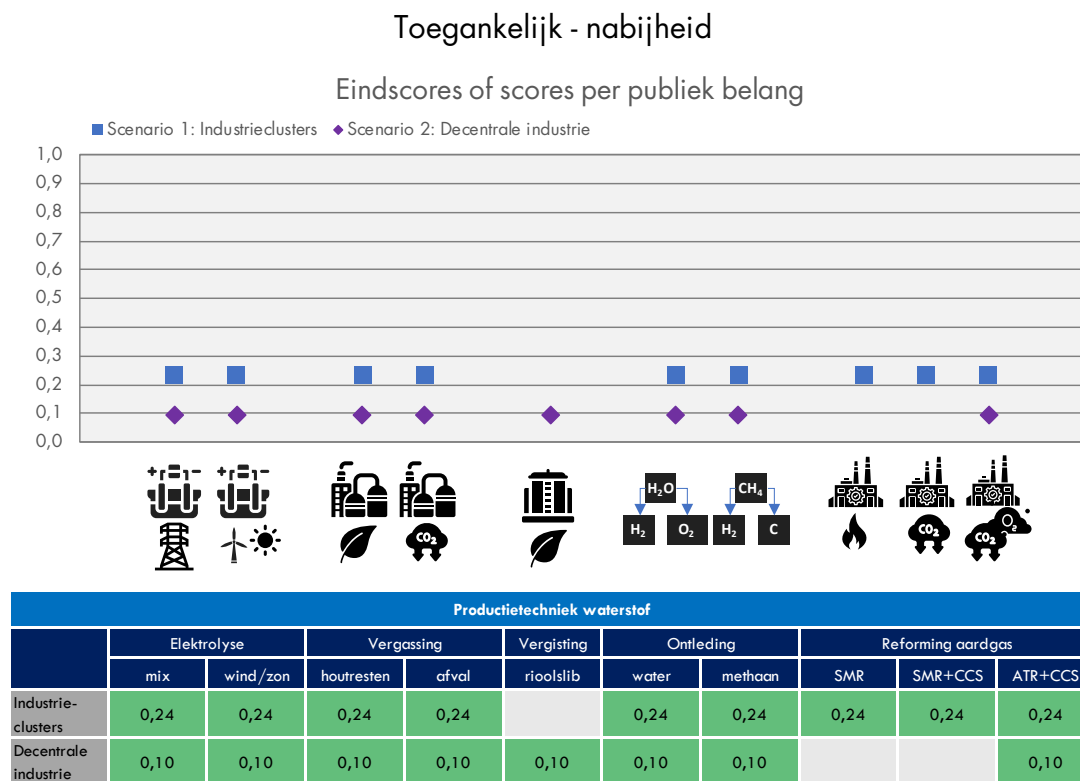
Figuur 22: Scores waterstofproductietechnieken op Kostenniveau voor scenario 1 en 2

Nabijheid (deelindicator)

De scores voor deze indicator hangen alleen af van het scenario. Per scenario zijn alle productietechnieken daarom op dezelfde hoogte afgebeeld, zie Figuur 23. Een score van 0 krijgt een keten die voor geen enkel bedrijventerrein toegankelijk is. Een productietechniek krijgt een score van 1 als alle bedrijven er toegang toe hebben, zoals bij aardgas.

Resultaat en verklaring

De productietechnieken in scenario 1, waar de waterstof via het landelijke waterstofnetwerk geleverd wordt, hebben een bijna 2,5 keer zo hoge score als in scenario 2, namelijk 0,24 vs. 0,1. Regionale waterstofnetwerken zijn alleen voor de concentratiegebieden van zogeheten cluster 6 bedrijven aangenomen. Dit betreft een veel kleiner oppervlak dan het oppervlak van de industrieclusters, zie Bijlage C.



Figuur 23: Scores waterstofproductietechnieken op Nabijheid voor scenario 1 en 2

4.9 RUIMTE

Bij het publieke belang Ruimte beoordelen we de *fysieke* ruimte die een productietechniek en scenario in beslag nemen. Er is geen rekening gehouden met mogelijke (lokale) veiligheids- of milieubeperkingen doordat we niet van een specifieke locatie uitgaan. Een theoretische productietechniek en scenario die geen additioneel ruimtebeslag vraagt, krijgt een score van 1. Een score van 0 krijgt een productietechniek die in deze analyse het grootste ruimtebeslag vraagt qua grondwaarde.

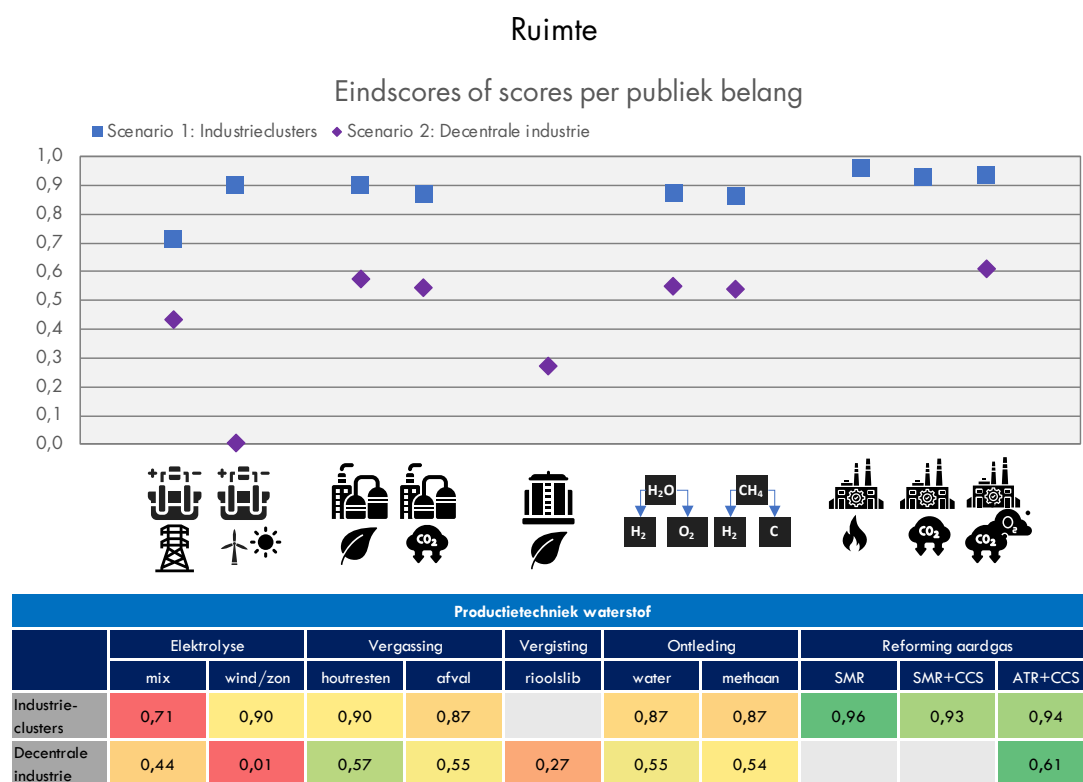
De benodigde ruimte voor de productieketen in Nederland is de optelsom van het ruimtegebruik voor productie inclusief zuivering en afvanginstallaties, overslag en opslag van grondstoffen, LNG en CO₂, ruimtebeslag van elektriciteitsopwekking en het additionele ruimtebeslag van aansluiting op het landelijke waterstofwerk of realisatie van het regionale waterstofnetwerk vermenigvuldigd met de waarde van de grond.

Resultaat en verklaring

De hoogste scores hebben de productietechnieken die gebaseerd zijn op methaanreforming: SMR en ATR, zie Figuur 24. De laagste scores en het hoogste ruimtegebruik hebben elektrolyse en rioolslibvergisting. Bepalend in de baseline blijkt de inschatting voor het ruimtegebruik van de buisleidingen voor een regionaal waterstofnetwerk. Dit verklaart waarom de scores in scenario 2 over de hele linie lager liggen dan in scenario 1. Het ruimtebeslag voor het regionale waterstofnetwerk komt uit op een strook van 10 meter breed en 50 km lang. Voor het veronderstelde jaarvolume in 2035 van 10 kton is dat ruim 50.000 vierkante meter per kton. Er is daarom een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar het effect van de lengte van het regionale netwerk.

Het ruimtebeslag van additionele energie-infrastructuur voor aardgas is klein (bestaand aardgasnet niet meegeteld). Het elektriciteitsgebruik heeft een groot ruimtebeslag op land en zee want in 2035 is 80% van de mix hernieuwbare opwek. Doordat de vierkante meterprijs op zee zeer laag is ingeschat valt elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit in scenario 1 gunstig uit, terwijl elektrolyse in scenario 2 een veel hoger ruimtebeslag vraagt (met name wind op land en zon op land).

Het ruimtebeslag van rioolslibvergisting is relatief groot ten opzichte van de andere productie-technieken. Dit hangt samen met de lage energie-inhoud van rioolslib. Het ruimtebeslag van CO₂-opslag in Aramis is verwaarloosbaar.



Figuur 24: Scores waterstofproductietechnieken op Ruimte voor scenario 1 en 2

4.10 MILIEU

Bij het publieke belang Milieu worden verschillende elementen gecombineerd. Een theoretische keten die geen enkele milieu-emissie veroorzaakt (methaan, NO_x, fijnstof, VOC) en geen geluidsoverlast, habitatschade of milieu-impact door watergebruik, 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 elementen zijn daardoor onder een noemer gebracht. De laagste score gebruikt voor normalisatie is een score van ongeveer 18 eurocent³² milieukosten per kilogram waterstof.

³² Prijspeil 2021.

Resultaat en verklaring

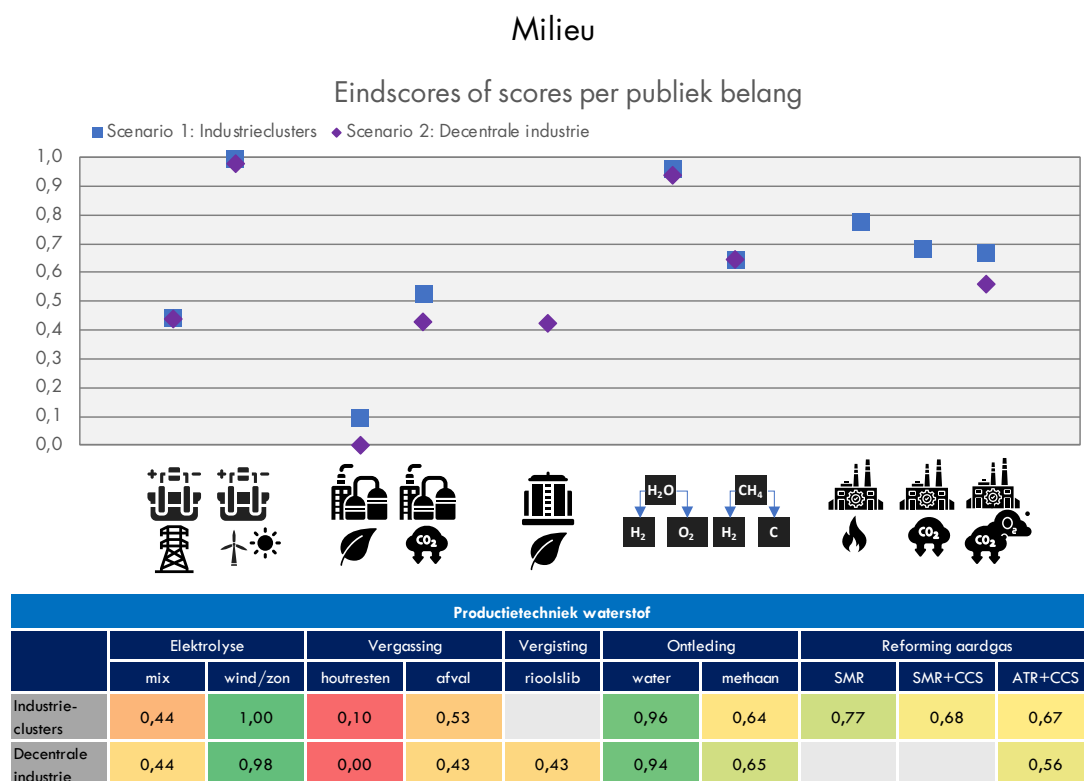
Het publieke belang Milieu betreft alleen milieueffecten in Nederland. Milieueffecten in het buitenland, bijvoorbeeld door winning en transport van LNG worden meegenomen bij publiek belang Rechtvaardig.

De hoogste scores hebben elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en waterontleding doordat de grondstoffen en energie nauwelijks transport vragen en geen tot nauwelijks NO_x- uitstoot veroorzaken (elektriciteit en ZHT-warmte). Bij volledig hernieuwbaar elektriciteitsgebruik is er geen milieubelasting van elektriciteit per kilogram waterstof, zie Figuur 25.

Daarna volgen de productietechnieken die aardgas gebruiken. Dit komt door het milieueffect van de methaanemissies en LNG-transport en van de NO_x-uitstoot van het elektriciteitsgebruik in Nederland. De NO_x-uitstoot van het elektriciteitsgebruik is ook bij elektrolyse via netstroom verantwoordelijk voor de lagere score. De grote hoeveelheid rioolslibtransporten veroorzaakt bij rioolslibvergisting een relatief grote bijdrage aan luchtvervuiling.

De laagste score ontstaat bij houtrestenvergassing door de luchtvervuilende emissies van productie en elektriciteitsgebruik en van het transport van grondstoffen in Nederland. In het proces komen verschillende stoffen vrij (fijnstof (PM), zwaveloxiden (SO_x), vluchtige organische componenten (VOC), etc.). Dit heeft een substantieel effect. Ook bij afvalvergassing komen in het proces verschillende stoffen vrij, ondanks recirculatie in proces en nabehandeling (met name SO₂ uit de restgasverbrander).

Disclaimer: Bij gebrek aan vergelijkende studies hebben we uiteenlopende bronnen gebruikt, waarin het detailniveau van emissies per productietechniek sterk verschilt. Van modelberekeningen met chemische engineering-software tot opgave in een milieueffectrapport (MER).



Figuur 25: Scores waterstofproductietechnieken op Milieu voor scenario 1 en 2

HOOFDSTUK 5 TOTAALSCORES

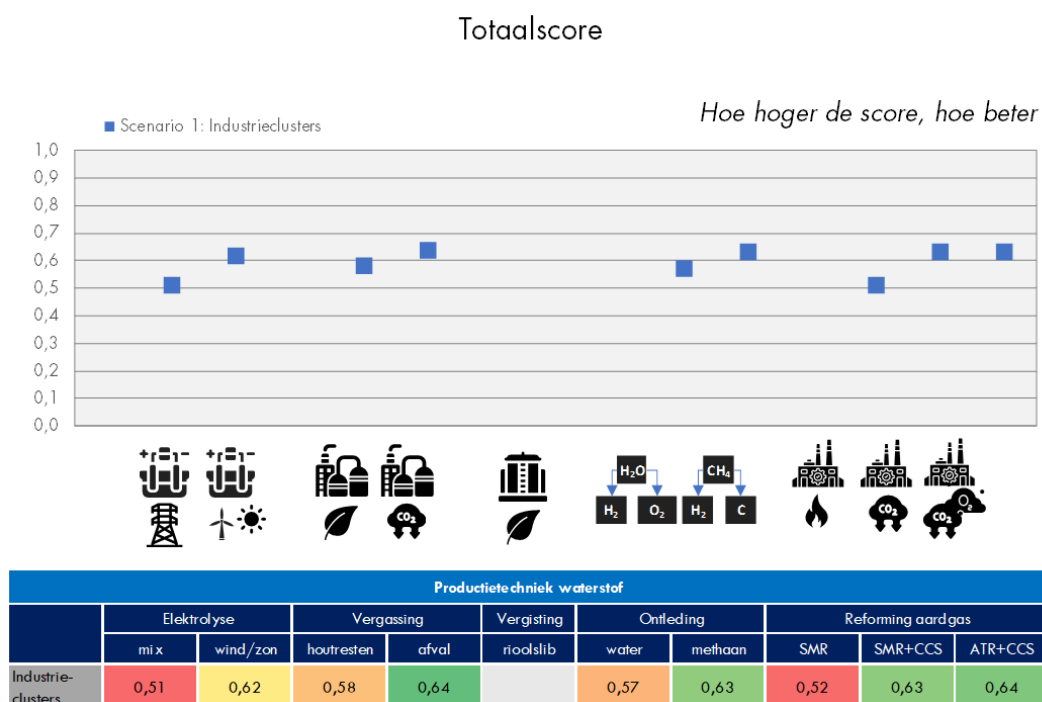
Dit hoofdstuk beschrijft de geraamde totaalscores voor 2035 per productietechniek in de twee scenario's bij gebruik van de basisweging die de opdrachtgever heeft aangeleverd. De resultaten voor de publieke belangen (Hoofdstuk 4) zijn daarvoor gecombineerd met de weegfactoren (zie paragraaf 3.4). Een productietechniek met een hogere totaalscore op de publieke belangen dan de referentie verhoudt zich in principe gunstig ten opzichte van deze referentie: deze techniek heeft een hogere publieke waarde.

Als een onderzochte productietechniek een hoge score heeft betekent dit nog niet dat het ook een kansrijk alternatief is voor elektrolyse met netstroom, de referentie voor dit onderzoek. Er zijn specifieke randvoorwaarden en kenmerken die tijdige grootschalige toepassing kunnen hinderen. Deze zijn beschreven in paragraaf 5.2. Ook zijn in dit hoofdstuk de belangrijkste resultaten voor de gevoeligheidsanalyses (zie bijlage D) opgenomen.

5.1.1 Vergelijking scenario 1: industrieclusters

Voor scenario 1 liggen de meeste onderzochte productietechnieken qua totaalscore dicht bij elkaar, zie Figuur 26. De waarden variëren tussen de 0,51 en 0,64, maximaal 13 procentpunten verschil. De verschillen zijn klein doordat diverse voor- en nadelen per techniek elkaar compenseren.

Rioolslibvergisting komt niet voor in scenario 1 omdat het benodigde volume rioolslib groter is dan de beschikbare hoeveelheid in Nederland, en import van rioolslib niet wenselijk is.



Figuur 26: Totaalscores onderzochte productietechnieken industrieclusters

Er zijn vier productietechnieken die min of meer even hoge totaalscores hebben: vergassing van niet-recyclebaar afval en drie van de vier op aardgas gebaseerde productietechnieken. Deze hebben elk een 12-13 procentpunten hogere score dan de referentie, elektrolyse met netstroom.

- Afvalvergassing heeft een hoge totaalscore vanwege hogere scores van Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief, Ruimte en Milieu ten opzichte van de referentie. Per kilogram waterstof is er een voordeel van 3,71 euro op Betaalbaar.³³ De broeikasgasemissies en milieu-emissies liggen respectievelijk 43%³⁴ en 16%³⁵ lager. De referentie heeft een hoger elektriciteitsgebruik en bij gebruik van netstroom veroorzaakt de elektriciteitsproductie meer emissies. Het ruimtebeslag ligt voor afvalvergassing uitgedrukt in de grondwaarde 55%³⁶ lager dan voor de referentie. De risicovolle investeringen (Adaptief) zijn 50%³⁷ van die voor de referentie.
- Methaanontleding heeft een hoge score vanwege de voordelen ten opzichte van de referentie op Betaalbaar (3,65 euro goedkoper), Adaptief (49% minder risicovolle investeringen), Ruimte (53% minder ruimtebeslag) en Milieu (36% minder milieu-emissies). Deze percentages zijn op vergelijkbare manier berekend als voor afvalvergassing in voetnoten 33 tot 37, en dat geldt ook voor het vervolg.
- SMR+CCS en ATR+CCS hebben hogere scores op Betaalbaar (3,51 euro en 3,35 euro lagere kosten), Adaptief (91% minder risicovolle investeringen), Ruimte (77% minder ruimtebeslag) en Milieu (44% en 41% minder milieu-emissies) en een lagere score op Economisch krachtig (26% lager als gevolg van vooral de import van gas), Duurzaam (o.a. 91% meer broeikasgasemissies) en Rechtvaardig (groter verschil in *true price* en kostprijs).

Ook de andere alternatieve productietechnieken hebben een (iets) hogere score dan de referentie, zie ook Tabel 4:

- Elektrolyse met wind op zee heeft een 11 procentpunten hogere score dan de referentie vanwege de betere score op Betaalbaar, Economisch krachtig, Duurzaam, Rechtvaardig, Milieu en Ruimte en alleen een nadeel op Betrouwbaar.
- Vergassing van geïmporteerde houtpellets behaalt 7 procentpunten voorsprong door Betaalbaar, Duurzaam en Ruimte.
- Ontleding van water via thermolyse heeft een 6 procentpunten hogere totaalscore vanwege de hogere scores op Betaalbaar, Economisch krachtig, Adaptief, Ruimte en Milieu.
- SMR heeft een 1 procentpunt hogere score door hogere scores op Betaalbaar, Adaptief, Ruimte en Milieu en een lagere score op Economisch krachtig, Duurzaam en Rechtvaardig.

³³ € 3,71 is de score van afvalvergassing op Betaalbaar minus referentie: $(81,77 - 40,50) \times 0,09 = € 3,71$, zie paragraaf 4.1.

³⁴ 43% is het verschil in score afvalvergassing op broeikasgasemissie t.o.v. optimum (1) gedeeld door referentie t.o.v. optimum: $(1 - 0,8513) / (1 - 0,7396) = 0,57$, dus 43% minder.

³⁵ 16% is het verschil in score van afvalvergassing op milieuemissie t.o.v. optimum (1) gedeeld door referentie t.o.v. optimum: $(1 - 0,5283) / (1 - 0,4406) = 0,84$, dus 16% minder.

³⁶ 55% is het verschil in score van afvalvergassing op ruimtebeslag t.o.v. optimum (1) gedeeld door referentie t.o.v. optimum: $(1 - 0,8717) / (1 - 0,7148) = 0,45$, dus 55% minder.

³⁷ 50% is het verschil in score van afvalvergassing op risicovolle investeringen t.o.v. optimum (1) gedeeld door referentie t.o.v. optimum: $(1 - 0,7560) / (1 - 0,5138) = 0,50$, dus 50% minder.

De referentie en huidige beleidsfocus voor het verduurzamen van de industrie met waterstof, elektrolyse met netstroom, komt in scenario 1 dus uit op de laagste score.

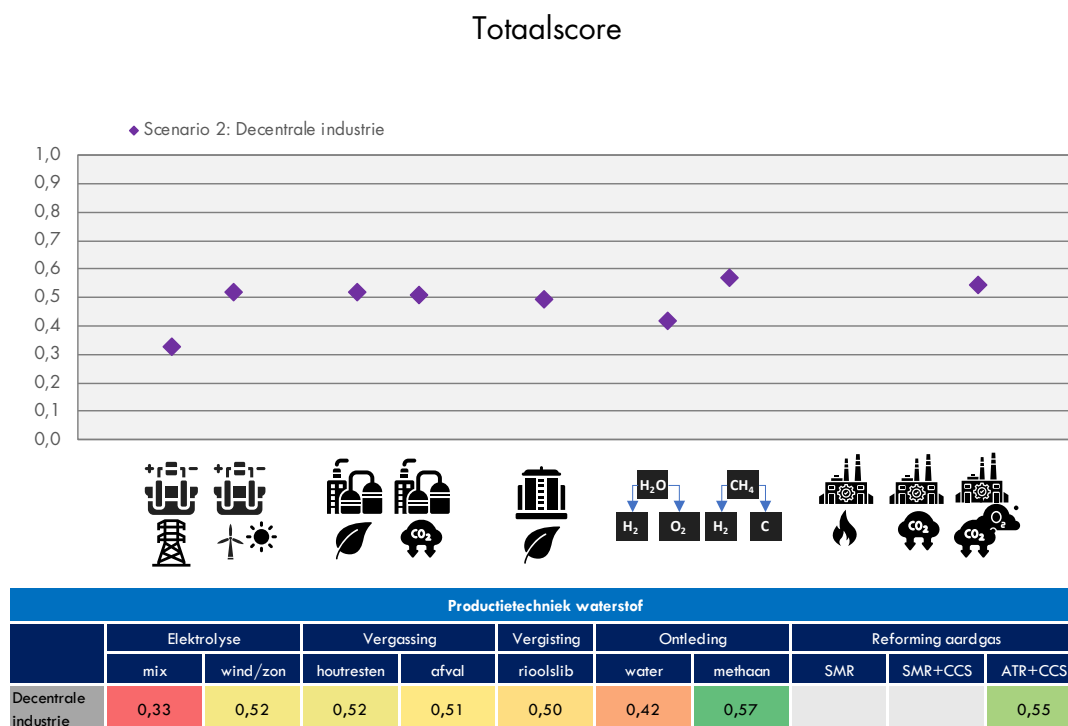
Tabel 4: Vergelijking productietechnieken industrieclusters per publiek belang, met totaalscore in de rechterkolom.

	Betaalbaarheid	Economisch Krachtig	Betrouwbaar	Veilig	Duurzaam	Adaptief	Rechtvaardig	Toegankelijk	Ruimte	Milieu	Totaalscore
Elektrolyse mix	0,40	0,16	0,83	0,82	0,80	0,51	0,97	0,83	0,71	0,44	0,51
Elektrolyse wind	0,50	0,30	0,75	0,82	0,97	0,51	1,00	0,83	0,90	1,00	0,62
Vergassing houtresten	0,64	0,08	0,58	0,76	0,93	0,76	0,95	0,65	0,90	0,10	0,58
Vergassing afval	0,82	0,14	0,75	0,74	0,87	0,76	0,96	0,83	0,87	0,53	0,64
Vergisting rioolslib											
Ontleding water	0,51	0,21	0,42	0,84	0,66	0,65	1,00	0,83	0,87	0,96	0,57
Ontleding methaan	0,81	0,14	0,67	0,81	0,80	0,75	0,82	0,83	0,87	0,64	0,63
SMR zonder CCS	0,91	0,10	0,92	0,82	0,32	1,00	0,58	0,83	0,96	0,77	0,52
SMR met CCS	0,80	0,12	0,92	0,78	0,64	0,96	0,75	0,83	0,93	0,68	0,63
ATR met CCS	0,78	0,11	0,83	0,77	0,75	0,96	0,78	0,83	0,94	0,67	0,64

5.1.2 Vergelijking scenario 2: decentrale industrie

In scenario 2 komen alle onderzochte alternatieve productietechnieken voor de decentrale industrie beter uit de multicriteria-analyse dan de referentie, elektrolyse via netstroom, zie Figuur 27. De bandbreedte van de totaalscores is groter dan in scenario 1: tussen 0,33 en 0,57, maximaal 24 procentpunten verschil.

Omdat we in deze studie uitgaan van bestaande SMR-installaties voor SMR en SMR+CCS (retrofit CCS), en zulke installaties in de decentrale industrie ontbreken, geven we deze in de figuren voor scenario 2 niet weer.



Figuur 27: Totaalscores onderzochte productietechnieken decentrale industrie

Als we inzoomen op de productietechnieken voor scenario 2, zijn er twee productietechnieken die min of meer de hoogste totaalscore hebben: methaanontleding en ATR met CCS. Ten opzichte van de referentie ligt de score 24 respectievelijk 22 procentpunten hoger.

Daarna is er een groep productietechnieken die het relatief goed doet, met elk 17 tot 19 procentpunten hogere scores dan de referentie. Dit zijn elektrolyse uit 100% hernieuwbare elektriciteit, vergassing van houtresten en van afval, en vergisting van rioolslib.

Methaanontleding heeft de hoogste score doordat het op alle publieke belangen redelijk tot goed presteert.³⁸ Het heeft een hogere score dan de referentie vanwege de betere score op Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief, Toegankelijk, Milieu en Ruimte, zie ook Tabel 5. Per kilogram waterstof is er een voordeel van 4,65 euro op Betaalbaar. De hogere score op Duurzaam wordt verklaard door het lagere gebruik van kritieke materialen ten opzichte van PEM-elektrolyse. De risicovolle investeringen (Adaptief) zijn 52% lager dan voor de referentie. Het lagere kostenverschil met de importhaven zorgt voor een hogere score op Toegankelijk. De milieu-emissies liggen 37% lager. Het ruimtebeslag ligt uitgedrukt in de grondwaarde 19% lager dan voor de referentie in scenario 2.

ATR+CCS heeft een 22 procentpunten hogere totaalscore vanwege de hogere scores op Betaalbaar (4,39 euro lager dan referentie), Duurzaam (minder kritiek materiaalgebruik), Adaptief (65% lagere risicovolle investeringen), Ruimte (31% minder ruimtebeslag) en Milieu (21% minder milieu-emissies).

³⁸ Er is in Nederland nog geen ervaring met methaanpyrolyse. De startup Thoriant wil op Chemelot in 2027 een pilot starten, die zou kunnen leiden tot fullscale bedrijfsvoering in 2035.

Tabel 5: Vergelijking productietechnieken decentrale industrie per publiek belang, met totaalscore in de rechterkolom.

	Betaalbaar	Economisch Krachtig	Betrouwbaar	Veilig	Duurzaam	Adaptief	Rechtvaardig	Toegankelijk	Ruimte	Milieu	Totaalscore
Elektrolyse mix	0,23	0,15	0,50	0,51	0,73	0,00	0,97	0,47	0,44	0,44	0,33
Elektrolyse wind	0,50	0,29	0,42	0,51	0,89	0,02	1,00	0,80	0,01	0,98	0,52
Vergassing houtresten	0,70	0,15	0,25	0,24	0,96	0,17	0,98	0,80	0,57	0,00	0,52
Vergassing afval	0,65	0,13	0,33	0,14	0,87	0,12	0,96	0,15	0,55	0,43	0,51
Vergisting rioolslib	0,45	0,58	0,50	0,40	0,85	0,17	0,98	0,80	0,27	0,43	0,50
Ontleding water	0,42	0,18	0,00	0,53	0,66	0,35	1,00	0,59	0,55	0,94	0,42
Ontleding methaan	0,75	0,14	0,50	0,47	0,80	0,52	0,83	0,55	0,54	0,65	0,57
SMR zonder CCS											
SMR met CCS											
ATR met CCS	0,72	0,11	0,42	0,24	0,75	0,65	0,79	0,59	0,61	0,56	0,55

Ook in scenario 2 heeft elektrolyse met netstroom de laagste totaalscore. Alle andere alternatieve productietechnieken hebben een hogere score.

- Elektrolyse uit wind en zon op land heeft een 19 procentpunten hogere totaalscore, veroorzaakt door hogere scores op Betaalbaar, Economisch krachtig, Duurzaam, Toegankelijk en Milieu, maar verliest punten op Betrouwbaar en Ruimte.
- Vergassing van lokale houtsnippers heeft een 19 procentpunten hogere totaalscore dan de referentie vanwege de scores op Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief, Toegankelijk en Ruimte.
- Afvalvergassing heeft een 18 procentpunten hogere totaalscore vanwege hogere scores op Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief en Ruimte.
- Ontleding van water via thermolyse heeft een 9 procentpunten hogere totaalscore vanwege de hogere scores op Betaalbaar, Economisch krachtig, Adaptief, Toegankelijk, Ruimte en Milieu.
- Rioolslibvergisting heeft een 17 procentpunten hogere totaalscore door de hoge scores op Betaalbaar, Economisch krachtig, Duurzaam en Adaptief.

De scores voor de decentrale industrie liggen gemiddeld lager dan in scenario 1. De redenen hiervoor zijn de hogere kosten en veiligheidsrisico's voor de afvoer van vloeibaar CO₂ en als gevolg van de kleinere schaalgrootte. Ook het ruimtebeslag van het regionale waterstofnetwerk zorgt voor een lagere score. In scenario 1 is alleen het ruimtebeslag van de aansluiting op het landelijke waterstofnet meegenomen.

5.1.3 Vergelijking voor scenario Chemelot

In deze studie is gekozen voor twee scenario's, waarbij scenario 1 representatief is voor de vier industrieclusters aan de kust, en scenario 2 voor de decentrale industrie. Chemiecluster Chemelot zit hier als het ware tussenin: dit betreft een groot industrieel cluster met daarbij horende voorzieningen en co-siting mogelijkheden, maar is niet aan zee gelegen. Sommige aannames die we voor beide scenario's hanteren, verschillen daarom voor de situatie van Chemelot:

- Schaal: voor de regio gaat scenario 2 uit van 10 kton/jaar. Voor Chemelot is productie op schaal van scenario 1 van toepassing, en zelfs meer. Dit blijkt uit de initiatieven van RWE (afvalvergassing, 61 kton/jaar) en Thorian (pilot 500 ton/jaar, daarna nog te bepalen, >100 kton/jaar).
- CAPEX: door toepassing van schalingsfactoren zijn de CAPEX per kW in de regio hoger dan in de industrieclusters. De CAPEX per kW voor Chemelot zal lager liggen dan in scenario 2.
- Water: omdat Chemelot niet aan zee ligt, is geen ontzilting van zeewater mogelijk, en is het risico op innamebeperking in het binnenland van toepassing.
- Biomassa: voor invoer van houtpellets is een extra transportstap nodig vanaf de invoerhaven. Het productievolume van waterstof in scenario 1 is te groot om uit te gaan van binnenlandse houtsnippers.
- CO₂: er is een grotere afstand naar de Aramis-opslag. De aanname dat CO₂ vanuit het binnenland in vloeibare vorm wordt afgevoerd, leidt tot veel transporten. Aansluiting op een CO₂-buisleiding (wellicht via de *Delta Rhine Corridor*) ondervangt de externe effecten daarvan.

De situatie van Chemelot zit tussen beide scenario's in. Het is niet te voorspellen hoe de productietechnieken in een 'Chemelot-scenario' zich ten opzichte van elkaar en ten opzichte van beide scenario's zouden verhouden.

5.2 RANDVOORWAARDEN EN KENMERKEN PER PRODUCTIETECHNIEK

Deze studie heeft tien technieken voor de productie van duurzame waterstof onderzocht en deze vergeleken met de referentie elektrolyse met netstroom (als een van de onderzochte technieken). Deze productietechnieken verschillen in de opschalings- en gebruiksmogelijkheden in 2035 waardoor de toepassing voor de verduurzaming van de industrie vergemakkelijkt of vermoeilijkt kan worden.

5.2.1 Beleidscontext

Voor de toepassing is onder andere de Europese beleidscontext van belang: dit gaat bijvoorbeeld over de definitie van hernieuwbare waterstof (ofwel RFNBO) en koolstofarme waterstof. Elektrolyse van water met hernieuwbare elektriciteit (wind/zon) lijkt de enige productietechniek die in 2035 volledig aan de RFNBO-vereisten kan voldoen. In 2035 moet tenminste 60% van de industriële waterstof uit RFNBO's bestaan voor zover waterstofstromen niet zijn uitgezonderd van deze Europese lidstaatverplichting.

Op 21 november 2025 is de gedelegeerde verordening over koolstofarme waterstof gepubliceerd.³⁹ De productietechnieken elektrolyse met netstroom, houtrestenvergassing, afvalvergassing, rioolslibvergisting, waterontleding en ATR met CCS voldoen naar verwachting aan de taxonomie koolstofarm, ofwel tenminste 70% broeikasgasemissiereductie ten opzichte van de fossiele referentie. Methaanpyrolyse kwalificeert ook als koolstofarm; vast koolstof als bijproduct wordt ook als CO₂-reductie gerekend, ondanks dat deze koolstof na gebruik toch als CO₂ vrij kan komen. SMR zonder CCS voldoet niet aan deze taxonomie, omdat de productie van

³⁹ Gedelegeerde Verordening (EU) 2025/2359 van de Commissie van 8 juli 2025 tot aanvulling van Richtlijn (EU) 2024/1788 van het Europees Parlement en de Raad door een methode voor de beoordeling van de broeikasgasemissiereducties door koolstofarme brandstoffen te specificeren.

waterstof met SMR zonder CCS geen 70% broeikasgasemissiereductie geeft. Of SMR met retrofit CCS voldoet aan de taxonomie koolstofarme waterstof hangt af van het gekozen SMR-productieproces. In deze studie hebben we op basis van marktinformatie aangenomen dat voldoende CO₂-afvang kan worden gerealiseerd door ondervuring met een gedeelte zelf geproduceerd waterstof om aan de 70%-vereiste te voldoen. Dit wil niet zeggen dat alle SMR-installaties deze drempel halen. Ondervuring met waterstof heeft overigens als gevolg dat het waterstofgebruik in de SMR-installatie het totale volume industriële waterstof vergroot op grond waarvan de grondslag voor de Europese lidstaatverplichting voor gebruik van RFNBO's in de industrie wordt berekend.

De andere productietechnieken met fossiele CO₂-uitstoot (afvalvergassing, ATR met CCS) hebben een voldoende hoog afvangpercentage om te kwalificeren als koolstofarm doordat we uitgaan van nieuwbouw.

Productietechnieken die gebruik maken van aardgas kunnen minder toekomstvast zijn omdat beleid gericht is op het verminderen van fossiele brandstoffen. In die situatie kan wel worden overgestapt op gebruik van groengas/biomethaan als duurzame grondstof. De impact van het gebruik van deze duurzamere grondstoffen op de scores is niet onderzocht.

5.2.2 Beschikbaarheid grondstoffen en energie

De onderzochte productietechnieken op basis van aardgas met CCS presteren redelijk goed en bieden schaalbaar potentieel voor 2035, als we veronderstellen dat aardgaslevering in het komende decennium niet in gevaar komt. Het opschalingspotentieel voor houtsnippervergassing⁴⁰, afvalvergassing en rioolslibvergisting is min of meer begrensd door de beschikbaarheid van de grondstoffen. Voor afvalvergassing is het volume van het benodigde soort niet-recyclebaar afval in Nederland volgens recent onderzoek voldoende voor meerdere installaties zoals aangenomen in scenario 1.⁴¹ De uitdaging is met name om deze stromen te contracteren, waarbij concurrentie bestaat met afvalverbranding (de referentie in de nulsituatie). Overheden hebben hierop invloed via het opstellen van aanbestedingsbestekken voor afvalverwerking.

De beschikbare hoeveelheid rioolslib waarover waterschappen beschikken, is onvoldoende voor scenario 1. Zelfs het referentievolume in scenario 2 vraagt rioolslib uit rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) in een groot deel van het land en leidt tot veel slibtransporten over de weg. Ook het volume binnenlandse houtsnippers als grondstof voor vergassing is een uitdaging. Overigens kan rioolslibvergisting naar waterstof wel profiteren van hoge neveninkomsten.

5.2.3 Overige aandachtspunten

Methaanontleding (pyrolyse) kan op korte termijn profiteren van hoge inkomsten van bijproduct vast koolstof, maar op langere termijn last hebben van beperkingen in de afzetmarkt hiervoor. Opbrengsten van dit bijproduct kunnen daardoor onder druk komen te staan. Een alternatief is om naast waterstof niet vaste koolstof te produceren maar chemische bouwstenen zoals acetyleen en ethyleen. Dit is een optie in scenario 1 maar niet in scenario 2, omdat de afzetmarkt buiten de industrieclusters voor chemische bouwstenen als acetyleen en ethyleen beperkt is.

⁴⁰ Het potentieel voor houtpellets is door mogelijkheid van import vooralsnog niet als beperkend verondersteld.

⁴¹ Strategy& (2024), [Study on the future chemical raw material value chain and the role of alternative waste processing technologies](#), december.

Inpassing van waterontleding via thermolyse is moeilijk in Nederland door schaarse ZHT-bronnen. *Concentrated solar power* is in Nederland geen alternatief. Overigens heeft dit alternatief ook in 2035 naar verwachting nog een lagere TRL en vraagt het substantieel meer (thermische) energie dan andere technieken. Grootschalige waterstofproductie voor de Nederlandse industrie in 2035 is onwaarschijnlijk. Waterontleding heeft cerium nodig. Dit is een kritiek materiaal dat beperkend kan worden bij opschaling.

De score van elektrolyse wordt beperkt door een substantieel kostennadeel als gevolg van hoge elektriciteits- en netwerkkosten en lagere vollasturen dan de andere productietechnieken. Bovendien heeft elektrolyse last van de verwachte lagere leveringszekerheid van het elektriciteitsnet en beschikbaarheid van water (in het binnenland) en van een hoog ruimtebeslag bij gebruik van elektriciteit uit zon en wind op land. Een locatie in een van de industrieclusters aan de kust, waarbij zeewater ontzilt wordt en wind op zee kan worden gebruikt, kan deze effecten enigszins beperken. Edelmetalen nodig voor PEM-elektrolyzers zijn schaars en kunnen de opschaling begrenzen.

5.3 GEVOELIGHEIDSANALYSES

De gevoeligheid van de totaalscores en van individuele scores op de publieke belangen is in verschillende gevoeligheidsanalyses onderzocht. Deze analyses zijn te vinden in Bijlage D. Het betreft acht gevoeligheidsanalyses van uitgangspunten (zie samengevat resultaat in Tabel 6. en een gevoeligheidsanalyse naar de impact van de weegfactoren.

De gevoeligheidsanalyses van de uitgangspunten laten zien dat de totaalscores en rangschikking van de productietechnieken in het algemeen weinig gevoelig zijn voor de onderzochte onzekere uitgangspunten. Wel hebben de gevoeligheidsanalyses effect op verschillende individuele publieke belangen.

Uitzonderingen waarbij de totaalscores wel veranderen zijn:

- De vergelijking met het nulalternatief voor afvalvergassing: afvalvergassing krijgt dan de hoogste score in scenario 1 en bijna de hoogste score in scenario 2.
- De analyse bij lagere elektriciteitsprijzen (-50%) en hogere gas- en warmteprijzen (+50%): elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit (mix) krijgt dan de hoogste score in zowel de industrieclusters als de decentrale industrie.

Tabel 6: Samenvatting resultaten gevoeligheidsanalyses uitgangspunten. Grijsze cellen betreffen de uitzonderingen waarbij de totaalscores veranderen bij de gewijzigde aannames.

Gevoeligheidsanalyse	Variatie	Individuele belangen	Totaalscore
Impact van leveringszekerheid van energie	1 extra risicopunt voor leveringsrisico bij aardgasgebruikers; 0 risicopunten voor netcongestie bij het gebruik van netstroom.	Met name elektriciteit gebruikende technieken krijgen hogere score op Betrouwbaar	Verbetering vergassing van houtresten en waterontleding (3 procentpunten); geen impact op rangschikking.
Impact van Nederlandse innovatie op het gebied van reactoren en elektrolyzers	Aandeel van CAPEX voor reactoren en elektrolyzers dat in baseline uit buitenland komt, is nu van Nederlandse makelij	Kleine veranderingen in score Economisch Krachtig; PEM-elektrolyse in scenario 2, 100% hernieuwbare elektriciteit 3 procentpunt hoger, rest maximaal 2 procentpunt	Effect ≤ 1 procentpunt, geen impact op rangschikking
Impact van gelijke in plaats van gedifferentieerde marktwaarde voor 100% hernieuwbare waterstof (RFNBO), koolstofarme en niet-koolstofarme waterstof	Baseline: verschillende waarden voor hernieuwbare, koolstofarme en niet-koolstofarme H ₂ ; gevoeligheidsanalyse waarde koolstofarme waterstof (4 euro per kg) voor alle productie-technieken	Elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit verliest voorsprong op Economisch krachtig door 14 procentpunten lagere score	Effect binnen afronding; alleen elektrolyse 100% hernieuwbare elektriciteit 1 procentpunt lager, geen impact op rangschikking.
Impact van het niet meenemen van het ruimtebeslag van de energie en elektriciteitsopwekking	Ruimtebeslag van de opwekking en gebruik van energie worden niet meegerekend	Groot effect op scores Ruimte; elektrolyse tot 64 procentpunt hogere score	Hogere score elektrolyse 100% hernieuwbare elektriciteit, geen verschil in rangschikking
Impact van een kortere lengte van de ringleiding of directe aansluiting in scenario 2, decentrale industrie	5 km in plaats van 50 km ringleiding, en directe verbinding tussen de waterstofproductie en de afzet op een industrieterrein (100 m)	Hogere scores in scenario 2 voor Betaalbaar, Adaptief, Betrouwbaar, Veilig, Ruimte en Toegankelijk	Hogere scores scenario 2, maar geen effect op rangschikking, want voor alle alternatieven gelijk
Impact van hogere en lagere energieprijzen	1) Gas- en warmteprijzen 150% van baseline en van elektriciteit 50% van baseline; 2) Gas- en warmteprijzen 50% van baseline en van elektriciteit 150% van baseline	Effect op m.n. Betaalbaar en indirect op Rechtvaardig, Economisch krachtig, Toegankelijk. Elektrolyse is gevoelig voor elektriciteitsprijs. Gas gebruikende technieken minder van hoge gasprijs en lage elektriciteitsprijs omdat effecten elkaar deels compenseren	Hogere scores van m.n. elektrolyse bij lagere elektriciteitsprijzen. De referentie heeft dan gemiddelde score. Rangschikking wordt beïnvloed. Bij lage elektriciteitsprijs krijgt elektrolyse 100% hernieuwbare elektriciteit hoogste score
Impact van een hoger of lager aandeel van de bijproducten dat vermarkt kan worden (digestaat altijd 100%)	Baseline 50% kan vermarkt worden Gevoeligheidsanalyse 50% meer of minder bijproduct kan vermarkt worden. In industriecusters is maximum 50%	Groot effect op score Economisch krachtig van bijproducten rioolslibvergisting. Zonder verkoop bijproducten verliest rioolslibvergisting hoge score	Lagere score voor rioolslibvergisting, geen impact op rangschikking
Impact van vergelijking ten opzichte van het nulalternatief, met name voor afvalvergassing en in beperkte mate voor rioolslibvergisting	Op hoofdlijnen hebben we de impact van vergelijking met dit nulalternatief beoordeeld.	Significant hogere score voor afvalvergassing op Milieu en Duurzaam, iets hoger op Rechtvaardig en iets lager op Economisch Krachtig	Afvalvergassing krijgt hoogste score in scenario 1 (in plaats van samen met ATR)

Gevoeligheid voor weegfactoren

In de gevoeligheidsanalyse is de door de opdrachtgever aangeleverde set weegfactoren vervangen door 1) de set die in MCA waterstofdragers is bepaald in samenwerking met een brede vertegenwoordiging van stakeholders en 2) een neutrale weging (elk publiek belang 10%).

Weging MCA waterstofdragers

De MCA waterstofdragers geeft een hogere weging op Veilig en Duurzaam en een lagere op Betaalbaar en Ruimte. Hierdoor verandert de productietechniek met de hoogste score. De verschillen tussen de productietechnieken zijn groter dan in de baseline.

In scenario 1 behaalt elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit de hoogste score in plaats van afvalvergassing. Ook in scenario 2 behaalt elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit de hoogste score, maar hier in plaats van methaanontleding. De hogere positie in de rangschikking is het gevolg van de zwaardere weging van Duurzaam (23,6% in plaats van 18,8%), Milieu (11,3% in plaats van 6,9%) en de lichtere weging van Betaalbaar (9,5% in plaats van 18,8%) in combinatie met de hoge score van elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit op Duurzaam (het effect van broeikasgasemissies), en Milieu en de lage score op Betaalbaar (2,82 euro per kilogram duurder dan afvalvergassing in scenario 1 en 2,17 euro per kilogram duurder dan methaanontleding in scenario 2).

Bij de decentrale industrie hebben beide vergassingstechnieken en ATR een lagere score dan bij de baseline weegfactoren. Dit wordt met name verklaard door de lagere weging van Betaalbaar (9,5% in plaats van 18,8%) en Ruimte (3,8% in plaats van 8,1%) en de hogere weging van Veilig (29,3% in plaats van 8,8%) in combinatie met de hoge score van deze technieken op Betaalbaar (3,77 tot 4,39 euro per kilogram goedkoper dan referentie) en Ruimte (20% tot 31% minder) en de lagere score op Veilig (onder andere door CO₂-afvoer en schaalnadeel).

Neutrale weging

Bij een neutrale weging worden Rechtvaardig, Toegankelijk en Milieu zwaarder gewogen dan in de baseline ten koste van Betaalbaar en Duurzaam. Bij gebruik van een neutrale weging liggen de totaalscores lager. De verschillen in scores tussen de productietechnieken zijn iets groter voor scenario industrieclusters en kleiner voor scenario decentrale industrie.

In de industrieclusters behaalt elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit de hoogste score in plaats van afvalvergassing. De overige productietechnieken hebben significant lagere scores bij de gebruikte weging. De andere rangschikking wordt verklaard door vooral de lagere weging van Betaalbaar (10,0% in plaats van 18,8%) en de hogere weging van Rechtvaardig (10,0% in plaats van 4,1%) en Milieu (10,0% in plaats van 6,9%). Het nadeel op Betaalbaar (2,46 tot 2,76 euro per kilogram duurder) van elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit ten opzichte van SMR+CCS, ATR+CCS en methaanontleding vermindert hierdoor.

Bij de decentrale industrie (scenario 2) krijgt methaanontleding net als in de baseline de hoogste score, direct gevolgd door rioolslibvergisting. Rioolslibvergisting heeft relatief een hogere score door de hogere weging van Rechtvaardig (10,0% in plaats van 4,1%) en Toegankelijk (10,0% in plaats van 4,9%) en de lagere weging van Betaalbaar (10,0% in plaats van 18,8%) in combinatie met 1) een hoge score op Rechtvaardig vanwege het kleine verschil tussen de true price en de kostprijs, 2) geen kostennadeel ten opzichte van de industrieclusters en 3) een lagere score op Betaalbaar (2,32 tot 2,77 euro per kilogram duurder dan koolstofarme aardgasgebruikende productietechnieken).

Overall vergelijking

De weging heeft invloed op de totaalscore, zoals blijkt uit de vorige paragrafen. In elk scenario is er een aantal productietechnieken dat bij elk van de drie sets een (redelijk) hoge score heeft.

In de industrieclusters heeft elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit bij alle drie sets weegfactoren een relatief hoge score (gemiddeld 0,63). Methaanontleding heeft in twee van de drie sets een hoge score (gemiddeld 0,60). Afvalvergassing en ATR+CCS hebben een hoge score bij de baseline set weegfactoren en een gemiddelde tot hoge score in de alternatieve sets (beide gemiddeld 0,59). De hoge score van deze technieken is dus relatief robuust. Over de hele linie heeft SMR lage scores (gemiddeld 0,43) en behaalt lagere score dan referentie (gemiddeld 0,52). De overige productietechnieken behalen gemiddeld een score van tussen de 0,49 en 0,57.

Voor de decentrale industrie heeft methaanontleding bij alle wegingen een hoge score (gemiddeld 0,48). De scores van elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en rioolslibvergisting zijn ook bij elke weging relatief hoog (gemiddeld 0,45). De referentie, elektrolyse met netstroom, heeft nooit de hoogste score en in twee van de drie wegingen de laagste van de onderzochte productietechnieken (gemiddeld 0,35). Vergassing van houtresten en afval hebben ook lage scores in scenario 2 (gemiddeld 0,35). Waterontleding (gemiddeld 0,40) en ATR+CCS (gemiddeld 0,41) zitten hier tussenin.

VERGELIJKING WATERSTOFPRODUCTIETECHNIEKEN

DEEL C: CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIES

Dit hoofdstuk bevat de conclusies op basis van de resultaten van de multicriteria-analyse voor de potentie van productietechnieken in industrieclusters en bij de decentrale industrie. Deze studie heeft inzichtelijk gemaakt hoe verschillende productietechnieken voor waterstof zich verhouden tot het produceren van waterstof via elektrolyse van netstroom (mix), de referentie. Een productietechniek met een hogere totaalscore op de publieke belangen dan de referentie verhoudt zich in principe gunstig ten opzichte van deze referentie: deze techniek heeft een hogere publieke waarde. Ook wordt ingegaan op de schaalbaarheid van productietechnieken, concurrerend gebruik van de grondstoffen of verschillen in de toepassingsmogelijkheden.

Eerst vatten we per scenario de technieken samen met de hoogste totaalscore op de publieke belangen (6.1.1 en 6.1.2). Deze hebben in principe een maatschappelijke voorkeur als techniek voor koolstofarme waterstofproductie. Vervolgens kijken we naar beperkingen, waardoor een productietechniek met een hoge totaalscore toch minder geschikt kan zijn voor opschaling van duurzame waterstofproductie voor de industrie (6.1.3). Ten slotte beoordelen we per scenario welke productietechnieken met hoge scores robuuste mogelijkheden voor opschaling bieden (6.1.4 en 6.1.5).

6.1.1 *Welke productietechnieken hebben in de industrieclusters de hoogste publieke waarde (scenario 1)?*

Met de gekozen weging komen alle onderzochte productietechnieken in de industrieclusters beter uit de multicriteria-analyse dan de referentie: elektrolyse via netstroom. De bandbreedte van de totaalscores op de publieke belangen als maat voor de publieke waarde is 13 procentpunten.⁴²

Vier productietechnieken behalen min of meer gelijke hoge totaalscores: vergassing van niet-recyclebaar afval, en drie van de vier op aardgas gebaseerde productietechnieken. Deze hebben elk een 12-13 procentpunten hogere totaalscore dan de referentie, elektrolyse met netstroom.

- Afvalvergasning heeft een hoge totaalscore vanwege hogere scores van Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief, Ruimte en Milieu ten opzichte van referentie. Per kilogram waterstof is er een voordeel van 3,71 euro op Betaalbaar. De externe kosten van broeikasgasemissies en milieu-emissies liggen respectievelijk 43% en 16% lager. De referentie heeft een hoger elektriciteitsgebruik en bij gebruik van netstroom veroorzaakt de elektriciteitsproductie meer emissies. Het ruimtebeslag ligt voor afvalvergasning uitgedrukt in de grondwaarde 55% lager dan voor de referentie. De risicovolle investeringen (Adaptief) zijn 50% van die voor de referentie.

⁴² De waarde van een procentpunt kan alleen voor individuele belangen specifiek worden toegelicht, niet van een procentpunt na weging. Hoewel theoretisch bij 50% weging van een publiek belang de waarde van een procentpunt op dat publieke belang zou halveren na weging, hangt door de VIKOR-rangschikking het resultaat van de weging ook af van hoe ver de productietechniek van de laagste score afstaat. Daardoor is er geen vaste waarde van een procentpunt na weging te geven.

- Methaanontleding heeft een hoge score vanwege de voordelen ten opzichte van de referentie op Betaalbaar (3,65 euro goedkoper), Adaptief (49% minder risicovolle investeringen), Ruimte (53% minder ruimtebeslag) en Milieu (36% minder milieu-emissies).
- SMR+CCS en ATR+CCS hebben hogere scores op Betaalbaar (3,51 euro en 3,35 euro goedkoper), Adaptief (91% minder risicovolle investeringen), Ruimte (77% minder ruimtebeslag) en Milieu (44% en 41% minder milieu-emissies) en een lagere score op Economisch krachtig (26% lager als gevolg van vooral de import van gas), Duurzaam (o.a. 91% meer broeikasgasemissies) en Rechtvaardig (groter verschil in *true price* en kostprijs).

Ook de andere alternatieve productietechnieken hebben een hogere score dan de referentie:

- Elektrolyse met wind op zee heeft een 11 procentpunten hogere score vanwege de betere score op Betaalbaar, Economisch krachtig, Duurzaam, Rechtvaardig, Milieu en Ruimte en alleen een nadeel op Betrouwbaar.
- Vergassing van importhoutpellets behaalt 7 procentpunten voorsprong door Betaalbaar, Duurzaam en Ruimte.
- Ontleding van water heeft een 6 procentpunten hogere totaalscore vanwege de hogere scores op Betaalbaar, Economisch krachtig, Adaptief, Ruimte en Milieu.
- SMR heeft een 1 procentpunt hogere score door hogere scores op Betaalbaar, Adaptief, Ruimte en Milieu en een lagere score op Economisch krachtig, Duurzaam en Rechtvaardig.

Alternatieve weging en gevoeligheidsanalyses

Het gebruik van alternatieve sets weegfactoren levert verschuivingen op in de totaalscores, rangschikking en verschillen met de referentie.

Gebruik van de weegfactoren van de MCA waterstofdragers en van een neutrale weging resulteert in de hoogste score voor elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit heeft gemiddeld over de drie sets weegfactoren de hoogste score (gemiddeld 0,63). Methaanontleding heeft in twee van de drie sets een hoge score (gemiddeld 0,60). Afvalvergassing en ATR+CCS hebben een hoge score bij de baseline set weegfactoren en een gemiddelde tot hoge score in de alternatieve sets (beide technieken gemiddeld 0,59). De hoge score van deze technieken is dus tamelijk robuust.

Gevoeligheidsanalyses die verschuivingen in de rangschikking laten zien, zijn:

- **De vergelijking met het nulalternatief** voor afvalvergassing: afvalvergassing krijgt dan de hoogste score in scenario 1. Het verschil met de tweede productietechniek, ATR met CCS, bedraagt vier procentpunten. De hogere score is het gevolg van een verbetering van de scores op de publieke belangen Milieu en Duurzaam (broeikasgassen en energieverlies) en indirect een verbetering op Rechtvaardig. Voor het publieke belang Economisch krachtig vermindert de score enigszins.
- De analyse bij **lagere elektriciteitsprijzen** (-50%) en **hogere gas- en warmteprijs** (+50%): elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit krijgt dan de hoogste score. Het verschil met de tweede productietechniek in deze situatie, afvalvergassing, bedraagt vijf procentpunten. De referentie, elektrolyse uit netstroom heeft niet meer de laagste score maar een gemiddelde score. De onderlinge positie van de overige productietechnieken verandert weinig. De relatieve positie van elektrolyse is meer dan andere technieken gevoelig voor de prijs van elektriciteit/energie. Opgemerkt moet worden dat we alleen hebben gekeken naar de impact van de variabele energietarieven. De kosten voor een netaansluiting kunnen ook sterk variëren maar zijn in de gevoeligheidsanalyse gelijk gehouden.

De overige gevoeligheidsanalyses laten zien dat de totaalscores en rangschikking van de productietechnieken in het algemeen weinig gevoelig zijn voor de onderzochte onzekere uitgangspunten. Het gaat om de impact van de leveringszekerheid energie, van Nederlandse innovatie op het gebied van reactoren en elektrolyzers, van gelijke in plaats van gedifferentieerde marktwaarde voor 100% hernieuwbare waterstof, koolstofarme en niet-koolstofarme waterstof, van het niet meenemen van het ruimtebeslag van de energie en elektriciteitsopwekking, van een kortere lengte van de ringleiding of directe aansluiting in scenario 2, en van een hoger of lager aandeel van de bijproducten dat vermarkt kan worden.

Conclusie maatschappelijke scores industrieclusters

In scenario 1 zijn er bij gebruik van de baselineweging vier waterstofproductietechnieken die relatief hoge scores hebben. Het gaat om vergassing van niet-recyclebaar afval, methaanontleding en SMR met CCS en ATR met CCS. Afvalvergassing krijgt de hoogste maatschappelijke score als wordt vergeleken met het nulalternatief.

Als we de overige gevoeligheidsanalyses betrekken bij de resultaten kan elektrolyse van 100% hernieuwbare elektriciteit worden toegevoegd aan de groep met hoge maatschappelijke scores. Bij lagere elektriciteitsprijzen of een andere weging behaalt elektrolyse van 100% hernieuwbaar namelijk de hoogste score en gemiddeld over de drie sets weegfactoren heeft deze productietechniek ook de hoogste score. Afvalvergassing, ATR+CCS en methaanontleding hebben gemiddeld ook relatief hoge scores. SMR+CCS behaalt gemiddeld een wat lagere score in geval van een zwaardere weging van Duurzaam en lagere weging van Betaalbaar.

6.1.2 Welke productietechnieken hebben bij de decentrale industrie de hoogste publieke waarde (scenario 2)?

Met de gekozen weging komen alle onderzochte productietechnieken voor de decentrale industrie beter uit de multicriteria-analyse dan elektrolyse via netstroom (mix). De bandbreedte van de totaalscores op de publieke belangen als maat voor de publieke waarde is groter dan in scenario 1, namelijk 24 procentpunten.

Methaanontleding behaalt de hoogste totaalscore. Ten opzichte van de referentie in scenario 2 ligt de score 24 procentpunten hoger. Daarna volgt ATR met twee procentpunten minder.

- Methaanontleding heeft de hoogste score doordat het op alle publieke belangen redelijk tot goed presteert. Het heeft een hogere score dan de referentie vanwege de betere score op Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief, Toegankelijk, Milieu en Ruimte. Per kilogram waterstof is er een voordeel van 4,65 euro op Betaalbaar ten opzichte van de referentie. De hogere score op Duurzaam wordt verklaard door het lagere gebruik van kritieke materialen ten opzichte van PEM-elektrolyse. De risicovolle investeringen (Adaptief) zijn 52% lager dan voor de referentie. Het kleine kostenverschil tussen productie met methaanontleding in de decentrale industrie en in de industrieclusters zorgt voor een hogere score op Toegankelijk dan voor de andere technieken. De externe kosten van milieu-emissies liggen 37% lager dan bij de referentie. Het ruimtebeslag ligt uitgedrukt in de grondwaarde 19% lager dan voor de referentie in scenario 2.
- ATR+CCS heeft een 22 procentpunten hogere totaalscore vanwege de hogere scores op Betaalbaar (4,39 euro goedkoper dan referentie), Duurzaam (minder kritiek materiaalgebruik), Adaptief (65% lagere risicovolle investeringen), Ruimte (31% minder ruimtebeslag) en Milieu (21% minder milieu-emissies).

Ook in scenario 2 heeft elektrolyse met netstroom de laagste totaalscore. Alle andere alternatieve productietechnieken hebben een hogere score dan elektrolyse met netstroom:

- Elektrolyse uit wind en zon op land heeft een 19 procentpunten hogere totaalscore, veroorzaakt door hogere scores op Duurzaam, Milieu, Betaalbaar en Toegankelijk, maar verliest punten op Betrouwbaar.
- Vergassing van binnenlandse houtsnippers heeft een 19 procentpunten hogere totaalscore dan de referentie vanwege de scores op Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief, Toegankelijk en Ruimte.
- Afvalvergassing heeft een 18 procentpunten hogere totaalscore vanwege hogere scores op Betaalbaar, Duurzaam, Adaptief en Ruimte.
- Vergisting van rioolslib heeft een 17 procentpunten hogere totaalscore door de hoge scores op Betaalbaar, Economisch krachtig, Duurzaam en Adaptief.
- Ontleding van water heeft 9 procentpunten hogere overall score vanwege de hogere scores op Betaalbaar, Adaptief, Toegankelijk, Ruimte en Milieu.

De scores in scenario 2 zijn lager dan in scenario 1 door de schaalnadelen, beperktere aanvoermogelijkheden en de hogere kosten voor afvoer van CO₂. Ook is er een nadeel door het hogere ruimtebeslag van het regionale waterstofnetwerk. In scenario 1 is alleen het ruimtebeslag van de aansluiting op het landelijke netwerk en niet het netwerk zelf onderdeel van Ruimte.

Alternatieve weging en gevoeligheidsanalyses

Het gebruik van alternatieve sets weegfactoren levert verschuivingen op in de totaalscores, rangschikking en verschillen met de referentie.

Gebruik van de weegfactoren van de MCA waterstofdragers resulteert in de hoogste score voor elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Bij een neutrale weging behoudt methaanontleding de hoogste score.

- Methaanontleding heeft bij twee van de drie sets weegfactoren en ook gemiddeld de hoogste score (gemiddeld 0,48). De hoge score van methaanontleding is dus tamelijk robuust.
- Elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en rioolslibvergisting nemen gemiddeld over de drie sets weegfactoren de tweede plek in (gemiddeld 0,45). De laagste gemiddelde scores zijn voor afvalvergassing, houtrestenvergassing en de referentie (gemiddeld 0,35).

Gevoeligheidsanalyses die verschuivingen in de rangschikking laten zien, zijn:

- **De vergelijking met het nulalternatief** voor afvalvergassing: afvalvergassing behaalt dan de op een na hoogste score in scenario 2, direct na methaanontleding. Het verschil met methaanontleding bedraagt een procentpunt. De hogere score is net als in scenario 1 het gevolg van een verbetering van de scores op de publieke belangen Milieu en Duurzaam (broeikasgassen en energieverlies) en indirect een verbetering op Rechtvaardig. Voor het publieke belang Economisch krachtig vermindert de score enigszins.
- De analyse bij **lagere elektriciteitsprijzen** (-50%) en hogere gas- en warmteprijzen (+50%): elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit behaalt dan samen met methaanontleding hoogste score. Het verschil met de volgende productietechniek, rioolslibvergisting, bedraagt twee procentpunten. De referentie, elektrolyse uit netstroom heeft nu de op een na laagste score in plaats van de laagste ten koste van waterontleding. De onderlinge positie van de overige productietechnieken verandert nauwelijks. De relatieve positie van elektrolyse is meer dan andere technieken gevoelig voor de prijs van elektriciteit/energie. Opgemerkt moet worden dat we alleen hebben gekeken naar de impact van de variabele energietarieven. De kosten voor een netaansluiting kunnen ook sterk variëren maar zijn in de gevoeligheidsanalyse gelijk gehouden.

De overige gevoeligheidsanalyses laten zien dat de totaalscores en rangschikking van de productietechnieken in het algemeen weinig gevoelig zijn voor de onderzochte onzekere uitgangspunten.

Conclusie maatschappelijke scores decentrale industrie

In scenario 2 zijn er bij gebruik van de baselineweging twee productietechnieken die relatief hoge scores hebben. Het gaat om methaanontleding en ATR met CCS. De totaalscore is voor methaanontleding tamelijk robuust, voor ATR met CCS minder. Afvalvergassing sluit aan bij deze twee als wordt vergeleken met het nulalternatief. Als we de overige gevoeligheidsanalyses betrekken bij de resultaten kan elektrolyse van 100% hernieuwbare elektriciteit worden toegevoegd aan de groep met hoge maatschappelijke scores. Bij lagere elektriciteitsprijzen of een andere weging behaalt elektrolyse van 100% hernieuwbaar namelijk de hoogste score en gemiddeld over de drie sets weegfactoren de op een na hoogste score, samen met rioolslibvergisting.

6.1.3 Welke factoren kunnen de opschaling van koolstofarme waterstofproductie beperken?

De bijdrage aan de opschaling van duurzame waterstof wordt mede bepaald door beperkingen van grondstoffen en benodigde energie, alternatieve toepassing van deze grondstoffen, toepassingsmogelijkheden qua regelgeving en door andere randvoorwaarden.

Beschikbaarheid grondstoffen en energie

Het opschalingspotentieel van de productietechnieken kan beperkt zijn doordat de grondstoffen niet onbegrensd voorhanden zijn. Dit geldt met name voor houtrestenvergassing en rioolslibvergisting.

- Voor rioolslibvergisting is de productie van 10 kton per jaar in scenario 2 alleen mogelijk bij gebruik van verzameld rioolslib van alle waterzuiveringen in de helft van Nederland. Een kleinere productieschaal van 1-2 kton per jaar zou wel toepasbaar zijn op een RWZI met centrale slibvergisting, denk aan de schaal van een energiehub met waterstof waar de waterstof dichtbij de productie wordt gebruikt.⁴³
- Voor houtrestenvergassing zijn houtsnippers uit binnenlandse productie beperkt beschikbaar. Voor houtpellets kunnen door importeren grotere volumes worden verkregen.

Het volume van het benodigde niet-recyclebaar afval in Nederland is volgens recent onderzoek voldoende voor meerdere installaties zoals aangenomen in scenario 1. Voor waterontleding zijn weinig zeerhogetemperatuur-warmtebronnen beschikbaar.

Uiteraard zijn aardgas, elektriciteit en water ook niet onbeperkt beschikbaar voor waterstofproductie, maar de beschikbaarheid van deze grondstoffen en energiedragers wordt voornamelijk niet als belemmerend gezien voor grootschalige waterstofproductie. Een kanttekening is dat edelmetalen voor PEM-elektrolyzers en waterontleding schaars zijn en de opschaling kunnen begrenzen. Beschikbaarheid van voldoende water kan een probleem worden voor elektrolyzers in het binnenland, als bij droogte een innameverbod geldt.

⁴³ De hoeveelheid primair slib in Nederland is 1,9 miljoen ton per jaar. Volgens Tauw (2022) wordt 85% hiervan op RWZI's vergist naar 137 miljoen Nm³ biogas per jaar, de rest is nog onverwerkt potentieel. De meeste waterschappen bereiken met centrale vergisting een biogasproductie rond 10 miljoen Nm³ per jaar (met uitschieters naar 20 miljoen) en verwerken hier ongeveer 0,15 miljoen ton primair rioolslib voor. Zou men kiezen voor vergisting naar waterstof dan is een productieschaal van 1,5 kton/jaar waterstof haalbaar op zulke centrale vergistingslocaties. Tauw (2022). *Locatieonderzoek groen gas RWZI's*. Voor Unie van Waterschappen, 2 augustus 2022.

Concurrerend gebruik grondstoffen en energie

Ook concurrentie met andere toepassingen kan het opschalingspotentieel van de productietechnieken beperken. Rioolslibvergisting, afvalvergassing, vergassing van lokale houtsnippers en waterontleding moeten concurreren met alternatief gebruik van de grondstoffen of schaarse ZHT-warmte in Nederland.

Alleen voor afvalvergassing met CCS waren binnen de reikwijdte van deze studie voldoende data om dit aspect uit te werken. Het effect van vergelijken met alternatief gebruik van het afval is gunstig voor de totaalscore omdat niet-recyclebaar afval nu nog wordt verbrand met laag rendement en CO₂-emissies en andere schadelijke emissies.

Bij vergassing van houtresten, ontleding van water en rioolslibvergisting valt het effect van vergelijking met het nulalternatief (gebruik van houtsnippers voor bijstook in elektriciteitscentrales, alternatief warmtegebruik respectievelijk biogasproductie) niet zonder verdere analyse te bepalen.

Toepassing qua regelgeving

De alternatieve productietechnieken hebben doorgaans niet hetzelfde toepassingspotentieel in de industrie als elektrolyse. Ze kwalificeren niet als hernieuwbare waterstof (RFNBO) en kunnen daardoor geen invulling geven aan het beleidsdoel om in 2035 60% waterstof in de industrie te gebruiken. Alleen elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit heeft een hoge score ten opzichte van elektrolyse met netstroom én levert hernieuwbare waterstof op.

De overige productietechnieken kunnen wel worden gebruikt om de resterende 40% van de industriële waterstof te leveren. Op langere termijn kan het gebruik van fossiele grondstoffen voor waterstofproductie lastiger worden omdat beleid gericht is op het verminderen van fossiele koolstof. In die gevallen zou wel kunnen worden overgestapt op gebruik van biomethaan of groengas.

Overige randvoorwaarden

Sommige productietechnieken zijn moeilijk inpasbaar in Nederland vanwege een benodigde zware netaansluiting (o.a. elektrolyse), een hoge ruimtevraag (elektrolyse 100% hernieuwbaar en rioolslibvergisting scenario 2), een grote transportbehoefte van grondstoffen (houtresten, afval en rioolslib) en beperkingen voor het verkrijgen van vergunningen. Dit is locatieafhankelijk en is niet afzonderlijk onderzocht. Deze aspecten zijn niet meegewogen in het eindoordeel.

6.1.4 Welke productietechnieken met hoge scores bieden kansen voor opschaling van koolstofarme waterstofproductie in scenario 1?

De vijf productietechnieken met hoge scores die opschalingspotentieel hebben en voor 2035 een voldoende hoog TRL hebben, zijn voor scenario 1 afvalvergassing, methaanontleding, ATR+CCS, SMR+CCS, en elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Ze hebben een hogere score dan elektrolyse met netstroom. Deze productietechnieken bieden kansen om de opschaling van koolstofarme waterstof te versnellen.

- Afvalvergassing heeft de hoogste maatschappelijke waarde als daarmee bestaande verbranding van afval (zonder CCS) wordt voorkomen (gemiddelde totaalscore 0,59 en effect nulalternatief is +0,05).
- Methaanontleding en ATR+CCS hebben gemiddeld hoge scores in scenario 1 (0,60 en 0,59) en bij de huidige inschattingen geen last van beperkingen in beschikbaarheid van energie en grondstoffen (aardgas).

- Retrofit van bestaande SMR-installaties met CCS levert een verbetering van de score op de publieke belangen op. SMR+CCS is van de vijf technieken voor opschaling van koolstof-arme waterstofproductie het meest gevoelig voor een hogere weging van Duurzaam en een lagere van Betaalbaar. Hierdoor ligt de gemiddelde score (0,56) wat lager dan bij de andere kansrijke technieken.

Deze vier productietechnieken voldoen aan de eis voor koolstofarme waterstof, maar niet aan de eis voor hernieuwbare waterstof die in 2035 60% van de productie moet uitmaken. De techniek die hier wel aan voldoet is elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit.

- Elektrolyse zou gunstiger uit de analyse komen als de netaansluitkosten en elektriciteitskosten een minder grote impact zouden hebben op Betaalbaar.⁴⁴ Gemiddeld over de sets weegfactoren (met name bij zwaardere weging van Duurzaam en lichtere weging van Betaalbaar) heeft elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit de hoogste score (0,63).

De overige productietechnieken bieden geen of minder kansen voor opschaling van koolstofarme waterstofproductie:

- Houtrestenvergassing en vooral waterontleding zijn minder zeker als alternatief voor waterstoflevering aan de Nederlandse industrie in richtjaar 2035 omdat ze naar verwachting nog niet vóór 2035 voldoende uitontwikkeld (TRL 8/9) zullen zijn voor commerciële toepassing. Voor geen van de sets weegfactoren vallen de scores bovendien hoog uit.
- SMR zonder CCS voldoet niet aan de eis voor koolstofarme waterstof.
- De referentie, elektrolyse met netstroom, heeft ook bij de andere wegingen relatief lage of de laagste totaalscore op de publieke belangen.

6.1.5 Welke productietechnieken met hoge scores bieden kansen voor opschaling van koolstofarme waterstofproductie in scenario 2?

De drie productietechnieken die opschalingspotentieel hebben en voor 2035 een voldoende hoog TRL hebben, zijn voor scenario 2 methaanontleding, afvalvergassing en elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit. Ze hebben een hogere score dan elektrolyse met netstroom.

- Methaanontleding komt daaruit naar voren als meest kansrijke productietechniek om de opschaling van koolstofarme waterstof te versnellen (gemiddelde totaalscore weegfactoren 0,48) en heeft bij huidige inschattingen niet te maken met beperkingen in beschikbaarheid van energie en grondstoffen (aardgas).
- Afvalvergassing heeft in scenario 2 minder mogelijkheden voor integratie met andere bedrijven en hogere kosten omdat de CO₂ moet worden afgevangen, vloeibaar gemaakt en per schip getransporteerd. Dit zorgt voor een gemiddeld lagere totaalscore over alle sets weegfactoren (0,35). Wel heeft afvalvergassing een hogere publieke waarde (+ 0,07) als daarmee bestaande verbranding van afval (zonder CCS) wordt voorkomen.

Deze twee productietechnieken voldoen aan de eis voor koolstofarme waterstof, maar niet aan de eis voor hernieuwbare waterstof. De techniek die hier wel aan voldoet is elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit.

⁴⁴ De kosten van elektriciteit zijn overgenomen uit de KEV 2024 (inschatting 2035) en de netwerkkosten zijn gebaseerd op de tarieven per 1 januari 2025. Er zijn signalen dat beide kostenposten veel hoger uit kunnen gaan vallen. Tegelijkertijd wordt onderzocht of de elektriciteitsprijzen (variabel en netaansluiting) voor de industrie gematigd kunnen worden.

- Elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit zou meer kans maken als de netaansluitkosten en elektriciteitskosten een minder grote impact zouden hebben op Betaalbaar.⁴⁴ Gemiddeld over de sets weegfactoren heeft elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit de op een na hoogste score (0,45).

De overige productietechnieken bieden geen of minder kansen voor opschaling:

- Rioolslibvergisting is minder kansrijk voor opschaling omdat rioolslib schaars is en de inzet hiervan voor het produceren van biogas en opwerking tot groengas gestimuleerd wordt via de bijmengverplichting groengas, ondanks de relatief hoge scores bij alternatieve wegingen (gemiddelde alle wegingen 0,45).
- Houtrestenvergassing en vooral waterontleding zijn minder zeker als alternatief voor waterstoflevering aan de Nederlandse industrie in richtjaar 2035 omdat ze naar verwachting nog niet vóór 2035 voldoende uitontwikkeld (TRL 8/9) zullen zijn voor commerciële toepassing. Voor geen van de sets weegfactoren vallen de scores bovendien hoog uit. Beide technieken hebben last van beperkte beschikbaarheid van grondstoffen (houtresten) of energie (ZHT-warmte).
- ATR+CCS heeft minder mogelijkheden bij de decentrale industrie voor integratie met andere bedrijven en meer bedrijfsrisico's omdat CO₂ afgevangen, vloeibaar gemaakt en per schip getransporteerd moet worden en gemiddeld een lagere score dan methaanontleding (0,41 in plaats van 0,48). De totaalscore is minder robuust.
- De referentie heeft ook bij de andere wegingen relatief lage of de laagste totaalscore op de publieke belangen.

6.2 BELEIDSAANBEVELINGEN

Het doel van deze studie is het opleveren van een feitenbasis en niet het doen van beleidsaanbevelingen. Desalniettemin geven we hier enkele suggesties naar aanleiding van bevindingen die uit het onderzoek en de gesprekken met stakeholders naar voren zijn gekomen.

1. *Hoogte ETS versus kosten CCS.* Het is belangrijk dat CO₂-afvang en -opslag financieel aantrekkelijker is dan uitstoten van CO₂. De ETS-prijs moet daarvoor hoger liggen dan de kosten voor CCS. Voor de industrieclusters aan de kust is dat bij de gebruikte aannames het geval, maar niet voor de decentrale industrie en Chemelot. Als het niet haalbaar is om de kosten bij CCS voor scenario 2 onder de ETS-prijs te brengen, dan is af te raden om CCS-afhankelijke productietechnieken toe te passen op plekken waar CCS te duur is.
2. *Ondersteuningsmaatregelen afstemmen op techniek:* de onderzochte productietechnieken hebben elk voor- en nadelen en vragen daarom andersoortige ondersteuningsmaatregelen.
 - Methaanontleding komt als een interessante techniek naar voren op basis van de scores. Daarom is het zinvol om de ontwikkeling en demonstratie van de techniek te bevorderen. Hiermee kan ook Nederlandse innovatie worden bevorderd. Het gebruik van biomethaan stimuleren in plaats van overwegend fossiel aardgas (nu verondersteld), zodat er geen fossiele grondstoffen worden gebruikt zou een tweede verduurzamingsstap kunnen zijn.
 - Maatschappelijk gezien heeft het retrofitten van bestaande SMR's met CCS positief toegevoegde waarde. De score van SMR+CCS hoort bij de productietechnieken met de hoogste scores (0,63 in scenario 1), terwijl de score van SMR zonder CCS een lagere totaalscore (0,52 in scenario 1) heeft op de publieke belangen.

- Beleid gericht op het stimuleren van elektrolyse zou vooral gericht moeten worden op het verlagen van de elektriciteitskosten en nettarieven. De scores voor elektrolyse van netstroom en 100% hernieuwbare elektriciteit zijn gevoelig voor de elektriciteitsprijs en nettarieven. Elektrolyse heeft per kilogram waterstof drie tot zes keer zoveel elektriciteit nodig als de andere productietechnieken (met uitzondering van rioolslibvergisting⁴⁵) en vereist in verhouding ook een veel zwaardere netaansluiting als gevolg van het lagere aantal vollasturen. Verlagen van de elektriciteitskosten en nettarieven zullen leiden tot hogere scores voor vooral elektrolyse. Ook flexibele contractvormen met lagere vollasturen zouden tot hogere scores kunnen leiden. Dit is in deze studie niet onderzocht.
 - Waterontleding via thermolyse lijkt meer geschikt voor andere (zonnigere) landen, maar kan eventueel wel gecombineerd worden met kernenergie en plannen voor nieuwe kerncentrales, hoewel die niet binnen 10 jaar gerealiseerd zijn.
3. *Waterstofproductie versus sturen op andere waardeketens:* De onderzochte productietechnieken zijn met elkaar vergeleken op basis van gelijk waterstofproductievolume. Hierdoor zijn verschillen tussen de productietechnieken voor andere opgaven niet goed zichtbaar. We adviseren om ook deze andere aspecten te betrekken in de keuze voor beleid ter ondersteuning of ontmoediging.
- Enkele technieken produceren ook andere stoffen zoals vast koolstof of vetzuren en hebben waterstof eerder als bijproduct. Die technieken verdienen niet alleen steun vanwege hun hoge score op basis van vergelijking van de waterproductie, maar ook omdat ze bijdragen aan andere waardeketens. Dit gaat om methaanontleding en rioolslibvergisting.
 - Afvalvergassing en rioolslibvergisting gebruiken een bestaande afvalstroom. Met afvalvergassing wordt niet alleen waterstof geproduceerd maar ook een maatschappelijk aantrekkelijk alternatief geboden ten opzichte van afvalverbranding. Door middel van rioolslibvergisting kan waterstof worden geproduceerd samen met waardevolle vetzuren. Deze techniek bevindt zich echter nog in het pilotstadium, en aangezien rioolslib schaars is en de inzet hiervan voor het produceren van biogas en opwerking tot groengas gestimuleerd wordt via de bijmengverplichting groengas is de verwachting niet dat deze vorm van waterstofproductie een vlucht neemt in Nederland. Houtrestenvergassing, afvalvergassing, SMR met en zonder CCS en ATR met CCS produceren syngas als tussenproduct. Syngas en de daarin aanwezige koolstof (CO) is een waardevol product voor de chemische industrie en raffinaderijen. Syngasproductie kan dienen als terugvaloptie wanneer de vraag naar waterstof tegenvalt.
 - Elektrolyse is initieel in beeld gekomen vanwege de energiesysteemfunctie van balanceren en opslag. Door bij overaanbod van hernieuwbare elektriciteit waterstof te produceren en deze waterstof op te slaan totdat er een tekort aan (hernieuwbare) elektriciteit is, kan een duurzaam energiesysteem gebalanceerd worden. De andere productietechnieken hebben deze meerwaarde voor het energiesysteem niet of minder omdat ze ofwel niet snel aan-/uitschakelbaar zijn ofwel een veel kleinere elektriciteitsvraag hebben. Aan de andere kant kunnen andere technieken juist zorgen voor een stabiel aanbod van waterstof omdat ze niet weersafhankelijk zijn.

⁴⁵ Rioolslibvergisting heeft ongeveer de helft van de elektriciteit nodig per kilogram waterstof in vergelijking met elektrolyse, maar komt niet als kansrijke techniek voor opschaling naar voren.

6.3 AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Gedurende het onderzoek kwamen we verschillende vragen, witte vlekken en onzekerheden tegen. Een deel daarvan is ingevuld 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. *Impact van flexibele contracten en lagere nettarieven voor elektrolyse:* Het onderzoek toont aan dat de scores voor elektrolyse met netstroom (mix) en 100% hernieuwbare elektriciteit (wind/zon) gevoelig zijn voor een veranderende elektriciteitsprijs. Elektrolyse is duurder dan andere productietechnieken waardoor het met de baselineweging een lagere totaalscore heeft dan de andere technieken. In de gevoeligheidsanalyse is echter alleen gekeken naar het effect van variabele elektriciteits-, gas- en warmteprijsen, niet naar de impact van hogere of lagere nettarieven en het mogelijk effect van flexibele contractvormen die het nettatarief kunnen verlagen maar waarschijnlijk tot een lager aantal vollasturen per jaar leiden. Indien gezocht wordt naar mogelijkheden om de score van elektrolyse te verbeteren, verdient het aanbeveling het effect van deze ontwikkelingen verder te onderzoeken.
2. *Toetsen / verifiëren omgevingsveiligheid:* Voor het beoordelen van het risico van incidenten is in deze MCA voor een beperkt aantal mogelijke incidentscenario's een kwalitatieve inschatting gegeven. Het is aan te bevelen om de inschatting van de veiligheidsrisico's te verdiepen en nauwkeuriger te maken samen met de regionale veiligheidsdiensten en industrieclusters. Met name het risico van de CO₂-keten en de verschillen tussen de productieprocessen zijn hierbij van belang aangezien hier de grootste verschillen tussen de productietechnieken worden verwacht.
3. *Analyse van milieuvergunningen:* Bij gebrek aan vergelijkende studies zijn voor het bepalen van emissies van de onderzochte productietechnieken uiteenlopende bronnen gebruikt, waarin het detailniveau van emissies per productietechniek sterk verschilt. Dit varieerde van modelberekeningen met chemische engineeringsoftware tot opgave in een MER. Dit is een risico voor de betrouwbaarheid van de scores op Milieu en daardoor mogelijk ook op de rangschikking. In een stakeholderbijeenkomst is geopperd om milieuvergunningen te analyseren op dit aspect. Dat paste niet in dit onderzoek, maar verdient aanbeveling.
4. *Uitbreiding vergelijking:* In deze studie zijn tien waterstofproductietechnieken voor twee scenario's vergeleken. In de interviews en stakeholderbijeenkomsten zijn ook andere productietechnieken gesuggereerd. Voorbeelden hiervan zijn pyrolyse van biomassa (met biochar als bijproduct) en pyrolyse van niet-recyclebaar huishoudelijk afval. In plaats van aardgas zouden de aardgasgebruikende technieken kunnen worden doorgerekend op basis van biomethaan. Het industriecluster Chemelot past niet goed in een van beide scenario's. Chemelot zou als apart scenario kunnen worden geanalyseerd. Het verdient aanbeveling om uitbreidingen in eventueel vervolgonderzoek mee te nemen in de vergelijking, zodat een nog bredere portfolio van technieken en ontwikkelmogelijkheden kan worden beschouwd voor beleidsafwegingen en ook voor Chemelot als een van de vijf industrieclusters een passende rangschikking beschikbaar is.
5. *Doorontwikkeling indicatoren:* in deze studie zijn de indicatoren gebruikt voor de publieke belangen uit het NPE zoals ontwikkeld in de MCA waterstofdragers. Aspecten die voor de vergelijking van waterstofproductietechnieken relevant zijn maar nog onvoldoende worden afgedekt met deze indicatoren, zijn de systeemwaarde en de toekomstbestendigheid van een techniek. Bij de systeemwaarde gaat het bijvoorbeeld om het benutten van elektrolyse of andere toepasbare technieken om het energiesysteem te balanceren (flexibiliteit in het systeem aan te bieden). Bij toekomstbestendigheid gaat het om de blijvende beschikbaarheid van grondstoffen. We stellen voor om te onderzoeken of deze aspecten betrokken kunnen worden in de indicatoren per

publiek belang. De toekomstbestendigheid zou mogelijk betrokken kunnen worden in het publieke belang Adaptief en de systeemwaarde in het publieke belang Economisch krachtig.

LITERATUURLIJST

- Advanced Gasification Technologies – Review and Benchmarking. Technical assessment and economic analysis. Task 5 Report. BEIS Research Paper No. 2021/038. Prepared for BEIS by AECOM & Fichtner Consulting Engineers. October 2021.
- Alam, Monisha, Nusra Fatema Nayan (2024). Techno-Economic Assessment of Biohydrogen Production from Dark Fermentation of Wastewater Sludge. Preprint. University of Alberta, 5 February 2024.
- Budama, Vishnu Kumar, Nathan G. Johnson, Ivan Ermanoski, Ellen B. Stechel (2021). Techno-economic Analysis of Thermochemical Water-splitting System for Co-production of Hydrogen and Electricity. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 2, January 2021, 1656-1670.
- 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 vs. 1.1, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts, februari.
- Falter, C., Sizmann, A. (2021). Solar Thermochemical Hydrogen Production in the USA. *Sustainability* 2021, 13, 7804.
- Gubin, Veronica, Florian Benedikt, Ferdinand Thelen, Martin Hammerschmid, Tom Popov, Hermann Hofbauer, Stefan Müller (2024). Hydrogen production from woody biomass gasification: a techno-economic analysis. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 18:818–836.
- HyDelta 3 (2024). WP3A – Greenhouse potential of hydrogen emissions from the grid, oktober.
- HyDelta 3 (2024). WP4c – Value Chain and System Development – Hydrogen component manufacturing readiness and spatial requirements, D4c.2– Spatial requirement contours of hydrogen projects (november)
- HyDelta3 (2024). D4c.2– Spatial requirement contours of hydrogen projects, TNO, 21 November 2024.
- Hydrogen Europe (2024). Clean Hydrogen Production Pathways. Report 2024.
- 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.
- ISPT (2023). A One-GigaWatt Green-Hydrogen Plant. Advanced Design and Total Installed-Capital Costs. Hydrohub Innovation Program.

- Jonkeren, O. en Francke, J. (2023). Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid | KiM, Kennisbasis Goederenvervoer, Notitie, Februari.
- 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.
- KiM (2023). Kennisbasis goederenvervoer 2023.
- Lensink, Sander en Emma Eggink (red.) (2025). Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2025, Planbureau voor de Leefomgeving publicatienummer 5472.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2023), Nationaal Plan Energiesysteem, december.
- 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.
- Monolith: Clean Production of Carbon Black Expands to Nebraska, <https://www.bene-sch.com/clean-production-of-carbon-black-expands-to-nebraska/>
- Netbeheer Nederland (2025), Tussenrapportage HyRegions 2 – uitwerking concentratiegebieden regionale waterstof, februari 2025.
- Onigbajumo, Adetunji, Priyanka Swarnkar, Geoffrey Will, Thirumalachari Sundararajan, Alireza Taghipour, Sara Couperthwaite, Ted Steinberg, Thomas Rainey (2022). Techno-economic evaluation of solar-driven ceria thermochemical water-splitting for hydrogen production in a fluidized bed reactor. *Journal of Cleaner Production* 371, 133303
- Oxford: Oxford Institute for Energy Studies (2024). Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain: Environmental Impact, Mitigation, and Recommendations for Sustainable Deployment. November 2024.
- Panteia (2023). Cost Figures for Freight Transport – final report, commissioned by Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM), January.
- PBL (2025). Groene waterstof: de praktische uitdagingen tussen droom en werkelijkheid, Een verkenning naar de knelpunten en mogelijke oplossingsrichtingen in de ontwikkeling van een groenewaterstofmarkt, maart.
- Rain Saulnier, Keith Minnic, Kim Sturgess (2020). Water for the Hydrogen Economy, Watersmart Solutions.
- RHDHV (2014), MER RWZI's 's Hertogenbosch, februari 2014.
- RHDHV (2022). Quickscan potentie voor restwarmte Pernis Effluent en Maasvlakte Electrolyser. Fase A & Fase B. BI2538-102-100IBRP003F02. 18 maart 2022
- RHDHV (2024), Milieueffectrapport (MER) FUREC Chemelot. Syngasproductie uit afvalstoffen op Chemelot, Klant: RWE Generation NL B.V. Referentie: BH2364RP002F02. 6 december 2024.
- RHDHV (2024). Water voor waterstof, Onderzoek naar de relatie tussen waterbeschikbaarheid en grootschalige elektrolyse, juli 2024.

- Rovere, Andrea (2019). Autothermal Reforming Plant with CCS: Techno-economic Investigation. Politecnico de Torino.
- Salkuyeh, Yaser Khojasteh, Bradley A. Saville, Heather L. MacLean (2018). Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from different biomass gasification processes. *International Journal of Hydrogen Eneergy* 43, 9514-9528.
- Star, Martijn van der (2022). Material Requirements for Water Electrolysers in the Netherlands 2020-2050. The necessity of innovations in scaling up. Thesis. Leiden University & Delft University of Technology.
- Strategy& (2024), Study on the future chemical raw material value chain and the role of alternative waste processing technologies, december.
- Teymouri, Navid (2023). Electrified Natural Gas Pyrolysis to Produce Low-Carbon Hydrogen. Thesis. Concordia University, Montreal. August 2023.
- TNO (2024). Evaluation of the levelised cost of hydrogen based on proposed electrolyser projects in the Netherlands. Renewable Hydrogen Cost Eelement Evaluation Tool (RHyCEET). TNO 2024 R10766, 13 May 2024.
- Trinomics en Blueterra (2024). HyRegions, Onderzoek naar de aanpak voor de mogelijke uitrol van regionale waterstof netwerk infrastructuur, April 2024.

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

BIJLAGE A: DATA PER WATERSTOFPRODUCTIETECHNIEK

In deze bijlage geven we per waterstofproductietechniek een procesbeschrijving en de data waarmee we gerekend hebben, aanvullend op de algemene uitgangspunten die in bijlage B worden gepresenteerd.

We hebben data over CAPEX geschaald naar de productieomvang in beide scenario's door toepassing van de veelgebruikte formule: ⁴⁶

Kosten apparatuur bij omvang A = Kosten apparatuur bij omvang B * (Omvang A / Omvang B) ^{schalingsfactor}

We volgen JRC (2022) die 0,67 als schalingsfactor hanteerde in de studie naar productie en import van waterstofdragers, behalve voor elektrolyse waar we de schalingsfactor afleiden uit de kostenopgave van TNO (2024).

ELEKTROLYSE VAN WATER (NETGEBONDEN EN DIRECT HERNIEUWBARE ELEKTRICITEIT)

Watelektrolyse is het chemische proces om water te splitsen in waterstof en zuurstof door gebruik van elektriciteit ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Hier komt ook warmte bij vrij. Dit gebeurt in elektrolyzers: modulair opgebouwde apparaten die tot zeer grote productie-installaties kunnen worden geschakeld (ordegrootte honderden MegaWatt - MW). Zie Figuur 28 voor het proces-schema.

Grond- en hulpstoffen en energie

De grondstof is zeer zuiver water (ultra puur water). Voor koeling is demiwater nodig. Afhankelijk van de waterbron omvat de vereiste waterzuivering processen zoals zandfiltratie, UF/UV-filtratie, ontzouten, ontharden, demineraliseren, ontgassen, en andere. De elektriciteit kan worden betrokken uit het elektriciteitsnet of direct uit een zonne- of windpark. In de referentie is de elektriciteit de gemiddelde mix in 2035. In alternatief 2 is de elektriciteit in scenario 1 afkomstig van windparken op zee (via een Power Purchase Agreement, PPA). Dit vereist een zware net-aansluiting. In scenario 2 komt de elektriciteit hoofdzakelijk via een directe aansluiting met een gecombineerd wind- en zonnepark in het achterland. Daarnaast is voor 30% van het benodigde vermogen een kleine netaansluiting verondersteld die aanvulling van wind op zee via een PPA mogelijk maakt.

Installatie

Er zijn verschillende typen elektrolyzers. De meest bekende zijn AEL (alkalische elektrolyse), PEM (proton exchange membrane)-elektrolyse en hoge-temperatuur solid oxide elektrolyse. In deze studie beschouwen we alleen de eerste twee. Beide technieken zijn op TRL 9 beschikbaar. Voor grootschalige toepassing zijn er nog wel vraagstukken over de integratie van de elektrolyse-eenheden en de *balance of plant*, en de optimale bedrijfsvoering (aantal bedrijfsuren en

⁴⁶ Michael Tribe and R.L.W. Alpine (1986). Scale economies and the "0.6 rule". *Engineering Costs and Production Economics* 10(4), 271-278.

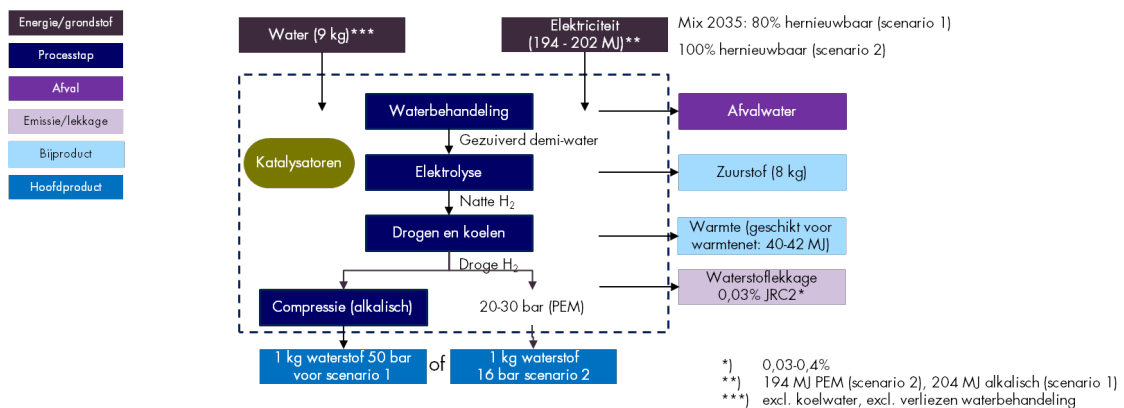
verhouding vollast/deellast met het oog op efficiëntie, levensduur, betrouwbaarheid en veiligheid).

Wanneer elektriciteit door het zuivere water wordt geleid, vormt zich waterstofgas aan de kathode en zuurstofgas aan de anode. Dit wordt mogelijk gemaakt door de beweging van ionen in de elektrolyt. Bij alkalische elektrolyse dient een waterige alkalische oplossing als elektrolyt, waardoor ionentransport tussen elektroden mogelijk is. PEM-elektrolyse maakt gebruik van een vaste polymeerelektrolyt en werkt met een iets hogere efficiëntie en stroomdichtheid dan alkalische elektrolyten. Beide werken bij temperaturen beneden 100°C. PEM-elektrolyzers bevatten schaarse (deels kritieke) grondstoffen zoals iridium en platina, AEL gebruikt het minder schaarse nikkel.

We hebben ervoor gekozen om in scenario 1 uit te gaan van AEL en in scenario 2 van PEM. Aanvankelijk was het beeld dat AEL meer geschikt is voor grotere schaal (opstelling in productiehallen) en PEM meer voor kleinere schaal (gecontaineriseerde eenheden), maar later is duidelijk geworden dat beide technieken wat betreft eigenschappen en prestaties naar elkaar toe groeien. We hebben de verdeling echter niet meer aangepast.

Producten

De waterstof komt na droging met zeer hoge zuiverheid uit de elektrolyser (>99,99%) en kan direct worden afgevoerd in het landelijke of regionale waterstofnetwerk. Bij PEM is voor invoeding in het regionale waterstofnetwerk geen extra compressie nodig, bij AEL voor het landelijke waterstofnetwerk wel. De zuurstof komt eveneens zeer zuiver vrij en kan als bijproduct worden verkocht. In de praktijk is dit echter lastig gezien de hoeveelheden en afstand naar eventuele gebruikers, tenzij de elektrolyser bij een RWZI of in een industrieel cluster is geplaatst. De vrijkomende warmte is geschikt voor een warmtenet, indien dit op redelijke afstand gelegen is. Er zijn geen andere emissies dan effluentwater. Wel is er geringe lekkage van waterstof.



Figuur 28: Processchema elektrolyse (AEL en PEM)

Data voor modellering elektrolyse

In scenario 1 wordt alkalische elektrolyse toegepast in een fabrieksoptelling. In scenario 2 kan worden volstaan met een serie gecontaineriseerde elektrolyzers.

TNO (2024) geeft een verwachte kostenopbouw voor 100 MWe en 200 MWe waterelektrolyse en komt op basis van kostenopgaven uit aanvragen voor de subsidieregeling opwekking van waterstof door elektrolyse (OWE) op 3.050 €/kW respectievelijk 2.630 €/kW CAPEX uit. Dit betekent een schalingsfactor van 0,786. TNO maakt geen verschil tussen alkalische elektrolyse (AEL) en PEM-elektrolyse omdat dit te gemakkelijk naar individuele projecten te herleiden zou zijn. ISPT (2020) geeft een verwachte kostenopbouw voor 1 Gigawatt waterelektrolyse,

met CAPEX voor AEL van 1.400 €/kW en voor PEM van 1.800 €/kW ("conventional") respectievelijk 730 en 830 €/kW ("advanced"). Dit is een verschil van 29% resp. 14%. We gaan uit van de geschaalde CAPEX volgens TNO, waarbij AEL 14% goedkoper is dan PEM. Net als TNO (2024) verhogen we de CAPEX met 10% vanwege de verwachte noodzaak om na verloop van tijd stacks te vervangen als gevolg van degradatie.

Elektrolyse	Scenario 1 en 2
Productie-uren per jaar	4380
Grond- en hulpstoffen en energie	
Watergebruik proces	9,0 liter/kgH ₂ ultra puur water, volume na zuivering
Watergebruik koeling	11 liter/kgH ₂ (RHDHV) demiwater in circulerend systeem, volume na zuivering
Elektriciteit	Sc.1: AEL 201,6 MJ/kgH ₂ (TNO, inclusief compressie naar 60 bar) Sc.2: PEM 194,4 MJ/kgH ₂ (TNO, inclusief compressie naar 20 bar)
Schaarse materialen	Sc.1: AEL 4,2 g Nikkel per kgH ₂ (Van der Star) Sc.2: PEM 0,0025 g Platina per kgH ₂ , 0,0022 g Iridium per kgH ₂ , 0,011 g Ruthenium per kgH ₂ , 20,6 g Titanium per kgH ₂ (Van der Star)
Bijproducten en emissies	
Zuurstof	8 kg per kgH ₂ (stoichiometrisch)
Overige emissies	Geen
Warmte (levering)	Sc.1: 42,3 MJ/kgH ₂ (RHDHV) Sc.2: 40,8 MJ/kgH ₂ (RHDHV)
Waterstofverlies keten	0,3 g per kgH ₂ (Oxford)
Kosten	
CAPEX	Sc.1: AEL 2007 €/kW (ISPT, "conventional" waarde 2035), incl. 10% stackvervanging Sc.2: PEM 3928 €/kW (ISPT, "conventional" waarde 2035) incl. 10% stackvervanging
Overige operationele kosten (OPEX)	3,0% van CAPEX (RVO)
Oppervlak	Sc.1: AEL 1826 m ² per ktonH ₂ (HyDelta3) Sc.2: PEM 532 m ² per ktonH ₂ (HyDelta3)

Gebruikte databronnen:

- HE: Hydrogen Europe (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways. Report 2024*.
- HyDelta3 (2024). D4c.2– Spatial requirement contours of hydrogen projects, TNO, 21 November 2024.
- ISPT (2023). A One-GigaWatt Green-Hydrogen Plant. Advanced Design and Total Installed-Capital Costs. Hydrohub Innovation Program.
- Oxford: Oxford Institute for Energy Studies (2024). Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain: Environmental Impact, Mitigation, and Recommendations for Sustainable Deployment. November 2024.
- RHDHV (2022). Quickscan potentie voor restwarmte Pernis Effluent en Maasvlakte Electrolyser. Fase A & Fase B. BI2538-102-100IBRP003F02. 18 maart 2022
- RVO: Het percentage dat de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) aanhoudt voor jaarlijks onderhoud van een elektrolyser in het kader van de OWE-subsidie (Opschaling Waterstofproductie met Elektrolyse) is 3% van de investeringskosten.
- TNO (2024). Evaluation of the levelised cost of hydrogen based on proposed electrolyser projects in the Netherlands. Renewable Hydrogen Cost Element Evaluation Tool (RHCEET). TNO 2024 R10766, 13 May 2024.
- Van der Star: Martijn van der Star (2022). Material Requirements for Water Electrolysers in the Netherlands 2020-2050. The necessity of innovations in scaling up. Thesis. Leiden University & Delft University of Technology.

VERGASSING VAN HOUTRESTEN

De term vergassing verwijst naar de chemische omzetting van vaste of vloeibare stoffen, in dit geval biomassa, met behulp van zuurstof, naar een gas. Het onderscheidt zich van pyrolyse, de thermische ontleding van materialen bij verhoogde temperaturen in afwezigheid van zuur-

stof. Deze twee processen kunnen ook worden gecombineerd als onderdeel van dezelfde technologie. Het procesontwerp kan aanzienlijk verschillen, afhankelijk van de technologie (zoals reactorontwerp) en de grondstof. Er zijn veel demonstratieprojecten met biomassavergassing geweest, maar meestal voor productie van chemicaliën of vloeibare brandstoffen uit syngas. Met biomassavergassing naar waterstof is nog weinig ervaring, zeker op grote schaal. De TRL wordt ingeschat op TRL 8 op regionale schaal en TRL 7 op grote schaal.

Biomassavergassing omvat een reeks van chemische reactievergelijkingen, die ook wordt samengevat als: Biomassa + O₂ (of H₂O) → CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄ + andere CHs + teer + char + as (vóór reiniging en water-gas-shift-reactie voor maximale waterstofopbrengst). Zie Figuur 29 voor het processchema.

Grond- en hulpstoffen en energie

Als grondstof gaan we uit van uit de Baltische staten ingevoerde houtpellets in scenario 1 en houtsnippers uit binnenlands bos- en landschapsbeheer in scenario 2. Houtpellets hebben een constantere samenstelling, lager vochtgehalte en hogere energiedichtheid en dat maakt vergassing stabielere dan van houtsnippers, maar de inkoopkosten liggen ook beduidend hoger. De biomassa wordt voor gebruik gedroogd en verkleind (geschred). Zuurstof wordt onttrokken via een luchtscheidingsinstallatie. Voor de stoom en voor koelwater wordt demiwater gebruikt, en elektriciteit wordt gebruikt voor CO₂-afvang, compressie en de pressure swing adsorption (PSA).

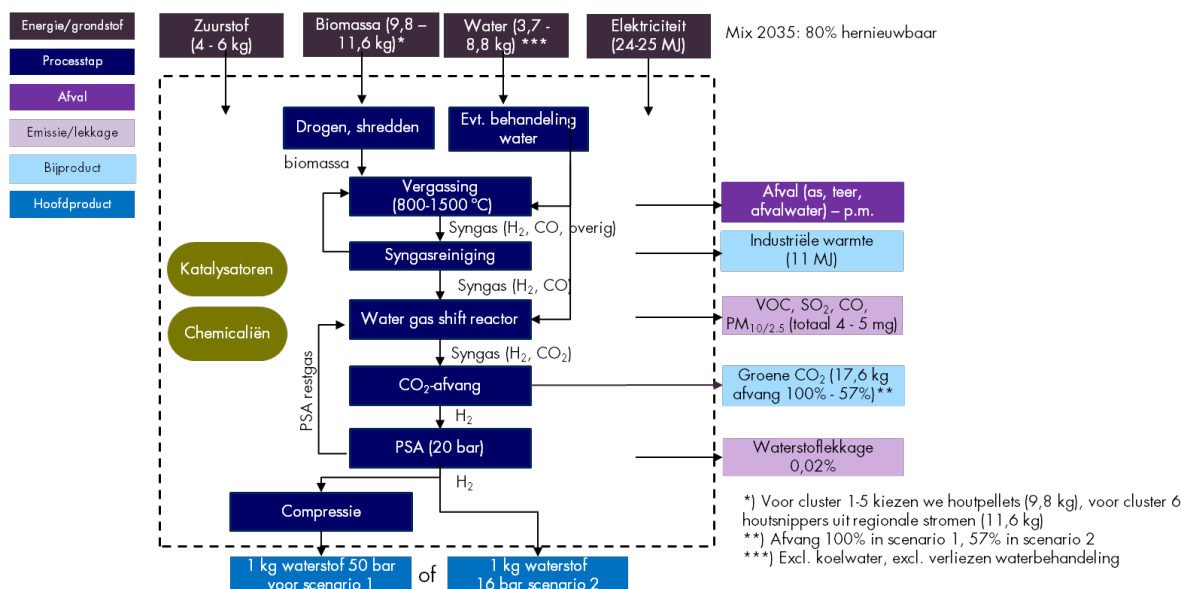
Installatie

Vergassing is een thermochemisch proces waarbij een gecontroleerde hoeveelheid zuurstof of lucht wordt gebruikt om een onvolledige verbranding te bereiken, meestal tussen 700 en 1200 °C. Na voorbehandeling van de biogrondstof vindt de vergassing (of een combinatie van pyrolyse- en vergassingsreacties) in de reactor plaats. Hierbij ontstaat een waterstofrijk gasmengsel (syngas met water en methaansporen) en bijproducten. De bijproducten zijn afhankelijk van de grondstof en de technologie en kunnen as, biochar en teer omvatten. Syngas wordt gereinigd van deze verbindingen voor verdere opwerking. Afhankelijk van de reactor wordt het gereinigde syngas gereformeerd met stoom, waarna de waterstofopbrengst wordt verhoogd met een water-gas-shift-reactie. De CO₂ wordt uit de stroom afgevangen.

Producten en emissies

De waterstof wordt met PSA op hoge zuiverheid gebracht (>99,99%). Voor invoeding in het regionale waterstofnetwerk is geen extra compressie nodig, voor het landelijke waterstofnetwerk wel. De afgescheiden biogene CO₂ wordt per buisleiding of met een tankauto (vloeibaar gemaakt) vervoerd naar een klant. Vrijkomende warmte kan worden geleverd aan een industrieel warmtenet (aanneem in scenario 1) of stadswarmtenet (aanneem in scenario 2). Afvalstromen betreffen as, teer en afvalwater van de waterzuivering. Ook is er geringe lekkage van waterstof in de keten en geringe luchtmissies van vluchtige organische componenten (VOC), CO en fijnstof.

Biochar is in de door ons gekozen uitwerking van casus houtrestenvergasning geen product. We gaan uit van volledige omzetting naar waterstof en CO₂. Het kan wel een keuze in het procesontwerp zijn om biochar als waardevol bijproduct te maken.



Figuur 29: Processchema vergassing van houtresten

Data voor modellering houtrestenvergassing

Houtrestenvergassing	Scenario 1	Scenario 2
Productie-uren per jaar	8000	
Grond- en hulpstoffen en energie		
Aardgas (hoogcalorisch)	9,8 kg houtpellets per kgH ₂ (markt-informatie)	11,6 kg houtsnippers per kgH ₂ (Gubin)
Watergebruik proces	8,8 liter per kgH ₂ (markt)	3,7 liter per kgH ₂ (Gubin)
	demiwater, volume na zuivering	
Elektriciteit proces en compressie	24,7 MJ/kgH ₂ (markt)	24,5 MJ/kgH ₂ (Gubin)
Zuurstof	6,1 kg per kgH ₂ (markt)	4,4 kg per kgH ₂ (markt)
Schaarse materialen	0,203 g Nikkel per kgH ₂ (overgenomen van SMR/ATR, bij gebrek aan andere kwantitatieve databron over katalysatoren voor vergassing)	
Bijproducten en emissies		
Biogene CO ₂	17,6 kg per kgH ₂ (markt)	22,4 kg per kgH ₂ (Gubin)
Aandeel CO ₂ -afvang	94%	57% (Gubin)
Biochar	In deze casussen is biochar geen bijproduct, optimalisatie naar H ₂	
Warmte (levering)	11,6 MJ/kgH ₂ (Gubin)	
Overige emissies	0,3 g VOC per kgH ₂ , 1,6 g CO per kgH ₂ , 0,34 g NO _x per kgH ₂ (na DeNO _x), 2 g SO ₂ per kgH ₂ (Salkuyeh) plus as en teer	
	0,1 g fijnstof per kgH ₂ (markt)	0,5 g fijnstof per kgH ₂ (Salkuyeh)
Waterstofverlies keten	0,2 g per kgH ₂ (overgenomen van andere technieken)	
Kosten		
CAPEX productie- incl. afvanginstallatie	3500 €/kW (markt)	5896 €/kW (schaling)
Aandeel herbruikbaar CAPEX	45%	0%
CAPEX CO ₂ -vervloeijing en terminal	-	€50 per tonCO ₂ (PBL)
Overige OPEX	2,9% van CAPEX (HE) Plus variabel 0,5 €/kgH ₂ (HE)	
Oppervlak	2.188 m ² per ktonH ₂ (markt, AGT)	

Gebruikte databronnen:

- Marktinformatie: data van initiatiefnemer voor biomassavergasingsfabriek in Nederland, onder meer over de CAPEX.
- AGT: Advanced Gasification Technologies – Review and Benchmarking. Technical assessment and economic analysis. Task 5 Report. BEIS Research Paper No. 2021/038. Prepared for BEIS by AECOM & Fichtner Consulting Engineers. October 2021.

- Gubin Veronica, Florian Benedikt, Ferdinand Thelen, Martin Hammerschmid, Tom Popov, Hermann Hofbauer, Stefan Müller (2024). Hydrogen production from woody biomass gasification: a techno-economic analysis. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 18:818–836.
- HE: Hydrogen Europe (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways. Report 2024.*
- JRC: 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.
- PBL: Sander Lensink en Emma Eggink (red.) (2025). Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2025, Planbureau voor de Leefomgeving publicatienummer 5472.
- Salkuyeh, Yaser Khojasteh, Bradley A. Saville, Heather L. MacLean (2018). Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from different biomass gasification processes. *International Journal of Hydrogen Energy* **43**, 9514-9528.

VERGASSING VAN AFVAL MET CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

Vergassing van niet-herbruikbaar of recyclebaar huishoudelijk en industrieel afval is een alternatief voor (storten of) verbranden. Dit past in de circulaire economie: afval afbreken tot bruikbare chemicaliën is hoogwaardiger dan elektriciteitsproductie, zeker als dat met laag rendement gebeurt.

Vergassing kan met verschillende reactortechnieken en naar verschillende eindproducten. Vergassing naar eindproduct waterstof gebeurt nog niet, en naar andere producten nog mondjesmaat (het verst was een Canadese fabriek die van 2016 tot 2024 in bedrijf was). De TRL wordt ingeschat op TRL 8. In Nederland is er nu het initiatief FUREC van RWE, die op Chemelot waterstof door afvalvergassing wil maken.

De MER van FUREC is gebruikt als bron voor een deel van de benodigde informatie. Onze analyse spitst zich echter niet toe op beoordeling van het FUREC-project. We gebruiken ook andere uitgangspunten dan die gelden voor dit project (onder andere aandeel biogeen afval, en uitgangspunt aanvullende waterstofproductie in plaats van vervanging). De FUREC-techniek is aantrekkelijker voor grootschalige productie (scenario 1) dan voor kleinschalige productie (scenario 2). Het bedrijf DOPS ontwikkelt een andere techniek (thermolysen) die op kleinere schaal aantrekkelijk kan zijn. Deze techniek is niet beoordeeld en kan een kansrijke toekomstige productietechniek zijn.

Afvalvergassing omvat een reeks van chemische reactievergelijkingen, die ook wordt samengevat als: $\text{Afval} + \text{O}_2$ (of H_2O) $\rightarrow$ CO , CO_2 , H_2 , H_2O , CH_4 + andere CH's + teer + as (vóór reiniging en water-gas-shift-reactie voor maximale waterstofopbrengst). Zie Figuur 30 voor het processchema.

Grond- en hulpstoffen en energie

De beoogde grondstof voor FUREC is *solid recoverable fuel* (SRF), een restfractie die bestaat uit biomassa, kunststoffen, textiel en papier. Deze resteert nadat nascheiding van mineralen en metalen heeft plaatsgevonden en is ongeschikt voor traditionele vormen van (materiaal)recycling. Het afval wordt voor gebruik gedroogd, ontdaan van verontreinigingen zoals glas en metaal, verkleind en tot pellets geperst. Zuurstof wordt onttrokken via een luchtscheidingsinstallatie. Voor de stoom en voor koelwater wordt demiwater gebruikt, en elektriciteit wordt gebruikt voor CO₂-afvang, compressie en de PSA.

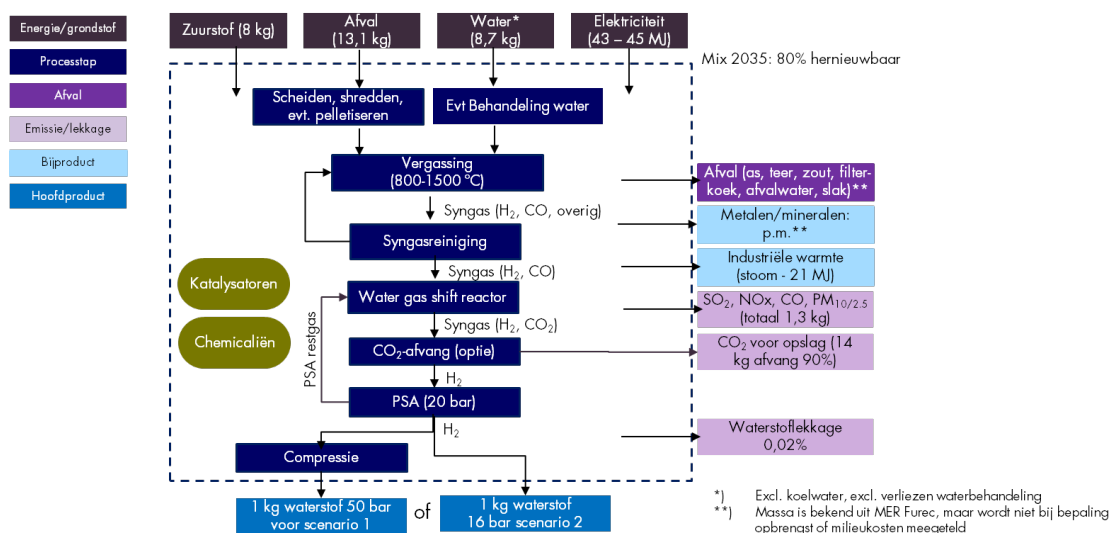
Voor een vergassinginstallatie die 50 kton waterstof maakt is 650 kton afval nodig. Een studie⁴⁷ over FUREC stelt dat door recyclingprocessen niet-recyclebaar afval beschikbaar komt, dat anders vanwege de lage kwaliteit en het energiepotentieel in AVI's zou zijn verbrand. Omdat afvalrecycling in Nederland zal toenemen om te voldoen aan de groeiende vraag naar secundaire grondstoffen, zal ook het volume niet-recyclebaar afval groeien, naar verwachting van 7,7 Mton in 2016 tot 8,4 Mton in 2030. Dit verschil is voldoende voor een afvalvergassingsfabriek voor 50 ktonH₂.

Installatie

Na de voorbehandeling vinden de vergassings- en/of pyrolyse reacties plaats in de reactor boven een katalysator bij een temperatuur van 800-1500°C (afhankelijk van reactortype). Net als bij houtrestenvergassing worden syngas en bijproducten geproduceerd. Het afval en de bijproducten zijn afhankelijk van de technologie en de grondstof. Het syngas wordt ontdaan van deze verbindingen voor verdere opwerking. Afhankelijk van de reactor kan het gereinigde syngas worden gereformeerd met stoom, waarna de waterstofopbrengst wordt verhoogd met de water-gas-shift-reactie. De CO₂ wordt uit de stroom afgevangen.

Producten en emissies

De waterstof wordt met PSA op hoge zuiverheid gebracht (>99,99%). Voor invoeding in het regionale waterstofnetwerk is geen extra compressie nodig, voor het landelijke waterstofnetwerk wel. De afgevangen CO₂ wordt per buisleiding vervoerd naar de opslaglocatie, of (in scenario 2) vloeibaar gemaakt en per transportschip naar de tussenopslag-terminal gebracht. Vrijkomende warmte kan worden geleverd aan een industrieel warmtenet (aanneem in scenario 1) of stadswarmtenet (aanneem in scenario 2). Afvalstromen betreffen as, teer, zout, en filterkoek en afvalwater van de waterzuivering. Ook is er geringe lekkage van waterstof in de keten en geringe luchtmissies van SO₂, NO_x, CO, en fijnstof.



Figuur 30: Processchema afvalvergassing met CCS

⁴⁷ Strategy& (2024), Study on the future chemical raw material value chain and the role of alternative waste processing technologies, Final report, 20 December 2024.

Data voor modellering afvalvergassing met CCS

Afvalvergassing met CCS	Scenario 1 en 2
Productie-uren per jaar	8000
Grond- en hulpstoffen en energie	
Afval (solid recovered fuel)	13,1 kg per kgH ₂ (MER)
Watergebruik proces	8,7 liter/kgH ₂ (MER) demiwater, volume na zuivering
Watergebruik koeling	23,0 liter/kgH ₂ (MER) demiwater in circulerend systeem, volume na zuivering
Elektriciteit proces en compressie	Sc.1: 45,3 MJ/kgH ₂ Sc.2: 43,5 MJ/kgH ₂ (MER, JRC)
Zuurstof	8 kg per kgH ₂ (MER)
Natronloog	0,13 liter per kgH ₂ (MER)
Schaarse materialen	0,203 g Nikkel per kgH ₂ (overgenomen van SMR/ATR, bij gebrek aan andere kwantitatieve databron over katalysatoren voor vergassing)
Bijproducten en emissies	
CO ₂	13,6 kg per kgH ₂ (MER)
Aandeel CO ₂ -afvang	94% afgevangen (aannname)
Overige emissies	0,23 g NO _x per kgH ₂ , 0,3 g CO per kgH ₂ , 0,9 g SO ₂ kgH ₂ , 0,0005 g NH ₃ per kgH ₂ , plus as, teer, slak, zout, zwavel, afvalwater (MER)
Warmte (levering)	20,9 MJ/kgH ₂ (MER)
Waterstofverlies keten	0,2 g per kgH ₂ (overgenomen van andere technieken)
Metalen	0,44 kg per kgH ₂ (MER)
Mineralen	0,69 kg per kgH ₂ (MER)
Kosten	
CAPEX	Sc.1: 3500 €/kW (PBL) Sc.2: 5896 €/kW (schaling o.b.v. PBL)
Aandeel herbruikbaar CAPEX	Sc.1: 45% Sc.2: 0%
CAPEX CO ₂ -vervloeiing en terminal	Sc.2: €50 per ton CO ₂ (PBL)
Overige OPEX	4,8% van CAPEX (PBL)
Oppervlak	2.385 m ² per ktonH ₂ (AGT)

Gebruikte databronnen:

- AGT: Advanced Gasification Technologies – Review and Benchmarking. Technical assessment and economic analysis. Task 5 Report. BEIS Research Paper No. 2021/038. Prepared for BEIS by AECOM & Fichtner Consulting Engineers. October 2021.
- JRC: 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.
- MER: RHDHV (2024), Milieueffectrapport (MER) FUREC Chemelot. Syngasproductie uit afvalstoffen op Chemelot, Klant: RWE Generation NL B.V. Referentie: BH2364RP002F02. 6 december 2024.
- Sander Lensink en Emma Eggink (red.) (2025). Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2025, Planbureau voor de Leefomgeving publicatienummer 5472. Deze publicatie geeft een kostenopbouw voor 50 kton/jaar H₂-productie, met CAPEX 3.500 €/kW.

VERGISTING VAN RIOOLSLIB

Naast vergassing is vergisting een andere productietechniek om met biomassa als grondstof waterstof te maken. Bij 'dark fermentation' (DF) produceren anaërobe micro-organismen waterstof met behulp van koolhydraatrijk substraat, zonder licht (vandaar 'dark'). Voordelen van deze techniek zijn eenvoudige operationele vereisten, stabiele waterstofproductie en laag energieverbruik. Nadelen zijn de lage opbrengst per eenheid biomassa.

We hebben gekozen voor DF-vergisting van rioolslib, een afvalstroom die nu nog vaak wordt verbrand, of steeds vaker vergist naar biogas (50-60% methaan, de rest CO₂ en verontreinigingen) en digestaat. Voor deze productietechniek hebben we een Canadese studie gevonden

die complete en transparante data bevat. DF-centrales produceren waterstof, digestaat en CO₂, samen met vetzuren als waardevolle bijproducten.⁴⁸ NB. we maken geen integrale vergelijking tussen rioolslibvergisting naar waterstof en rioolslibvergisting naar biogas, en doen daarom ook geen uitspraken over of het één 'beter' is dan de ander. Zie Figuur 31 voor het proces-schema.

Grond- en hulpstoffen en energie

De kern van slibvergisting is de afbraak en omzetting van organische componenten in slib tot waterstof door bacteriën. Het proces omvat complexe enzymatische reacties in twee stappen. Eerst breken hydrolytische bacteriën onder zure omstandigheden de grote organische moleculen in het slib af, zoals koolhydraten, eiwitten en lipiden. Dit gebeurt onder condities die de methaanvormende en waterstofverterende bacteriën onderdrukken. Dit levert kleinere oplosbare organische moleculen op, waaronder aminozuren, suikers, glycerol en langeketenvetzuren. Vervolgens zetten microben de suikers om in vluchtige vetzuren, waterstof en CO₂ in de stappen acidogenese en acetogenese. Alle stappen vinden plaats bij gematigde temperatuur (37-70°C). Lagetemperatuur-stoom en elektriciteit leveren de procesenergie.

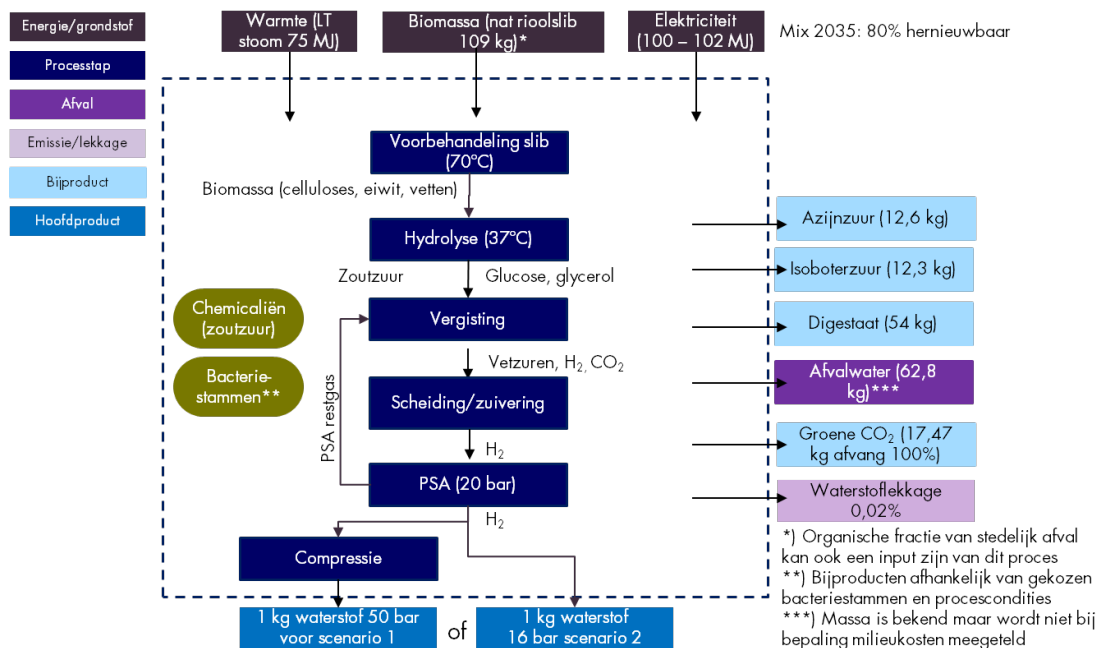
Installatie

Het proces omvat slibvoorbehandeling, hydrolyse, fermentatie en nabehandeling van de producten door middel van scheiding en zuivering. De benodigde apparatuur omvat standaard fermentatietanks, reactortanks, mixers, pompen, verwarming, distillatiekolommen en PSA. De keuze van de bacteriën is het meest gevoelig en bij verstoringen kan sprake zijn van afsterven van de kolonie waardoor de vergisting stopt.

Producten en emissies

De waterstof wordt met PSA op hoge zuiverheid gebracht (>99,99%). Voor invoeding in het regionale waterstofnetwerk is geen extra compressie nodig, voor het landelijke waterstofnetwerk wel. Er zijn meerdere waardevolle bijproducten, namelijk azijnzuur, isoboterzuur, biogene CO₂ en digestaat. Er zijn geen andere emissies dan afvalwater van de waterzuivering. Wel is er geringe lekkage van waterstof in de keten.

⁴⁸ In Nederland heeft STOWA onderzoek gedaan naar vetzuurproductie op RWZI als onderdeel van biogasproductie, waarbij bacteriën de tussentijds vrijkomende waterstof omzetten naar methaan (methanogenese). STOWA (2023). Vetzuurproductie op RWZI's. STOWA2023-34. Het rapport vermeldt dat er met verschillende waterschappen werd gesproken over een demonstratieproject.



Figuur 31: Processchema rioolslibvergisting

Data voor modellering rioolslibvergisting naar waterstof

Deze casus is uitgewerkt met data van een techno-economische case studie waarin 500 ton slib per dag wordt vergist naar jaarlijks 1,55 kton H₂ (Alam en Nayan 2024). Voor deze productie is dus 182,3 kton/jaar rioolslib nodig. In heel Nederland is jaarlijks 1,9 miljoen ton slib beschikbaar.⁴⁹ Dat betekent dat er bij lange na niet genoeg slib is voor scenario 1, en dat scenario 2 alleen haalbaar is als er slib vanuit grote delen van het land aangevoerd zou worden. Dat is niet realistisch. De praktijk is dat er slibvergisting (naar biogas) plaatsvindt op de grotere RWZI's, en dat er rioolslib aangevoerd wordt voor centrale slibvergisting vanuit kleinere RWZI's in de regio.

⁴⁹ <https://unievanwaterschappen.nl/waterkwaliteit/slibverwerking/> Jaarlijks ontstaat bijna 1,4 miljoen ton ontwaterd slib met droge stofgehalte van zo'n 40%. Dit heeft een soortelijk gewicht van omstreeks 1,4 kg/liter, ten opzichte van primair slib omstreeks 1,02 kg/liter. Dit brengt de hoeveelheid primair slib op 1,9 miljoen ton per jaar.

Slibvergisting	Scenario 1 en 2
Productie-uren per jaar	8000
Grond- en hulpstoffen en energie	
Rioolslib	109 kg per kgH ₂ (Alam) 75% primair slib, 25% surplusslib uit vergisting
Watergebruik koeling	51,2 liter per kgH ₂ (berekend met Alam) effluentwater uit de betreffende waterzuivering
Elektriciteit proces en compressie	Sc.1: 101,8 MJ/kgH ₂ Sc.2: 100,0 (Alam, JRC)
Warmte	75,2 MJ/kgH ₂ (Alam)
Zoutzuur	0,11 liter per kgH ₂ (Alam)
Schaarse materialen	Geen
Bijproducten en emissies	
Aziijnzuur	12,6 kg per kgH ₂ (Alam)
Isoboterzuur	12,3 kg per kgH ₂ (Alam)
Biogene CO ₂	17,5 kg per kgH ₂ (Alam)
Digestaat	54 kg per kgH ₂ (Alam)
Afvalwater	62,8 kg per kgH ₂ (Alam)
Overige emissies	Geen
Waterstofverlies keten	0,2 g per kgH ₂ (overgenomen van andere technieken)
Kosten	
CAPEX productie- incl. afvanginstallatie	5.750 €/kW (berekend met Alam, geen effect schaling)
CAPEX CO ₂ -vervloeijing en terminal	Sc.2: €50 per ton CO ₂ (PBL)
Overige OPEX	7% van CAPEX (Alam)
Oppervlak	9.440 m ² per ktonH ₂ (MER RWZI Den Bosch)

Gebruikte databronnen:

- Alam, Monisha, Nusra Fatema Nayan (2024). Techno-Economic Assessment of Biohydrogen Production from Dark Fermentation of Wastewater Sludge. Preprint. University of Alberta, 5 February 2024. Deze publicatie geeft een kostenopbouw voor 1,55 kton/jaar H₂-productie, met CAPEX 5.750 €/kW. We hebben deze CAPEX niet geschaald naar grotere installaties omdat dit gezien de beperkte hoeveelheden rioolslib in Nederland niet realistisch is.
- JRC: 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.
- Oxford: Oxford Institute for Energy Studies (2024). Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain: Environmental Impact, Mitigation, and Recommendations for Sustainable Deployment. November 2024.
- RHDHV: MER RWZI's 's Hertogenbosch, februari 2014.

ONTLEDING VAN WATER (THERMOLYSE)

Water ontleedt bij temperaturen boven 2000°C in één stap tot waterstof en zuurstof. Door gebruik te maken van meerdere thermochemische reactiecycli kan water bij lagere temperaturen worden gesplitst. Water ontleedt dan in stappen via een zich herhalende reeks van tussenliggende reacties en met behulp van stoffen die tijdens het proces worden gerecycled. Er zijn uiteenlopende cycli voorgesteld, wij hebben gekozen voor de tweestaps ceriumcyclus omdat we hierover in de literatuur een goede transparante dataset hebben gevonden. Andere cycli zijn bijvoorbeeld de koper-chloor-cyclus en de zwavelcyclus. Waterontleding met thermochemische reactiecycli is nog experimenteel en schatten we nu op TRL 5 en in 2035 op TRL 6.

De reactievergelijking is net als bij elektrolyse van water: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$. In de ceriumcyclus zijn de zich herhalende tussenstappen: reductie via $2\text{CeO}_2 \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2$; oxidatie via $\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CeO}_2 + \text{H}_2$. Zie Figuur 32 voor het processchema.

Voor de benodigde zeerhogetemperatuur-warmte voor waterontleding wordt in de literatuur meestal naar Concentrated Solar Power of kerncentrales gekeken. De eerste optie is niet kansrijk in Nederland en de tweede is buiten scope van deze studie. Daarom zijn we voor de modellering uitgegaan van de metallurgische industrie als bron van zeerhogetemperatuur-warmte.⁵⁰

Grond- en hulpstoffen en energie

De grondstof is zuiver water (demiwater). De zeerhogetemperatuur-warmte is afkomstig van metallurgische industrie en wordt gebruikt om de reactiekamer voor de reductiereactie te verhitten (1200°C bij lage druk). We hebben niet uitgewerkt hoe deze warmte dan van de bron bij de reactor komt. Elektriciteit wordt gebruikt voor compressie van de waterstof. Als reagents gaan we uit van ceriumdeeltjes. Cerium is een duur element dat op de Europese lijst van kritieke grondstoffen staat. Het wordt in het proces niet opgemaakt, al wordt in de literatuur wel melding gemaakt van lichte degradatie van het materiaal.

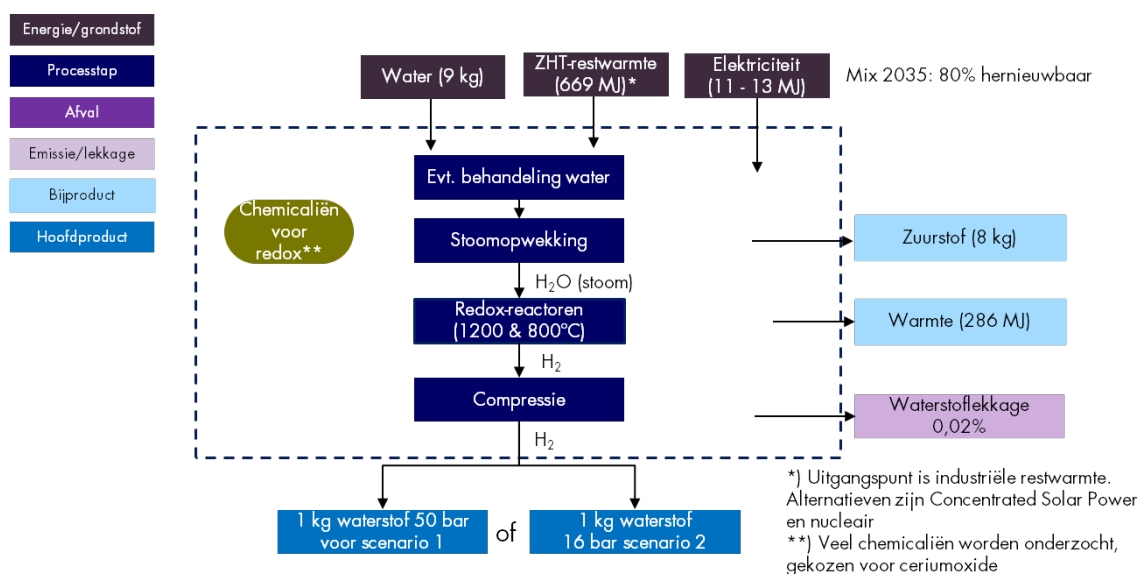
Installatie

De installatie bestaat uit twee gescheiden reactiekamers die met elkaar verbonden zijn via leidingen waardoor zich het reagens (de ceriumdeeltjes) verplaatst en die ook benut worden voor warmtewisseling. Met deze warmte wordt stoom opgewekt voor de oxidatiereactie in de andere reactiekamer (800°C bij lage druk). In verdere cascadering komt warmte vrij voor externe levering. De installatie kent een relatief eenvoudig ontwerp, maar door de hoge temperaturen is de materiaalkeuze voor de reactor een lastig vraagstuk.

Producten en emissies

De waterstof komt op hoge zuiverheid uit het proces (>99,99%). Voor invoeding in het landelijke of regionale waterstofnetwerk is compressie nodig. De zuurstof komt eveneens zeer zuiver vrij en kan als bijproduct worden verkocht. In de praktijk is dit echter lastig gezien de hoeveelheden en afstand naar eventuele gebruikers. Vrijkomende warmte kan worden geleverd aan een industrieel warmtenet (aanneمة in scenario 1) of stadswarmtenet (aanneمة in scenario 2). Er zijn geen andere emissies dan afvalwater van de waterzuivering. Wel is er geringe lekkage van waterstof in de keten.

⁵⁰ Dashtizadeh et al. hebben onderzocht hoe de restwarmte van een vlamboogoven kan worden gebruikt voor waterontleding via de vanadium-chloor-reactiecyclus, om de waterstof in de staalproductie te gebruiken. Ebrahim Dashtizadeh, Mahdi Mehrpour Darestani, Shayan Rostami, Mehdi Ashjaee, Ehsan Houshfar (2024). Comparative optimization study and 4E analysis of hybrid hydrogen production systems based on PEM, and VCI methods utilizing steel industry waste heat. *Energy Conversion and Management* **303**, 118141. Darmawan et al. hebben waterontleding met industriële restwarmte onderzocht via de koper-chloor-reactiecyclus. Arif Darmawana, Pramesi Atmirabektib, Nasruddin Nasruddinb, Eniya Listiani Dewia, Abdul Hamid Budimana, Muhammad Aziz (2023). Efficient Utilization of Industrial Waste Heat for Hydrogen Production via Cu-Cl Thermochemical Water Splitting Cycle. *Chemical Engineering Transactions* **103**, 565-570. Volgens recent onderzoek kan de temperatuur waarbij CeO₂ gereduceerd wordt dalen tot beneden 1000°C door een elektrisch veld aan te leggen. Jonathan Perry, Alberto de la Calle, Timothy W. Jones, Scott W. Donne, Juan M. Coronado, Alicia Bayon (2025). Electrically Assisted Thermochemical Water Splitting Based on Ceria. *International Journal of Hydrogen Energy*, available online 2 April 2025, in press, corrected proof.



Figuur 32: Processchema thermolyse water

Data voor modellering waterontleding

Waterontleding	Scenario 1 en 2
Productie-uren per jaar	8000
Grond- en hulpstoffen en energie	
Watergebruik proces	9 liter/kgH ₂ (Onigbajumo) demiwater, volume na zuivering
Watergebruik koeling	22 liter/kgH ₂ (Onigbajumo) demiwater in circulerend systeem, volume na zuivering
Zeerhogetemperatuur-warmte	669,4 MJ/kgH ₂ (Budama)
Elektriciteit proces en compressie	Sc.1: 12,8 MJ/kgH ₂ Sc.2: 11,0 MJ/kgH ₂ (Falter, JRC, PBL)
Schaarse materialen	0,5 kg Cerium per kgH ₂ (Budama)
Bijproducten en emissies	
Zuurstof	8 kg per kgH ₂ (stoichiometrisch)
Emissies	Geen
Warmte (levering)	286,1 MJ/kgH ₂
Waterstofverlies keten	0,2 g per kgH ₂ (overgenomen van andere technieken)
Kosten	
CAPEX	Sc.1: 2744 €/kW Sc.2: 4623 €/kW (schaling o.b.v. Onigbajumo en inflatiecorrectie 2019-2024)
Ceriumoxidedeeltjes	1,67 € kgH ₂ (Onigbajumo)
Overige OPEX	5% van CAPEX (Onigbajumo)
Oppervlak	3.482 m ² per ktonH ₂ (Onigbajumo)

Gebruikte databronnen:

- Budama, Vishnu Kumar, Nathan G. Johnson, Ivan Ermanoski, Ellen B. Stechel (2021), Techno-economic Analysis of Thermochemical Water-splitting System for Co-production of Hydrogen and Electricity. *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 2, January 2021, 1656-1670.
- Falter, C., Sizmann, A. (2021). Solar Thermochemical Hydrogen Production in the USA. *Sustainability* 2021, 13, 7804.
- JRC: 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.
- Onigbajumo, Adetunji, Priyanka Swarnkar, Geoffrey Will, Thirumalachari Sundararajan, Alireza Taghipour, Sara Couperthwaite, Ted Steinberg, Thomas Rainey (2022). Techno-economic evaluation of solar-driven

ceria thermochemical water-splitting for hydrogen production in a fluidized bed reactor. *Journal of Cleaner Production* **371**, 133303. Deze publicatie geeft een kostenopbouw voor 1,6 kton/jaar H₂-productie, met CAPEX 6.443 €/kW.

ONTLEDING VAN METHAAN (PYROLYSE)

Ontleding van methaan, ook wel methaanpyrolyse genoemd, is het chemische proces om waterstof en vast koolstof te scheiden door droge splitsing van methaan (bij afwezigheid van water). De reactievergelijking is: $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$.

Er zijn verschillende technieken voor methaanontleding op verschillende TRL's, in de hoofdcategorieën thermische, katalytische en plasmareactie.

Technologisch onderzoek en ontwikkeling richten zich op het verbeteren van de zuiverheid van waterstof, de vorm en kwaliteit van het vaste koolstofbijproduct, het energieverbruik, de levensduur van de reactor, de prijs en beschikbaarheid van eventueel gebruikte katalysatoren, en de overgang van batchproductie naar continue productie.

Voor genoemde alternatieve productietechnieken worden momenteel zowel pilot-, demonstratie- als commerciële installaties gebouwd. Wij kiezen voor plasma, omdat dit de techniek is van de grootste commerciële installatie (Monolith in de VS), omdat er in Nederland aan gewerkt wordt door de firma Thoriant (spin-off van TNO, Universiteit Maastricht en Brightsite), en omdat we hier complete datasets voor hebben gevonden (mede via Thoriant). Zie Figuur 33 voor het processchema.

Grond- en hulpstoffen en energie

De grondstof van het proces is methaan uit aardgas. Het aardgas wordt voorbehandeld om een zo zuiver mogelijk bijproduct koolstof te verkrijgen en om emissies te voorkomen. Stikstof, zuurstof en zwaardere koolwaterstoffen worden verwijderd. Voor de reactie is geen water nodig, wel koelwater voor het opwerken van het bijproduct (demiwater). Elektriciteit wordt gebruikt voor opwekken van het plasma, compressie en de PSA.

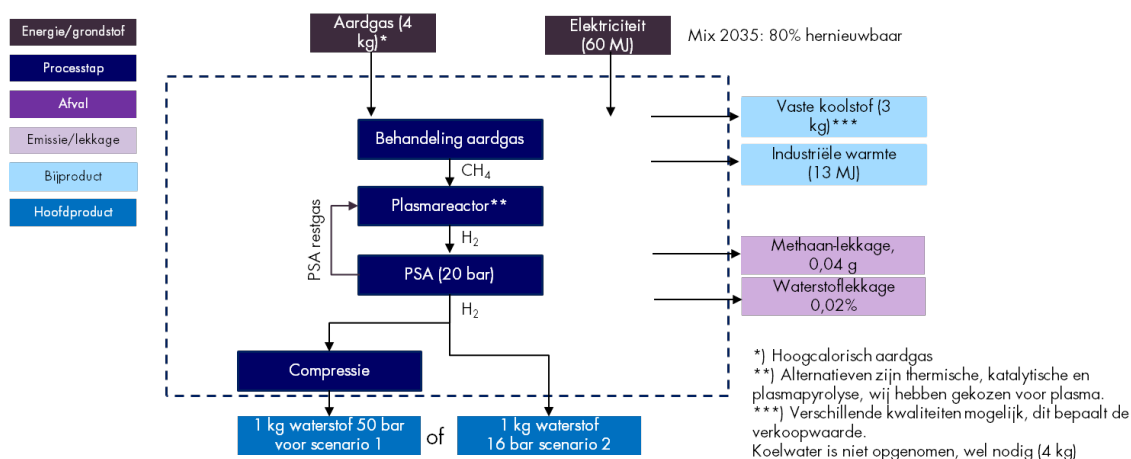
Installatie

Bij plasmapyrolyse levert plasma – een sterk geïoniseerd of elektrisch geladen gas vergelijkbaar met een bliksemschicht - de energie die nodig is voor de ontleding van methaan in waterstof en vast koolstof. Plasma bereikt zeer hoge temperaturen van mogelijk duizenden °C, en de kunst bij een plasmareactor is om deze hitte vast te houden zonder verliezen. De procescondities en zuiverheid van aardgas/methaan bepalen de zuiverheid en daarmee verkoopwaarde van het bijproduct vaste koolstof.

Producten en emissies

De waterstof wordt met PSA op hoge zuiverheid gebracht (>99,99%). Voor invoeding in het regionale waterstofnetwerk is geen extra compressie nodig, voor het landelijke waterstofnetwerk wel. Er komt geen CO₂ vrij in het proces. Als onzuiver methaan wordt gebruikt zijn overige emissies wel mogelijk, zoals stikstofverbindingen, en dan is nabehandeling nodig. Vrijkomende warmte kan worden geleverd aan een industrieel warmtenet (aanneمة in scenario 1) of stads-warmtenet (aanneمة in scenario 2). Er zijn geen andere emissies dan afvalwater van de waterzuivering. Wel is er geringe lekkage van methaan en waterstof in de keten.

Het is ook mogelijk om het proces van methaanpyrolyse te sturen naar productie van ethyleen (C₂H₄) of acetyleen (C₂H₂), wat bruikbare bouwstenen voor de chemische industrie zijn en een toekomstige optie als de markt voor vast koolstof verzadigd raakt.



Figuur 33: Processchema ontleding methaan

Data voor modellering methaanontleding

Methaanontleding	Scenario 1 en 2
Productie-uren per jaar	8000
Grond- en hulpstoffen en energie	
Aardgas (hoogcalorisch)	4,0 kg per kgH ₂ (stoichiometrisch, 90% CH ₄ in hoogcalorisch aardgas)
Watergebruik proces	Geen
Watergebruik koeling	3,84 liter/kgH ₂ (Teymouri)
	demiwater in circulerend systeem, volume na zuivering
Elektriciteit	Sc. 1: 60,1 MJ/kgH ₂ Sc. 2: 58,3 MJ/kgH ₂ (Teymouri, JRC)
Schaarse materialen	Geen
Bijproducten en emissies	
Vast koolstof	3,0 kg per kgH ₂ (Thoriant)
CO ₂ -emissie	Geen
Overige emissies	Thoriant: door voorzuivering aardgas en nabehandeling zo goed als nul
Warmte (levering)	12,6 MJ/kgH ₂ (Teymouri)
Waterstofverlies keten	0,2 g per kgH ₂ (Oxford)
Aardgasverlies keten	0,04 g per kgH ₂ (JRC)
Kosten	
CAPEX	Sc. 1: 1928 €/kW Sc. 2: 3249 €/kW (schaling o.b.v. Teymouri, marktinformatie, inflatiecorrectie 2021-2024)
Overige OPEX	4,8% van CAPEX (HE)
Oppervlak	2.024 m ² per ktonH ₂ (Monolith, greenfield situatie, kan aanmerkelijk kleiner in geval van brownfield situatie)

Gebruikte databronnen:

- HE: Hydrogen Europe (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways. Report 2024*.
- JRC: 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.
- Monolith: Clean Production of Carbon Black Expands to Nebraska, <https://www.benesch.com/clean-production-of-carbon-black-expands-to-nebraska/>
- Oxford: Oxford Institute for Energy Studies (2024). *Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain: Environmental Impact, Mitigation, and Recommendations for Sustainable Deployment*. November 2024.
- Teymouri: Navid Teymouri (2023). *Electrified Natural Gas Pyrolysis to Produce Low-Carbon Hydrogen*. Thesis. Concordia University, Montreal. August 2023. Deze publicatie geeft een kostenopbouw voor 32,85 kton/jaar H₂-productie, met CAPEX 1.800 €/kW.

- Aannames zijn geverifieerd door TNO/Thoriant.

STEAM METHANE REFORMING MET EN ZONDER CCS

Steam methane reforming (SMR) is het chemische proces om aardgas samen met water (stoom) om te zetten naar waterstof en CO en vervolgens CO₂, afhankelijk van de vraag (is er alleen behoefte aan waterstof, of ook aan CO voor chemie). Deze studie gaat uit van maximale waterstofopbrengst. Het is de dominante industriële methode voor de productie van waterstof (TRL 9), ontwikkeld aan het begin van de 20^e eeuw. Het is mogelijk om bestaande of nieuwe SMR-installaties te voorzien van CO₂-afvang.

De reactievergelijkingen zijn: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$, gevolgd door $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Samen is dit: $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$. Zie Figuur 34 voor het processchema.

Grond- en hulpstoffen en energie

De grondstoffen van het proces zijn stoom en aardgas. De benodigde verhouding ("steam to carbon ratio") hangt af van de gewenste eindproducten (maximaal waterstof of ook CO). Aardgas wordt voorbehandeld om de katalysator in de reactor te beschermen. Dit betreft ontzwaveling en eventueel pre-reforming om zwaardere koolwaterstoffen in het aardgas (ethaan, propaan en butaan) om te zetten in eenvoudigere moleculen voordat de gasstroom de hoofdreactor binnenkomt. Voor de stoom en voor koelwater wordt demiwater gebruikt.

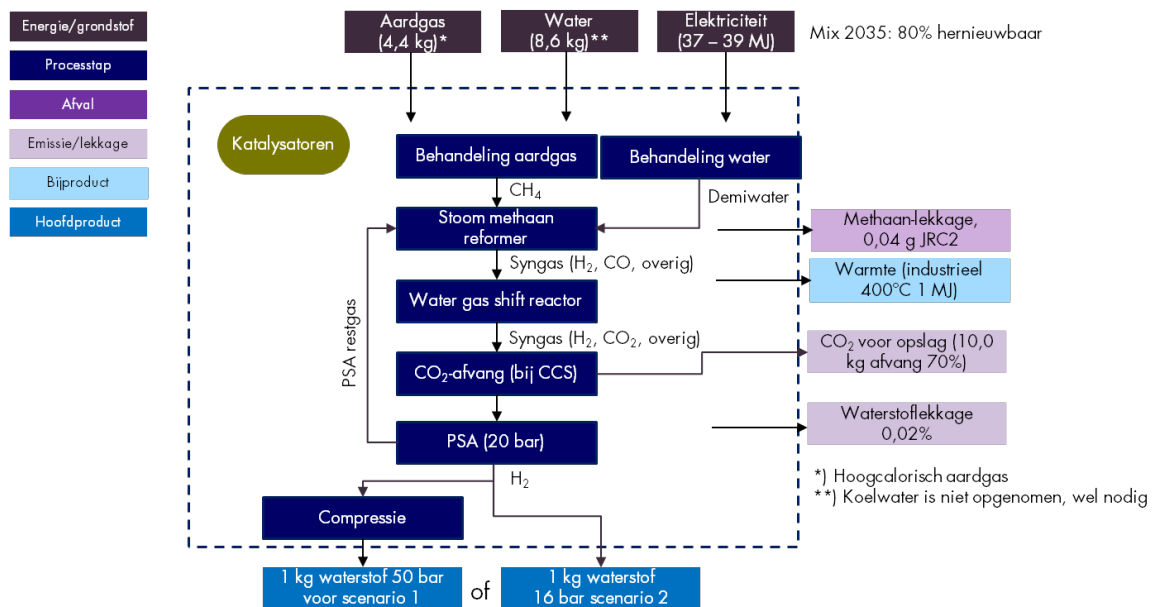
Installatie

SMR omvat de reactie van methaan met stoom boven een nikkel-katalysator bij hoge temperaturen om syngas (waterstof en koolmonoxide) te produceren. Daarna verhoogt de water-gas-shiftreactie de waterstofopbrengst in het geproduceerde syngas. Retrofitten van CO₂-afvangtechnologie op de procesgasstroom van bestaande SMR-installaties haalt ongeveer 60% afvang (zonder ondervuring). Dit vermindert de energie-efficiëntie van het proces en verhoogt de kosten van de waterstof. Bij nieuw te ontwerpen SMR kan de afvang worden gericht op het rookgas van het SMR-proces om een efficiëntie van 90% afvang of hoger te bereiken. Wij gaan in deze studie uit van retrofit van bestaande SMR.

Producten en emissies

De waterstof wordt met PSA op hoge zuiverheid gebracht (>99,99%). Voor invoeding in het regionale waterstofnetwerk is geen extra compressie nodig, voor het landelijke waterstofnetwerk wel. In het geval van SMR met CCS wordt de afgevangen CO₂ per buisleiding vervoerd naar de opslaglocatie, of (in scenario 2) vloeibaar gemaakt en per transportschip naar de tussenopslagterminal gebracht. Vrijkomende warmte kan worden geleverd aan een industrieel warmtenet (aannname in scenario 1) of stadswarmtenet (aannname in scenario 2). Er zijn geen andere emissies dan afvalwater van de waterzuivering. Wel is er geringe lekkage van methaan en waterstof in de keten.

Voor retrofit van een bestaande SMR-installatie met CO₂-afvang wordt doorgaans uitgegaan van 60% afvang. Op basis van informatie van een waterstofproducent die internationaal diverse SMR-installaties bedrijft, hebben we vastgesteld dat de drempel van 70% CO₂-reductie gehaald kan worden door een deel van de geproduceerde waterstof bij te mengen in de aardgasstroom voor de stoomopwekking (ondervuring). Dit leidt wel tot een hogere input van aardgas (we rekenen met 10%). We hebben deze getallen als uitgangspunt genomen voor de modellering.



Figuur 34: Processchema SMR met en zonder CCS (cijfers van SMR+CCS)

Data voor modellering SMR zonder en met CCS

	SMR	SMR met CCS
Productie-uren per jaar	8000	
Grond- en hulpstoffen en energie		
Aardgas (hoogcalorisch)	3,90 kg per kgH ₂ (marktinformatie) inclusief 10% extra aardgas voor bijmengen waterstof	4,39 kg per kgH ₂ (marktinformatie) inclusief 10% extra aardgas voor bijmengen waterstof
Watergebruik proces	8,59 liter/kgH ₂ (marktinformatie) demiwater, volume na zuivering	
Watergebruik koeling	25 liter/kgH ₂ (marktinformatie)	50 liter/kgH ₂ (marktinformatie)
	demiwater in circulerend systeem, volume na zuivering	
Elektriciteit	Sc.1: 15,3 MJ/kgH ₂ Sc.2: 13,5 MJ/kgH ₂ (HE, JRC)	Sc1: 39,1 MJ/kgH ₂ Sc2: 37,3 MJ/kgH ₂ (HE,JRC,PBL)
Schaarse materialen	0,203 g Nikkel per kgH ₂ , 0,285 g Koper per kgH ₂ (JRC)	
Bijproducten en emissies		
CO ₂ -emissie	10,0 kg per kgH ₂ (marktinformatie)	70% afgevangen
Overige emissies	Nul aangenomen	
Warmte (levering)	1,26 MJ/kgH ₂ (JRC)	
Waterstofverlies keten	0,2 g per kgH ₂ (Oxford)	
Aardgasverlies keten	0,04 g per kgH ₂ (JRC)	
Kosten		
CAPEX productie-installatie	Sc.1: 642 €/kW (schaling o.b.v. HE) Sc.2: 1082 €/kW (schaling o.b.v. HE)	
CAPEX CCS	-	€194 per tonCO ₂ (PBL)
CAPEX CO ₂ -vervloeiing en terminal	-	Sc.2: €50 per tonCO ₂ (PBL)
Hergebruik CAPEX	> 68% maar niet relevant, want geen additionele investering in faciliteit nodig	Hergebruik additionele investering in CCS: 0%, geen andere investering in faciliteit nodig
Overige OPEX	4,0% van CAPEX (HE)	
Oppervlak	546 m ² per ktonH ₂ (HyDelta3)	

Gebruikte databronnen:

- Marktinformatie verkregen van een producent van waterstof met diverse SMR-installaties.
- HE: Hydrogen Europe (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways. Report 2024*. Deze publicatie geeft een kostenopbouw voor 80 kton/jaar H₂-productie, met CAPEX 550 €/kW.
- HyDelta3 (2024). D4c.2– Spatial requirement contours of hydrogen projects, TNO, 21 November 2024.
- JRC: 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.
- Oxford: Oxford Institute for Energy Studies (2024). Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain: Environmental Impact, Mitigation, and Recommendations for Sustainable Deployment. November 2024.
- PBL: Sander Lensink en Emma Eggink (red.) (2025). Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2025, Planbureau voor de Leefomgeving publicatienummer 5472.
- Rovere: Andrea Rovere (2019). Autothermal Reforming Plant with CCS: Techno-economic Investigation. Politecnico de Torino.

AUTOTHERMAL REFORMING MET CCS

Net als SMR is autothermische reforming (ATR) een chemisch proces om aardgas samen met water (stoom) om te zetten naar waterstof en CO₂, afhankelijk van de vraag (is er alleen behoefte aan waterstof, of ook aan CO voor chemie). Deze studie gaat uit van maximale waterstofopbrengst. Een belangrijk verschil is het gebruik van zuurstof bij ATR.

De reactievergelijkingen zijn: $4\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 10\text{H}_2 + 4\text{CO}$, gevolgd door $4\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CO}_2 + 4\text{H}_2$. Samen is dit: $4\text{CH}_4 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 14\text{H}_2 + 4\text{CO}_2$. Zie Figuur 35 voor het proces-schema.

Grond- en hulpstoffen en energie

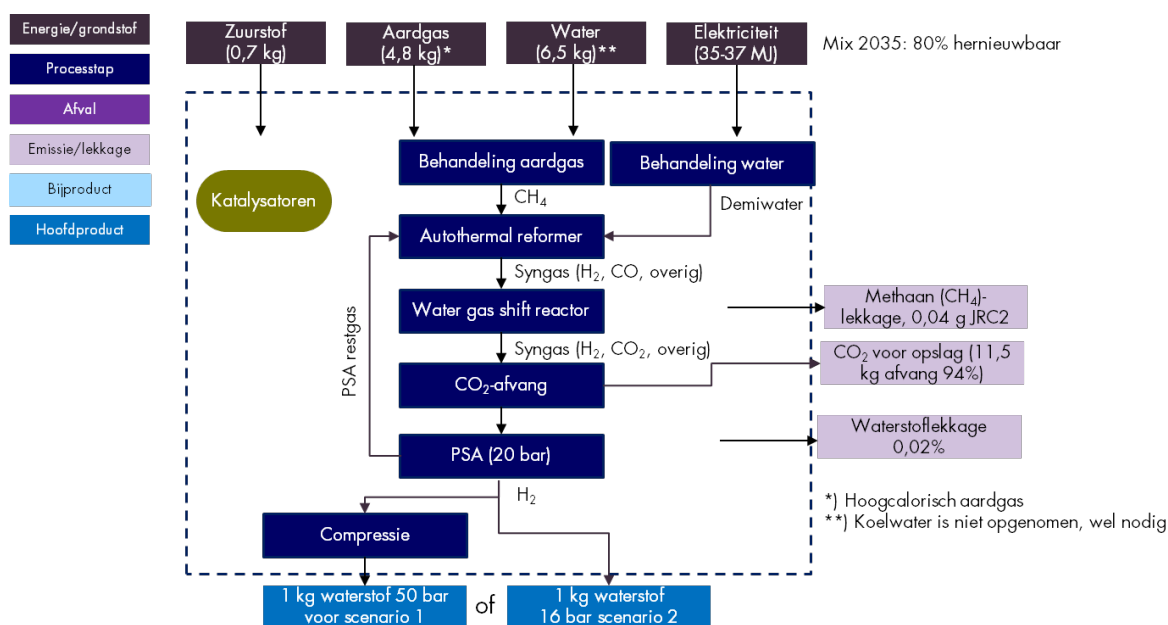
De grondstoffen van het proces zijn stoom, zuurstof en aardgas. Zuurstof wordt onttrokken via een luchtscheidingsinstallatie. Aardgas wordt voorbehandeld om de katalysator in de reactor te beschermen. Dit betreft ontwaveling en eventueel pre-reforming om zwaardere koolwaterstoffen in het aardgas (ethaan, propaan en butaan) te kraken naar eenvoudigere moleculen voordat de gasstroom de hoofdreactor binnenkomt. Voor de stoom en voor koelwater wordt demiwater gebruikt.

Installatie

ATR combineert stoom-methaanreforming en partiële oxidatie in één reactor. In de reactor reageert de zuurstof bij 900-1150°C met een deel van het methaan om koolmonoxide en waterstof te produceren via een exotherme reactie (partiële oxidatiereactie, hierbij komt warmte vrij). Deze warmte levert de energie die nodig is voor de endotherme stoomreformingreactie, waarbij methaan reageert met stoom om extra waterstof en koolmonoxide te produceren. Daarna verhoogt de water-gas-shiftreactie de waterstofopbrengst in het geproduceerde syngas, en levert een CO₂-stroom die door de zuiverheid efficiënt kan worden afgevangen (we gaan uit van 94% afvang).

Producten en emissies

De waterstof wordt met PSA op hoge zuiverheid gebracht (>99,99%). Voor invoeding in het regionale waterstofnetwerk is geen extra compressie nodig, voor het landelijke waterstofnetwerk wel. De afgevangen CO₂ wordt met buisleiding vervoerd naar de opslaglocatie, of (in scenario 2) vloeibaar gemaakt en per transportschip naar de tussenopslagterminal gebracht. Er is geen warmteopbrengst omdat alle vrijkomende warmte in het proces wordt gebruikt, en er zijn geen andere emissies dan afvalwater van de waterzuivering. Wel is er geringe lekkage van methaan en waterstof in de keten.



Figuur 35: Processchema autothermal reforming met CCS

Data voor modellering ATR met CCS

ATR met CCS	Scenario 1 en 2
Productie-uren per jaar	8000
Grond- en hulpstoffen en energie	
Aardgas (hoogcalorisch)	4,77 kg per kgH ₂ (marktinformatie)
Watergebruik proces	6,5 liter/kgH ₂ (marktinformatie en Rovere) demiwater, volume na zuivering
Watergebruik koeling	50 liter/kgH ₂ (marktinformatie) demiwater in circulerend systeem, volume na zuivering
Elektriciteit	Sc.1: 37,2 MJ/kgH ₂ Sc.2: 35,4 MJ/kgH ₂ (HE, JRC, PBL)
Zuurstof	0,7 kg per kgH ₂ (marktinformatie)
Schaarse materialen	0,203 g Nikkel per kgH ₂ , 0,285 g Koper per kgH ₂ (JRC)
Bijproducten en emissies	
CO ₂ -emissie	11,5 kg per kgH ₂ (marktinformatie), 94% afgevangen
Overige emissies	Nul aangenomen
Warmte (levering)	0 (in proces gebruikt)
Waterstofverlies keten	0,2 g per kgH ₂ (Oxford)
Aardgasverlies keten	0,04 g per kgH ₂ (JRC)
Kosten	
CAPEX productie- incl. afvanginstallatie	Sc.1: 1051 €/kW (schaling o.b.v. HE) Sc.2: 1771 €/kW (schaling o.b.v. HE)
Hergebruik CAPEX	Sc. 1: 68%
CAPEX CO ₂ -vervloeijing en terminal	Sc.2: €50 per ton CO ₂ (PBL)
Overige OPEX	3,5% van CAPEX (HE)
Oppervlak	563 m ² per ktonH ₂ (HyDelta3)

Gebruikte databronnen:

- Marktinformatie verkregen van een internationale producent van waterstof met ATR-installaties.
- HE: Hydrogen Europe (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways. Report 2024*. Deze publicatie geeft een kostenopbouw voor 80 kton/jaar H₂-productie, met CAPEX 900 €/kW.
- HyDelta3 (2024). D4c.2– Spatial requirement contours of hydrogen projects, TNO, 21 November 2024.

- JRC: 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.
- Oxford: Oxford Institute for Energy Studies (2024). Review of Hydrogen Leakage along the Supply Chain: Environmental Impact, Mitigation, and Recommendations for Sustainable Deployment. November 2024.
- PBL: Sander Lensink en Emma Eggink (red.) (2025). Eindadvies Basisbedragen SDE++ 2025, Planbureau voor de Leefomgeving publicatienummer 5472.
- Rain Saulnier, Keith Minnic, Kim Sturgess (2020). Water for the Hydrogen Economy, Watersmart Solutions.
- Rovere: Andrea Rovere (2019). Autothermal Reforming Plant with CCS: Techno-economic Investigation. Politecnico de Torino.
- PM Aannames zijn geverifieerd door een producent van waterstof met internationale ervaring met ATR.

BIJLAGE B: ALGEMENE UITGANGSPUNTEN BEREKENING

In deze bijlage gaan we in op algemene uitgangspunten en aannames die in de berekening van verschillende productietechnieken gebruikt worden. Deze worden dus gecombineerd met de data die in bijlage A gegeven zijn voor de afzonderlijke productietechnieken.

INFRASTRUCTUURKOSTEN

Kosten elektriciteitsnet

De kosten die in rekening worden gebracht voor gebruik van het elektriciteitsnet bestaan uit een eenmalige investering voor de aansluiting en vervolgens jaarlijks een bijdrage die afhangt van het aansluitvermogen. De meeste aansluitingen vallen onder het tarief dat geldt voor aansluitingen kleiner of gelijk aan 200 MWe (HS, Hoogspanningsnet). De elektrolyzers die in scenario 1 zijn verondersteld hebben een hoger aansluitvermogen. Hiervoor hebben we het tarief voor het Extra Hoogspanningsnet (EHS) gebruikt (380 kV), zie Tabel 7.

Tabel 7: Aannames berekening kosten elektriciteitsnet

Aansluitkosten elektriciteit	industriecusters en decentrale industrie mix	Decentrale industrie- 100% hernieuwbaar	Toelichting
Aandeel vaste aansluiting net van totaal vermogen	100%	30%	Keuze decentrale industrie bij 100% hernieuwbaar is schatting voor aandeel vermogen waarvoor back-up via net geregeld is.
Investering per MWe	€ 53.750	€ 53.750	Aanname 1000 m kabel + vaste vergoeding (bron CE Delft, pg 22)
Vaste jaarkosten	€ 2.760	€ 2.760	Tennet-tarief 2025 voor aansluiting ≤ 200 MW op HS-net
Jaarlijkse kosten per MWe*	€ 166.187	€ 166.187	Tennet-tarief 2025 voor aansluiting ≤ 200 MW op HS-net
Reservecapaciteit	10%	10%	Aanname dat 10% meer vermogen wordt aangevraagd dan nodig
Vaste jaarkosten	€ 12.479	€ 12.479	Tennet-tarief 2025 voor aansluiting > 200 MW op EHS-net
Jaarlijkse kosten per MWe*	€ 132.881	€ 132.881	Tennet-tarief 2025 voor aansluiting > 200 MW op EHS-net

*Tarief bestaat uit vast deel en variabel deel dat afhangt van piekvermogen per individuele maand. We hebben verondersteld dat elke maand wel 1x het maximale vermogen (zonder reserve-opslag) wordt gebruikt.

Kosten gasnet

De kosten voor een aansluiting op het landelijke aardgasnet voor industrieel gebruik hebben we gebaseerd op de door ACM gepubliceerde tarieven. Het bestaat uit de eenmalige kosten van een aansluiting, vaste kosten per jaar en een netwerkvergoeding die afhangt van het piekverbruik per uur, zie Tabel 8.

Tabel 8: Aannames berekening kosten gasnet

Aansluitkosten aardgas	Industrieclus- ters	Decentrale industrie	Toelichting
Exit-tarief grootaansluiting GTS	€ 3,272	€ 3,272	Exittarief per jaar voor piekcapaciteit in kWh per uur ACM
Investering gasaansluiting	€ 36.000	€ 31.000	
Vaste jaarkosten gas	€ 2.485	€ 2.485	

Kosten landelijk en regionaal waterstofnet

De kosten voor een aansluiting op het landelijke waterstofnetwerk in Nederland zijn afhankelijk van verschillende factoren en worden momenteel niet publiekelijk als vaste tarieven gepubliceerd. Volgens Hynetwork, de dochteronderneming van Gasunie die verantwoordelijk is voor het landelijke waterstofnetwerk, zijn de aansluitkosten klantspecifiek en dienen deze door de aanvrager zelf te worden betaald. De kosten die we daarom veronderstellen zijn de CAPEX-kosten van de aansluiting op het landelijk waterstofnet met 1000 meter leiding plus de bijbehorende onderhoudskosten, zie Tabel 9. Daarnaast zal er sprake zijn van een entry- en exittarief per kW. De gehanteerde schatting voor het tarief is afkomstig van de opdrachtgever. We berekenen zowel het entry- als exit-tarief mee, omdat we de waterstof vergelijken bij de 'poort' van de eindgebruiker.⁵¹

⁵¹ De gebruikte tarieven (exit/entry en kosten per km leiding) lijken bij het afronden van de studie in november 2025 aan de lage kant, omdat de prijzen sterk zijn gestegen. Bijstelling was niet meer mogelijk binnen de beschikbare tijd, ook omdat er geen concrete bruikbare bronnen aangeleverd zijn. Bovendien heeft aanpassing van deze kosten op alle technieken in een scenario eenzelfde effect.

Tabel 9: Aannames berekening kosten waterstofnet

Aansluitkosten waterstofnetwerk	Industrieclusters	Decentrale industrie	
Entry + Exit tarief (€ per kW per jaar)	€ 36	n.v.t.	Geldt alleen voor scenario 1, kosten zijn ingeschat in 2024 prijspeil voor entry+exit fee.
Jaarproductie	50	10	kton per jaar
Druk	50/66 bar	16 bar	
Diameter	36"	10"	
Lengte netwerk	1	50	km
CAPEX per km	€ 800.000	65% x € 700.000	euro/km MCA1 scenario 1, scenario 2 ⁵²
Compressoren aantal	0	0	# (aannahme landelijke netkosten al gedekt via invoeding- en gebruikstarief)
CAPEX per compressorstation	€12.000.000	€6.000.000	euro MCA1 maar grof
Investering netwerk	€12.800.000	€22.750.000	
Investering compressoren	€12.000.000	€ 0	
Levensduur netwerk	50	50	jaar MCA1
Levensduur compressoren	20	20	jaar MCA1
Elektragebruik per tonkm	1,83	1,83	MWh per ktonkm transport MCA1
Elektragebruik MWh	0,04	€ 0	MWh per kton H ₂
Elektragebruik euro	€ 2,31	€ 0	euro per kton H ₂ bruto productie
Overig OPEX buisleiding	1,0%	0,5%	buis MCA1
Overig OPEX compressor	1,2%	2,0%	compressor/pomp MCA1
Investering per jaar	€ 595.843	€ 1.059.017	euro
Overig OPEX per jaar	€ 272.000	€ 113.750	per kton H ₂ bruto productie
OPEX per kton per jaar	€ 5.442	€ 11.951	per kton H ₂ bruto productie
CAPEX-kosten per kton per jaar	€ 11.917	€ 105.902	per kton H ₂ bruto productie

Voor het regionale waterstofnetwerk nemen we aan dat de totale kosten van investeringen en operationele kosten worden omgeslagen over de geproduceerde waterstof. Per kilometer buisleiding liggen de ingeschatte kosten⁵² lager dan voor het landelijke waterstofnetwerk vanwege de lagere druk en volumes. Het lagere geproduceerde volume is ongunstig voor de kosten per kilogram. Per saldo zijn de kosten voor het regionale waterstofnetwerk gunstig ten opzichte van gebruik van het landelijke netwerk door het ontbreken van het tarief voor gebruik van het landelijke waterstofnetwerk.

KOSTEN EN UITGANGSPUNTEN ENERGIE

Omdat we de productietechnieken vergelijken in 2035 gebruiken we de beschikbare inschattingen van de Klimaat en Energieverkenning (KEV) voor 2035 voor de prijs en wijze van opwek van elektriciteit. De KEV geeft geen uitsplitsing van de gemiddelde prijs voor hernieuwbare

⁵² DNV GL (2020), Haalbaarheid waterstof in bijstookketels voor waterstofnetten. Plus persoonlijke communicatie met fabrikant Soluforce, die aangeeft dat de kosten 50% lager zullen liggen. We hebben als waarde gekozen voor 65% van de kosten bij gebruik van staal.

elektriciteit en elektriciteit uit gascentrales. Omdat andere studies (onder andere Hydrogen Europe) dit wel veronderstellen, hebben we de prijs van 100% hernieuwbare elektriciteit ook 25% lager ingeschat dan de prijs voor de gemiddelde mix. De verdeling van elektriciteit uit hernieuwbare en overige bronnen komt uit de KEV 2024, zie Tabel 10.

Tabel 10: Gebruikte data voor energie

2035	eenheid	toelichting
Elektriciteit		
Groothandelsprijs elektriciteit	€ 63 per MWh	KEV 2024
Kosten elektriciteit-100% (PPA/direct)	€ 47 per MWh	Hydrogen Europe geeft aan 60 euro bij 80 euro mix; 75% prijs mix.
Aandeel hernieuwbaar	80%	KEV 2024: 79% afgerond
Aandeel eigen productie elektriciteit	100%	KEV 2024: meer productie dan gebruik
Emissies CO ₂ voor mix NL	0,04678 ton/MWh	KEV 2024
Emissies NO _x voor mix NL	0,06014 kg/MWh	berekend o.b.v. van 2030 cijfer en daling van CO ₂ tussen 2030-2035
Aardgas		
Aardgasprijs	€ 0,23 per m ³	KEV 2024
Aardgasprijs	€ 0,28 per kg	O.b.v. soortelijk gewicht 0,833 kg/m ³
Aandeel eigen productie aardgas	15%	KEV 2024: 14% afgerond
Aandeel eigen bij te mengen groengas	20%	Bijmengverplichting ⁵³
Aandeel import buisleiding gas	35%	Aanname is import uit Noorwegen / Europa
Aandeel import LNG	30%	Aanname is import uit Verenigde Staten
Emissies aardgasketen NL	0,04% Van aardgas	Voor berekening aangenomen 100% methaan
Emissies aardgasketen buitenland	0,52% Van aardgas	Voor berekening aangenomen 100% methaan
CO ₂ -emissies aardgasketen NL	51 g/kg aardgas	
CO ₂ -emissies aardgasketen buitenland	276 g/kg aardgas	
Warmte		
Inkoopprijs zeer hoge temperatuurwarmte	€ 15 Euro per GJ	50% meer dan opbrengst HT-warmte
Inkoopprijs industriële warmte	€ 8,25 Euro per GJ	10% hoger dan industriële warmte opbrengst zie bijproducten

Voor aardgas hebben we aanvullende aannames gedaan ten opzichte van de KEV. Het aandeel Nederlandse productie offshore is in 2035 geschat op afgerond 15%. Daarnaast geldt de recente bijmengverplichting van 20% groengas, waarvan we aannemen dat die volledig in Nederland wordt geproduceerd. Het resterende deel van de aardgasvraag is dan import. Voor de emissies is relevant of dit LNG of import via buisleiding betreft. Op dit moment is bijna de helft van de import LNG. Vanwege de wens om dit deel niet te laten groeien, afhankelijkheid

⁵³ <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2024/02/09/kamerbrief-aanpassingen-bijmengverplichting-groen-gas>

zoveel mogelijk te voorkomen en Europees gas te gebruiken, verdelen we de resterende 65% in 30% LNG-import (uit de Verenigde Staten) en 35% import van aardgas uit Europa (Noorwegen).

De inkoop van warmte is nodig voor waterontleding. Het gaat om zeerhogetemperatuurwarmte, verondersteld afkomstig uit metallurgische industrie. De inkoopkosten per Gigajoule (GJ) hebben we 50% hoger verondersteld dan de opbrengst van industriële warmte. Dit is een grove aanname.

KOSTEN EN UITGANGSPUNTEN CO₂

CO₂-afvang

Bij vijf van de tien productietechnieken wordt aangenomen dat sprake is van de afvang van CO₂ bij de productie van waterstof. Voor houtrestenvergassing en rioolslibvergisting gaat het om 'groene' CO₂ die verkocht zou kunnen worden, of opgeslagen met negatieve emissies als gevolg. Voor SMR en ATR met CCS en afvalvergassing gaat het om grotendeels grijze CO₂. De kosten, efficiëntie en het energiegebruik kunnen per productietechniek verschillen en zijn vermeld in bijlage A.

Emissiehandelssysteem (ETS)-kosten

Voor grijze CO₂ die niet effectief wordt afgevangen en opgeslagen, wordt een ETS-heffing meegenomen. De hoogte van de heffing hebben we overgenomen uit de KEV 2024. We houden geen rekening met eventuele vrijstellingen of voordelen/opbrengsten die nu nog kunnen worden gekregen wanneer een SMR-installatie wordt vervangen door bijvoorbeeld elektrolyse. In 2035 is deze regeling naar verwachting afgeschaft en in principe vergelijken we productietechnieken om additionele waterstof te produceren, dus niet als vervanging van bestaande faciliteiten.

Omdat we aannemen dat de bijmengverplichting van 20% groengas in 2035 is geëffectueerd, hebben we de grijze CO₂-uitstoot op basis van aardgas gecorrigeerd door deze met 80% te vermenigvuldigen.

Opslag en transport

De kosten voor de logistieke keten na afvang van de CO₂ zijn gebaseerd op het SDE++ advies 2025 (PBL). Voor scenario 1 betreft dat de afvoer via Porthos naar de Aramis-opslag. Voor scenario 2 moet de CO₂ tijdelijk opgeslagen en vervolgens per schip vervoerd worden naar het Aramis-invoerpunt. Hiervoor worden kosten van decentrale opslag, scheepstransport (100 km) en kosten voor Aramis opgeteld. In scenario 2 moet de gasvormige CO₂ vloeibaar gemaakt worden voordat deze opgeslagen wordt. De kosten hiervoor zijn meegenomen in de productiecosten per productietechniek, zie Tabel 11.

Opvallend is dat de kosten voor de CCS-installatie (CAPEX en OPEX), CO₂-opslag en afvang in scenario 1 lager liggen dan de veronderstelde waarde van het ETS, maar in scenario 2 hoger dan het ETS door de extra kosten voor vervloeiing en transport.

Tabel 11: Kosten gebruikt voor bepaling kosten CO₂ opslag onder de Noordzee

Kosten CO ₂ -opslag		bron	
Aramis via Porthos (gasvormig) (scenario 1)	€ 90.600	euro per kton CO ₂	Gelijk gekozen aan de verwerkingstoelagen in de SDE++ voor gasvormige CO ₂
Aramis aangeboden vloeibaar (scenario 2)	€ 112.800	euro per kton CO ₂	Gelijk gekozen aan de verwerkingstoelagen in de SDE++ voor vloeibare CO ₂
Scheepstransport naar Aramis (scenario 2)	€ 3.900	euro per kton CO ₂	O.b.v. kosten kental voor vloeibaar bulkvervoer binnenvaart over 100 km (Panteia).
Vloeibaar maken	p.m.	euro per kton CO ₂	Is meegenomen in specifieke CAPEX/OPEX scenario 2 per productietechniek, zie bijlage A.
ETS	€ 141.000	euro per kton CO ₂	KEV 2024, waarde 2035

KOSTEN EN UITGANGSPUNTEN GRONDSTOFFEN

De verschillende productietechnieken hebben naast energie verschillende grondstoffen nodig. De aannames over de kosten en eigenschappen laten we hier zien.

Water

Water wordt als grondstof en voor de koeling gebruikt. Bij de meeste productietechnieken is sprake van beide toepassingen, soms alleen van koeling. Bij rioolslibvergisting is water niet als aparte grondstof meegeteld, omdat water in het natte rioolslib en uit de zuivering wordt gebruikt.

We veronderstellen verschillende waterbronnen per scenario voor de productietechnieken die water als koelwater en/of grondstof nodig hebben.

- In scenario 1 (langs de kust) nemen we aan dat het water dat wordt gebruikt als grondstof en als koelwater afkomstig is uit zee.
- In scenario 2 (in binnenland) nemen we aan dat het water dat wordt gebruikt als grondstof en als koelwater afkomstig is uit zoet oppervlaktewater.

De beschikbaarheid van zoet oppervlaktewater staat onder druk in droge perioden. Bij schaarste gaat de verdringingsreeks in werking en gaat bijvoorbeeld de drinkwaterproductie en het gebruik van water voor het veilig houden van kringen vóór op het gebruik van water voor de industrie. Als alternatief zou gebruik kunnen worden gemaakt van effluent van RWZI. Echter ook in het effluent zijn andere gebruikers geïnteresseerd. Als baseline veronderstellen we daarom gebruik van oppervlaktewater in scenario 2.

Zowel zeewater als oppervlaktewater dienen een uitgebreid zuiveringsproces te ondergaan. Voor de toepassing van koelwater en grondstof is meestal demiwater voldoende. Voor de elektrolyzers veronderstellen we dat ultra puur water (UPW) noodzakelijk is. De kosten van het zuiveren naar demiwater of UPW baseren we op een studie van RHDHV.⁵⁴ Ook het energiegebruik en het ruimtebeslag halen we uit deze studie, zie Tabel 12 en Tabel 13. Hoewel deze studie alleen over elektrolyzers gaat nemen we aan dat de kentallen voor de productie van demiwater ook kunnen worden gebruikt voor demiwater voor andere productietechnieken.

⁵⁴ RHDHV (2024). Water voor waterstof, Onderzoek naar de relatie tussen waterbeschikbaarheid en grootschalige elektrolyse, juli 2024.

Tabel 12: Kentallen gebruikt voor UPW vraag (overgenomen of afgelezen uit RHDHV)

UPW (1 GW elektrolyser)	Zeewater	Opp. Water	Eenheid	Toelichting
OPEX	€ 1.100.000	€ 270.000	Euro per jaar	Figuur 3-4 in RHDHV
CAPEX	€ 7.200.000	€ 2.870.000	Euro	Figuur 3-4 in RHDHV
Watervraag (ongezuiverd)	1.950.000	1.036.364	m ³	
Efficiëntie (schoon water/ ongezuiverd water)	45%	86%		
Jaarkosten	€ 1.629.789	€ 481.180	Per jaar	
Schoon water productie	886.364	886.364	m ³ per jaar	
Kosten UPW	€ 0,0018	€ 0,0005	euro per kg	
Energie	5,30	1,30	kWh/m ³ gezuiverd water	
Ruimtebeslag	180	100	m ² /GW	
Ruimtebeslag in m ² per kton water	0,2031	0,1128	m ² /per kton gezuiverd water	
Brijn				
Volume brijn	970.000	150.000	m ³ brijn per jaar	
Gewicht brijn	70.000	2.581	ton brijn per jaar	
Gewicht brijn	79	2,91	kg/m ³ gezuiverd water	
Transport brijn	-	0,29	tonkm transport per m ³ gezuiverd water	o.b.v. 100 km, kosten Panteia

Het zuiveren van water levert brijn als afvalproduct op. Bij gebruik van zeewater is het meestal mogelijk om de brijn in zee te lozen. Wanneer dit met beleid gebeurt, is er geen effect op het milieu. Lozing van brijn op het zoete oppervlaktewater is niet eenvoudig vergunbaar. We nemen daarom aan dat het nodig is de brijn over de weg naar zee te transporteren en daar te lozen. De kosten en externaliteiten van het wegtransport zijn meegenomen in de modellering.

Tabel 13: Kentallen gebruikt voor demiwater-vraag (overgenomen of afgelezen uit RHDHV)

Demiwater (1 GW elektrolyser)	Zeewater	Opp. Water	Eenheid	Toelichting
OPEX	€ 5.000.000	€ 1.000.000	Euro per jaar	Figuur 3-5 in RHDHV
CAPEX	€ 26.500.000	€ 18.000.000	Euro	Figuur 3-5 in RHDHV
Watervraag (ongezuiverd)	9.120.000	5.160.000	m ³	
Efficiëntie (schoon water/ ongezuiverd water)	50%	88%		
Jaarkosten	€ 6.949.916	€ 2.324.472	Per jaar	
Schoon water productie	4.560.000	4.560.000	m ³ per jaar	
Kosten UPW	€ 0,0015	€ 0,0005	euro per kg	
Energie	3,90	1,10	kWh/m ³ gezuiverd water	
Ruimtebeslag	700	400	m ² /GW	
Ruimtebeslag in m ² per kton water	0,1535	0,0877	m ² /per kton gezuiverd water	
Brijn				
Volume brijn	4.780.000	600.000	m ³ brijn per jaar	
Gewicht brijn	425.373	14.925	ton brijn per jaar	
Gewicht brijn	93	3,27	kg/m ³ gezuiverd water	
Transport brijn	-	0,33	tonkm transport per m ³ gezuiverd water	o.b.v. 100 km

Houtpellets en houtsnippers, afval en rioolslib

De kosten en energie-inhoud van de geïmporteerde houtpellets en van de lokale houtsnippers hebben we overgenomen van het SDE++ advies 2025. Voor de houtpellets hebben we 20 euro voor de veronderstelde transportkosten van haven naar energiecentrale afgetrokken. We veronderstellen dat in scenario 1 levering van de houtpellets aan eigen kade plaatsvindt, zie Tabel 14.

Het rioolslib is afkomstig van de rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) waar de productie-installatie bij is geplaatst en van RWZI's uit de regio. De kosten hiervoor veronderstellen we nul. Wel worden er transportkosten over de weg toegevoegd (centrale slibvergisting met slib van lokale RWZI plus aangevoerd slib van elders).

Voor het verwerken van afval ontvangt de verwerker opbrengsten. We hebben de aanname van Hydrogen Europe overgenomen van 60 euro per ton afval. Van deze opbrengsten hebben we een schatting voor de transportkosten afgetrokken.

Tabel 14: Kosten incl. aanvoer gebruikte grondstoffen

Grondstof	Kosten incl. transport	Eenheid	Toelichting
Houtpellets	€ 220	€/ton	SDE++ 2025
Houtsnipper	€ 76	€/ton	SDE++ 2025
Afval	- € 60 + € 7	€/ton	Hydrogen Europe gate fees plus transportkosten
Rioolslib	€ 7	€/ton	Aanname gelijk aan transportkosten per ton over 50 km

De energie-inhoud van de geïmporteerde houtpellets, van de lokale houtsnippers en van het (huishoudelijk) afval hebben we overgenomen van het SDE++ advies 2025. Ruw zuiveringsslib bevat zoveel water dat er zelfs sprake is van een negatieve waarde (circa -1 MJ/kg) bij 94,8% water.⁵⁵ We veronderstellen de energie-inhoud daarom gelijk aan nul, zie Tabel 15.

Tabel 15: Energie-inhoud incl. aanvoer gebruikte grondstoffen

Grondstof	Energie-inhoud	Eenheid	Toelichting
Houtpellets	17	MJ/kg	SDE++ 2025
Houtsnipper	11	MJ/kg	SDE++ 2025
Afval	12,5	MJ/kg	SDE++ 2025
Rioolslib	0	MJ/kg	

Zuurstof

De prijs van industriële zuurstof varieert afhankelijk van verschillende factoren, waaronder geografische locatie, leveringsvolume, leveringsvorm (vloeibaar, gasvormig, cilinders), zuiverheidsgraad en leveringscontract (eenmalig of langdurig). Gemiddeld lag de prijs voor industriële zuurstof in Europa begin 2025 tussen de \$ 150-175 per ton voor vloeibare zuurstof in bulkhoeveelheden.⁵⁶ In de analyse gebruiken we een waarde van € 150 per ton voor inkoop, zie Tabel 16.

Tabel 16: Inkoopkosten en benodigde energie zuurstof, levering aan fabriek

Grondstof		Eenheid	Toelichting
Inkoopkosten / marktprijs	0,15	€/kg	
Benodigde energie voor productie	0,876	MJ/kg	Energiegebruik o.b.v. de correlatie van Hu et al. (2010) voor zuurstof met zuiverheid van 95%. ⁵⁷

WAARDE WATERSTOF

Voor de bepaling van het publieke belang Economisch krachtig is een waarde nodig voor een kilogram waterstof in 2035. De marktprijs in 2035 is echter niet te voorspellen door tal van onzekerheden. De gebruikte waarden staan in Tabel 17.

Fysiek is er geen verschil tussen een kilogram waterstof die via elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit of via SMR zonder afvang van CO₂ wordt geproduceerd. Beide voldoen aan

⁵⁵ <https://publications.tno.nl/publication/34629322/13XD9w/e15025.pdf>

⁵⁶ <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/oxygen-price-index/>

⁵⁷ Hu, Y et al, Integration of Evaporative Gas Turbine with Oxy-Fuel Combustion for Carbon Dioxide Capture, International Journal of Green Energy, 2010.

de gekozen zuiverheidseisen. De toepassingsmogelijkheden verschillen echter sterk door beleid. In 2035 dient 60% van de waterstof in de industrie hernieuwbaar te zijn. De rest mag (nog) koolstofarm of grijs zijn. Om als hernieuwbaar te kwalificeren dient de gebruikte energie resp. grondstof hernieuwbaar maar niet van biogene oorsprong te zijn, en dient de ketenreductie van CO₂ ten minste 70% te zijn. Hierdoor kwalificeert alleen elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit als hernieuwbaar. De overige productietechnieken zijn koolstofarm als de CO₂-reductie ten opzichte van fossiele waterstofproductie hoger dan 70% is.

Nog niet voor alle onderzochte productietechnieken is zeker in welke categorie ze vallen. Weliswaar staat de regelgeving daaromtrent vast via gedelegeerde verordeningen voor RFNBO's en koolstofarme brandstoffen (waaronder koolstofarme waterstof), maar de uitwerking ervan in de praktijk moet nog blijken, en de systematiek van koolstofarme waterstof komt in juli 2028 onder review, dat wil zeggen vóór het richtjaar 2035 van deze studie. Bij SMR met CCS hangt het ervan af hoeveel CO₂ kan worden afgevangen. We hebben op basis van marktinformatie verondersteld dat het afdangpercentage door bijmengen van een deel van het geproduceerde waterstof in de aardgasstroom die voor stoomopwekking wordt gebruikt, voldoende hoog is dat de broeikasgasemissiereductie boven de 70% uitkomt. In dat geval geldt waterstof geproduceerd via SMR+CCS als koolstofarm.

Tabel 17: Waarde kilogram waterstof voor publieke belang Economisch Krachtig

Kwalificatie		Eenheid	Toelichting
Hernieuwbare waterstof	€ 8	€/kg	Geldt voor elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit (>90%); waarde o.b.v. kosten per kg + 20% voor winst en risico
Koolstofarme waterstof	€ 4	€/kg	Geldt voor referentie, houtrestenvergas-sing en -vergisting, afvalvergassing, methaanontleding (pyrolyse), waterontleding, ATR+CCS, en SMR+CCS; waarde o.b.v. laagste kosten per kg + 20% voor winst en risico
Geen koolstofarme waterstof	€ 3,5	€/kg	Geldt in ieder geval voor SMR o.b.v. waarde koolstofarm per kg minus ongeveer 10% voor kosten CCS en betalingsbereidheid duurzamere producten (≈10%)

OPBRENGSTEN (BIJ)PRODUCTEN

Een deel van de bijproducten kan worden verkocht en genereert extra opbrengsten die worden gebruikt bij Economisch krachtig. Voor azijnzuur, isoboterzuur, digestaat, zuurstof, warmte, elektriciteit en koolstof hebben we deze bijproducten gemonetariseerd. Bij industrieel gebruik van warmte is er een verschil in de opbrengsten tussen scenario 1 en 2. We veronderstellen dat in scenario 2 verkoop van industriële warmte tegen de waarde voor stadswarmte mogelijk is. Dit levert lagere opbrengsten op.

Opbrengsten van stoffen waar we onvoldoende informatie over hebben om ze te kunnen monetariseren zoals ongespecificeerde 'metalen' en 'mineralen' hebben we niet betrokken in de beoordeling. In de baseline veronderstellen we dat gemiddeld 50% van de bijproducten vermarkt wordt, behalve voor digestaat. Voor digestaat nemen we aan dat alle productie verkocht wordt. We hebben een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar het effect van een ander percentage.

Aziijnzuur, isoboterzuur, digestaat, koolstofproduct, biogene CO₂

De opbrengsten voor isoboterzuur en digestaat zijn gebaseerd op Alam.⁵⁸ Voor aziijnzuur hebben we de actuele prijs in Europa genomen van business analytiq. Genoemde prijzen zijn gecorrigeerd voor het feit dat we met opbrengsten af fabriek rekenen (-15%), zie Tabel 18.

De verkoopprijzen variëren sterk per koolstofsoort. Voor carbon black variëren de prijzen tussen de 500 en 1000 euro per ton, terwijl de prijzen voor actieve kool kunnen oplopen tot 1500 tot 1800 euro per ton (en zelfs 1 miljoen euro per ton voor koolstoffilamenten). Bij ontleding van methaan veronderstellen we dat de prijs die Hydrogen Europe hanteert voor het koolstofproduct een goede benadering is.

De aankoop prijs van zuivere CO₂ voor tuinders bedraagt 80 tot 140 euro per ton⁵⁹, naargelang de vorm en het moment waarop de CO₂ ingekocht wordt. Hier is bijvoorbeeld de huur voor CO₂-opslaginstallaties bij de tuinder en het transport naar de tuinder bij inbegrepen. Levering via buisleiding in grote volumes is het goedkoopst. We veronderstellen dat de levering van CO₂ de kosten voor afvang (ongeveer € 50 per ton) dekt plus een marge voor het zuiveren (€ 10), eventueel vloeibaar maken en voor dekking van winst en risico (10%).

Tabel 18: Opbrengsten levering af fabriek

product		Eenheid	Toelichting
Aziijnzuur	€ 0,50	€/kg	Acetic Acid price index - businessanalytiq prijs mei '25: \$0,65, dollar-euro conversie 1,1, 85% van marktprijs als opbrengst af fabriek
Isoboterzuur	€ 1,23	€/kg	Alam, dollar-euro conversie 1,1, 85% van marktprijs als opbrengst af fabriek
Digestaat	€ 0,008	€/kg	Alam, dollar-euro conversie 1,1, 85% van marktprijs als opbrengst af fabriek
Koolstofproduct	€ 0,500	€/kg	Hydrogen Europe
Biogene CO ₂ gas	€ 66	€/ton	Kosten afvang en zuivering CO ₂ + 10%
Biogene CO ₂ vloeibaar	€ 88	€/ton	Kosten van afvang en voor zuivering+vloeibaar maken (€ 30) + 10%

Zuurstof, warmte en elektriciteit

De opbrengsten voor zuurstof, warmte en elektriciteit hebben we gebaseerd op de inkoopkosten van energie en grondstoffen. Van de inkoopkosten is een marge van 10% afgetrokken. Voor scenario 2 is aangenomen dat de opbrengst van industriële warmte op het niveau ligt van stadswarmte. In scenario 2 veronderstellen we dat zuurstof kan worden gebruikt in bijvoorbeeld het waterzuiveringsproces van een RWZI. Dit zorgt voor een lager energieverbruik bij het zuiveren van afvalwater, zie Tabel 19.

Warmte geschikt voor industrieel gebruik heeft een hogere waarde dan warmte geschikt voor de lagere temperatuur stadswarmte.

⁵⁸ Alam, Monisha, Nusra Fatema Nayan (2024). Techno-Economic Assessment of Biohydrogen Production from Dark Fermentation of Wastewater Sludge. Preprint. University of Alberta, 5 February 2024

⁵⁹ [Conceptadvies basisbedragen SDE++ 2022 - CCU](#)

Tabel 19: Opbrengsten levering af fabriek

Product	Scenario 1	Scenario 2	Eenheid	Toelichting
Zuurstof	€ 0,136	€ 0,136	€/kg	Inkoopkosten/1,1
Industriële warmte	€ 10,00	€ 5,25	€/GJ	Verhouding industriële restwarmte vs. mid- dentemperatuur warmtenetwarmte is 1,33 ⁶⁰
Warmte (lage temperatuur)	€ 5,25	€ 5,25	€/GJ	70% van € 7,5/GJ ⁶¹ ; warmtenet heeft geen behoefte aan jaarrond alle warmte
Elektriciteit	€ 57,3	€ 57,3	€/MWh	Inkoopkosten mix/1,1

ECONOMISCHE UITGANGSPUNTEN

Het prijspeil van de gebruikte inschattingen voor de CAPEX is in enkele gevallen niet gelijk aan het huidige prijspeilniveau. De waarden zijn na schaling gecorrigeerd naar prijspeil 2024 op basis van de CBS-productiekosten voor de industrie (zie Tabel 20). Dit geldt voor waterontleding (2019), methaanontleding (2021) omdat de inschattingen zijn bepaald vóór de energiecrisis.

Tabel 20: Productiekosten stijging (index CBS)

	inflatie	index
2019	0,9	100
2020	-4,2	95,8
2021	12,5	107,8
2022	23,8	133,4
2023	-0,1	133,3
2024*	-0,5	132,6

De investeringen zijn vertaald naar jaarkosten per kilogram waterstof door de annuïteit te bepalen met een discontovoet van 4% over de verwachte levensduur van de investering. De economische levensduur van de meeste investeringen is gezet op 20 jaar. Voor buisleidingen is een levensduur van 50 jaar aangenomen.

Bedragen die in US\$ zijn opgegeven zijn geconverteerd naar euro's op basis van een 1,1 dollar = 1 euro.

Inschattingen van het prijsniveau van energie en grondstoffen zijn gedaan aan de hand van de beschikbare data in maart-april 2025. De dataverzameling en analyse is in die periode uitgevoerd (met uitzondering van de gevoeligheidsanalyses die in november 2025 zijn gedaan). Dat betekent dat bijvoorbeeld is uitgegaan van KEV 2024 en niet van de in september 2025 verschenen KEV 2025. Nieuwe inzichten uit KEV 2025 zijn niet verwerkt in de analyse.

⁶⁰ <https://resrotterdamdenhaag.nl/documenten+verzamelapagina/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=2325895>, verhouding voor directe restwarmte gebruikt.

⁶¹ <https://www.berenschot.nl/media/cOmptkr/rapport-wcw-kostprijsplus-consumentenbescherming-en-verduurzaming.pdf>

BIJLAGE C: ACHTERGRONDEN BEREKENING

BETAALBAAR

Het publieke belang Betaalbaar heeft betrekking op de totale kosten van de productieketen tot aan de poort van de industriële eindgebruiker. Deze kosten worden uitgedrukt in de totale kosten per kton waterstof bij volumes zoals die in periode 2030-2035 worden aangenomen.

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 grondstoffen en energie (aardgas, water, biomassa, afval, elektriciteit) nodig voor de productie van waterstof,
2. Transportkosten voor de levering van grondstoffen en energie bij de productiefaciliteit,
3. Eventuele opslagkosten van grondstoffen en energiedragers bij de productiefaciliteit,
4. Kosten van investeringen in productie- en opslagvoorzieningen afgeschreven over levensduur,
5. Kosten van zuivering van waterstof, compressie en CCS indien nodig,
6. Kosten van waterstoftransport per buisleiding (landelijk of regionaal waterstofnetwerk),
7. Overige operationele kosten, zoals onderhoud, ETS-kosten, en netwerkkosten van elektriciteits- en aardgasnet.

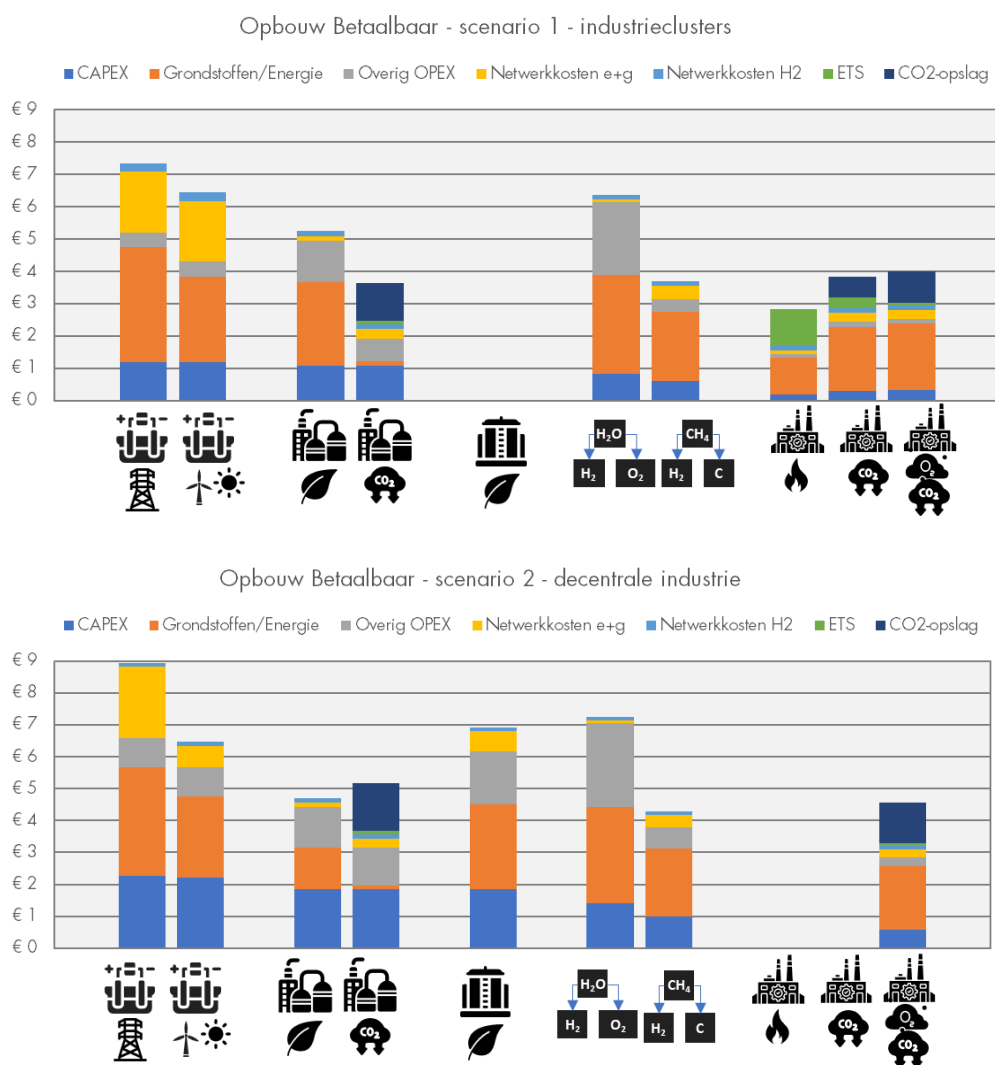
De resulterende kosten hangen sterk af van de gehanteerde aannames. We gebruiken daarom zoveel mogelijk dezelfde bron voor de verschillende productietechnieken.

Bij de berekening van de productiekosten is geen rekening gehouden met eventuele opbrengsten uit de verkoop van emissiereductie-eenheden (ERE's) of raffinagereductie-eenheid (RARE's). ERE's worden verkregen als hernieuwbare waterstof direct wordt ingezet voor mobiliteit; RARE's worden verkregen als hernieuwbare waterstof in raffinaderijen wordt ingezet voor de productie van transportbrandstoffen. Evenmin is rekening gehouden met de opbrengst van bijproducten, omdat deze zijn meegeteld in het publieke belang Economisch krachtig.

We hebben de score voor Betaalbaar bepaald door verschillende kostenposten op te tellen en uit te drukken per kilogram waterstof. Aannames voor de kosten per techniek en voor het gebruik van elektriciteits-, waterstof- en CO₂-infrastructuur, energie en grondstoffen zijn te vinden in bijlage A en B.

Totale kosten per kilogram waterstof

De totale kosten variëren door verschillen in de afzonderlijke kostenposten, zie Figuur 36. Over het algemeen zijn de productietechnieken die gebruik maken van aardgas ondanks de kosten voor CO₂-opslag goedkoper. De kosten liggen in scenario 2 hoger door de kleinere schaal van de productie. Per kilogram waterstof ligt de CAPEX hoger.



Figuur 36: Opbouw kosten per waterstofproductietechniek

Niet in dit overzicht meegerekende kosten zijn:

- Eventuele belastingen, invoerheffingen, vergunningskosten en dergelijke;
- Aanschaf of huur van grond, personeelskosten (productiekosten, wel voor transport), kosten voor veiligheidsvoorzieningen op locaties;
- Specifieke aanpassingen van infrastructuur om knelpunten op te lossen (onderdoorgang kanaal et cetera);
- Risico en winstopslag.

Databronnen die we voor Betaalbaar gebruiken zijn onder andere:

- De studie *Clean Hydrogen Production Pathways* van Hydrogen Europe (2024) is uitgangspunt voor de meeste van de vergeleken productietechnieken, waarbij we een aantal kostenparameters hebben vervangen door 'Nederlandse' gegevens (zoals energieprijzen en netwerkkosten, en soms kostenopgaven van interviewees). De technieken hebben we uitgebreid met kostenfactoren op basis van gegevens van JRC, PBL en andere literatuur.

- Voor twee productietechnieken die in de studie van Hydrogen Europe ontbreken hebben we techno-economische analyses uit de wetenschappelijke literatuur als uitgangspunt genomen, te weten Alam et al. (2024) voor rioolslibvergisting en Onigbujamo et al. (2022) voor waterontleding via thermolyse. Methaanpyrolyse is wel opgenomen in de Hydrogen Europe-studie maar volgens een thermokatalytische route. In de Verenigde Staten is een werkende fabriek op basis van plasmatechnologie en ook in Nederland is interesse voor de plasmatechniek (startup Thoriant). Daarom hebben we deze techniek gemodelleerd met data uit literatuur (Teymouri 2023) en van TNO/Thoriant.
- Voor transportkosten: Panteia (2023), Cost Figures for Freight Transport – final report, in opdracht van Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM), Januari 2023.

ECONOMISCH KRACHTIG

Bij het publieke belang Economisch krachtig gaat het om het (toekomstig) verdienvermogen voor Nederland. Hiervoor schatten we de toegevoegde waarde van de onderzochte productietechnieken voor Nederland. De toegevoegde waarde (absoluut) is het verschil tussen 1) de verwachte opbrengsten inclusief marge en 2) de kosten van geïmporteerde grondstoffen of energie en de veronderstelde inkoopkosten van buitenlandse kapitaalgoederen. Hierdoor krijgen ketens met lage importkosten (geen import van aardgas of biomassa) waarvoor productietechniek in Nederland wordt gefabriceerd een hogere score, ook als de kosten voor productie in Nederland hoog zijn. De uitgaven hiervoor komen immers ten goede aan de Nederlandse economie.

Bij aanschaf van kapitaalgoederen in het buitenland komt een deel van de toegevoegde waarde in het buitenland terecht. Om zichtbaar te maken hoe innovatie in de Nederlandse maakindustrie extra kan bijdragen aan Economisch krachtig, hebben we voor de baseline aangenomen dat het reactorgedeelte (vergasser, reforming-reactor, plasmareactor, elektrolyser, et cetera) in het buitenland wordt aangeschaft. We veronderstellen dat de Balance of Plant⁶²-investeringskosten, onderhoudskosten, engineering en installatiekosten in Nederland neerslaan. In een gevoeligheidsanalyse gaan we ervan uit dat alle kapitaalgoederen, ook de reactorgedeelten, in Nederland worden aangeschaft.

We veronderstellen dat het voor de eindgebruiker geen verschil maakt via welke productieketen de waterstof geleverd wordt, behalve of de waterstof voldoet aan RFNBO-eisen of koolstofarm is door te voldoen aan de minimale broeikasgasemissiereductie-eis.⁶³ Volgens de herziene Europese Richtlijn hernieuwbare energie (RED III) moet in 2035 ten minste 60% van het industriële waterstofgebruik uit RFNBO's bestaan, voor zover waterstofstromen niet zijn uitgezonderd van deze lidstaatverplichting. Van de tien onderzochte productietechnieken geldt alleen waterstof uit elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit als RFNBO, die zal moeten concurreren met import van hernieuwbare waterstof(dragers).

⁶² Alle ondersteunende componenten en hulpsystemen die nodig zijn voor de werking van de reactor of elektrolyser, met uitzondering van de reactor of stacks.

⁶³ De gedelegeerde verordening voor koolstofarme brandstoffen beschouwt de geproduceerde waterstof uit een elektrolyser die is aangesloten op het elektriciteitsnet als volledig hernieuwbaar, als in het voorgaande jaar ten minste 90% van de elektriciteit afkomstig was van hernieuwbare bronnen. Als dat niet het geval is, moet de geproduceerde waterstof uit additionele hernieuwbare elektriciteitsproductie komen: de elektriciteit dient ofwel zelf geproduceerd te zijn met hernieuwbare bronnen ofwel ingekocht zijn via Power Purchase Agreements (PPA's) bij een producent van hernieuwbare elektriciteit. Ook gelden er temporele criteria (vanaf 2030 moet de door de elektrolyser geproduceerde RFNBO's in hetzelfde uur zijn geproduceerd als de hernieuwbare elektriciteit) en geografische criteria (eisen aan de locatie van de elektrolyser in relatie tot de biedzone).

Om de toegevoegde waarde te bepalen nemen we daarom voor waterstof uit elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit als de marktwaarde de kostprijs in scenario 1 met een winstopslag. Voor de andere productietechnieken stellen we de marktwaarde van waterstof gelijk aan de laagste kostprijs van deze acht technieken plus winstopslag. Verder hebben we de verkoopprijs van waterstof verhoogd met de verwachte opbrengst van waardevolle bijproducten van de productiemethode, zoals vaste koolstof bij ontleding van methaan of zuurstof bij elektrolyse of thermolyse.

De toegevoegde waarde hebben we gecorrigeerd voor mogelijke extra (vervoers)congestiekosten en extra kosten voor het gebruik van de weg- en waterinfrastructuur als gevolg van levering van grondstoffen over deze weg- en waterinfrastructuur. Deze kosten komen niet in het publieke belang Betaalbaar tot uiting omdat ze neerslaan bij de maatschappij.

De economische activiteit en toegevoegde waarde van waterstof 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 nu al moeilijk te kwantificeren, laat staan in de toekomst. We nemen aan dat de toegevoegde waarde hier een goede benadering voor is.

Deze concretisering komt grotendeels overeen met de gehanteerde definitie van Economisch krachtig zoals gehanteerd in de MCA waterstofdragers, maar is specifiek uitgewerkt met betrekking tot de opbrengst van bijproducten en het verlies aan toegevoegde waarde door inkoop van buitenlandse kapitaalgoederen.

Toegevoegde waarde

Toegevoegde waarde is gedefinieerd als de marktwaarde minus de inkoopkosten. Voor de berekening van marktwaarde gaan we uit van een indicatieve prijs voor waterstof per kilogram bij levering aan eindgebruikers zoals bepaald in bijlage B.

Van de veronderstelde marktwaarde trekken we de importkosten voor aardgas, biomassa en CAPEX (indien van toepassing) af. De veronderstelde percentages import staan vermeld in Tabel 21)

Tabel 21: Veronderstelde percentage CAPEX import

	Aandeel import	Toelichting
AEL	31%	TNO geeft een onderverdeling van de kapitaalkosten (Unit Capital Cost) van een 100 en 200 MWe elektrolyser. Het aandeel van het 'electrolysesysteem' is 31%. TNO maakt geen onderscheid tussen AEL en PEM.
PEM elektrolyse	31%	
Houtrestenvergassing	33%	Salkuyeh geeft een onderverdeling van de kapitaalkosten van een biomassavergassingsfabriek. Het aandeel van de vergassingseenheid is berekend als 33%.
Afvalvergassing	33%	Geen vergelijkbare onderverdeling gevonden, daarom de waarde voor houtrestenvergassing overgenomen.
Rioolslibvergisting	0%	Alam geeft een gedetailleerde inventarisatie van de benodigde apparatuur. Hier zit geen geavanceerd reactor onderdeel bij, alles kan in Nederland worden gemaakt.
Waterontleding	27%	Budama en Onigbujamo geven elk een gedetailleerde inventarisatie van de benodigde apparatuur. We negeren de onderdelen die te maken hebben met Concentrated Solar Power. Het aandeel van de tweestaps thermochemische reactor is berekend als 24% resp. 31%, we nemen het gemiddelde.
Methaanontleding	30%	Alam geeft een gedetailleerde inventarisatie van de benodigde apparatuur. Het aandeel van de plasmareactor is berekend als 30%.
SMR	16%	Rovere geeft een gedetailleerde inventarisatie van de benodigde apparatuur voor een SMR- of ATR-installatie. Het CAPEX-aandeel van de gasgestookte reformer is berekend als 16% zonder en 15% met CCS, en voor ATR is het aandeel van auto thermal reformer 12%.
SMR + CCS	15%	
ATR + CCS	12%	

Congestie (fysieke transportbewegingen)

Er wordt alleen congestie verondersteld op de weg, zie Tabel 22. 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 Delft.⁶⁴ Het KiM kiest, in tegenstelling tot wat CE Delft meestal gebruikt, voor de congestiekentallen op basis van 'Dead weight' in plaats van voertuigverliesuren.⁶⁵ Dit levert een lagere kosteninschatting op.

Tabel 22: Waarderingskentallen voor marginale kosten van congestie (bron KiM 2023)

Waarderingskentallen voor kosten van congestie	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm*	Toelichting
Weg	€ 5,20	gemiddelde vrachtwagen
Water	€ -	binnenvaart
Buisleiding, waterstofnet, aardgasnet	€ -	geen congestie

Kosten gebruik ruimte en publieke infrastructuur

Voor vervoer van grondstoffen en waterstof wordt gebruik gemaakt van publieke infrastructuur, die ruimte inneemt en beheer en onderhoud vraagt. We hebben de kosten van gebruik van

⁶⁴ 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.

⁶⁵ Er zijn twee veelgebruikte concepten voor totale/gemiddelde congestiekosten: vertragingskosten en 'deadweight loss' kosten. Bij de vertragingskosten 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.

ruimte en publieke infrastructuur berekend door de transportvolumes (tonkm) te vermenigvuldigen met kentallen van KiM/CE Delft (zie Tabel 23).⁶⁶ 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.

Tabel 23: 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	25% diesel, 75% elektrisch
Water	€ 0,73	binnenvaart
Buis - nieuw	€ - (PM)	geen kentallen bekend, kosten betaald door gebruikers

Totale resultaat Economisch krachtig per kilogram waterstof

De opbouw van de toegevoegde waarde en de correcties in Figuur 37 laten zien dat rioolslibvergisting een hoge toegevoegde waarde heeft vanwege de waardevolle bijproducten.⁶⁷ De score wordt vooral bepaald door deze bijproducten en de toegevoegde waarde van de waterstof. De overige correcties voor import, congestie en gebruik van infrastructuur zijn klein.

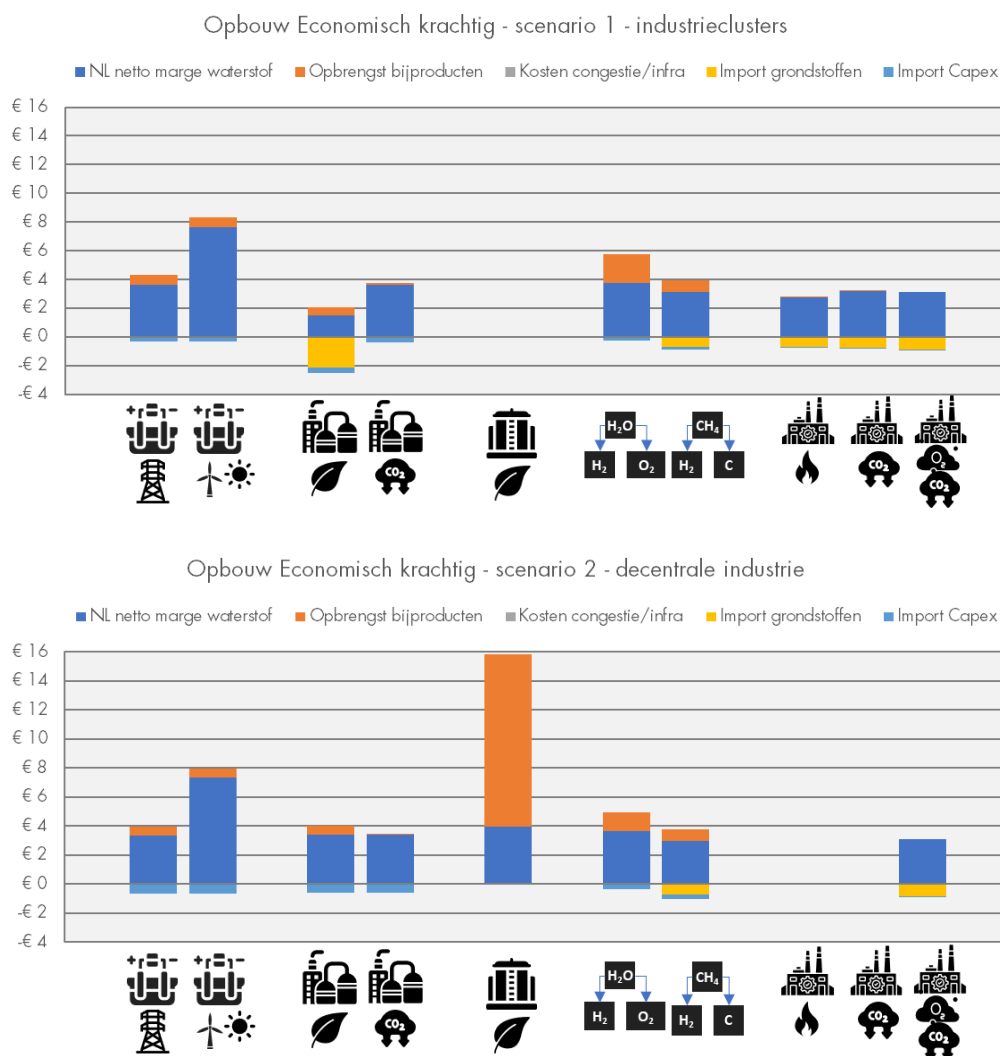
Omdat als gevolg van Europees beleid de waterstof uit elektrolyse meer toepassingsmogelijkheden heeft, veronderstellen we een hogere toegevoegde waarde en score. Bij gebruik van dezelfde marktwaarde als voor koolstofarme waterstof worden verschillen vooral bepaald door de bijproducten en de import van grondstoffen.

Bronnen die we voor Economisch krachtig hebben gebruikt zijn onder andere:

- De resultaten van Betaalbaar, inclusief verdeling van de investeringskosten.
- Kentallen CE Delft/KiM
- Marktinformatie over de opbrengst van bijproducten

⁶⁶ 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.

⁶⁷ Getoonde netto marge is hiervoor al gecorrigeerd. 'Import CAPEX' is de toegevoegde waarde die het NL BBP hoger kan uitvallen als de industrie de elektrolyzers en reactoren produceert. BoP, opslag en installatie zijn al aangerekend als NL toegevoegde waarde.



Figuur 37: Opbouw Economisch krachtig per waterstofproductietechniek

BETROUWBAAR

Bij het publieke belang Betrouwbaar gaat het om de zekerheid van tijdige levering van waterstof zonder grote prijschommelingen. Ook het voorkomen van risicovolle strategische afhankelijkheden van geïmporteerde grondstoffen en energie speelt een rol. Omdat we echter geen specifieke informatie over de exporterende landen gebruiken, kunnen we strategische afhankelijkheden niet concreet maken. Het gaat in deze studie dus om de zekerheid van tijdige levering door betrouwbaarheid van de levering van grondstoffen en energie, de productietechnieken van waterstof en het transport van waterstof in Nederland via waterstofnetwerken.

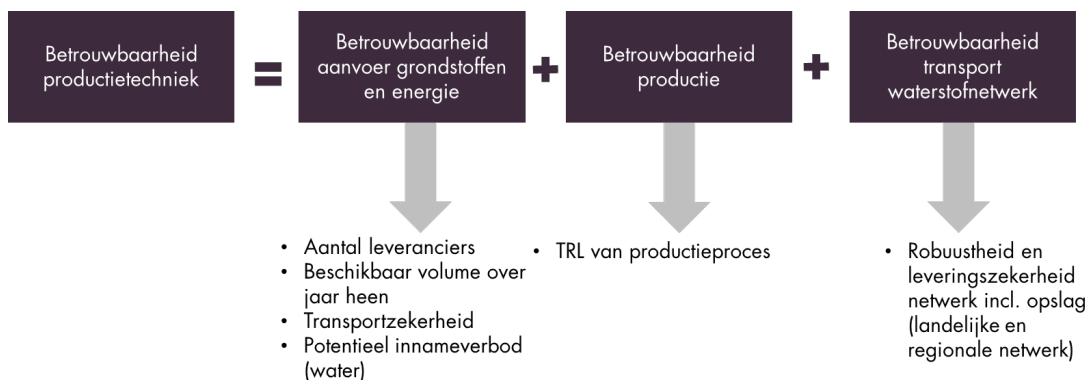
Een beschouwing van betrouwbaarheid kent vele onzekerheden, maar door het gebruik van een standaardmethode voor alle ketens veronderstellen we dat de scores ten opzichte van elkaar wel representatief zijn.

Betrouwbaarheid van de keten wordt door veel factoren beïnvloed, waaronder economische conjunctuur, geopolitieke situatie, weersomstandigheden, schaarste in de transportmarkt en dergelijke. Wij richten ons alleen op de factoren die rechtstreeks verbonden zijn met en onderscheidend zijn voor de waterstofproductietechnieken. Moeizame ruimtelijke inpasbaarheid van

de ketens kan effect hebben op de betrouwbaarheid van ketens maar komt bij het publieke belang Ruimte aan bod. Ook de wijze van marktordening is van belang voor betrouwbaarheid van ketens.

In deze MCA hebben we gekozen voor het toekennen van een kwalitatief nadeel aan een productietechniek ten opzichte van een normwaarde per ketenonderdeel. Daarvoor verdelen we de productieketen in drie onderdelen, met per onderdeel een of meer indicatoren van betrouwbaarheid (zie ook Figuur 38), namelijk:

1. aanvoer van grondstoffen, hulpstoffen en energie: leveringszekerheid van aardgaslevering voor SMR, ATR en methaanontleding, biomassa-import of binnenlandse levering voor vergassing, leveringszekerheid van afval voor vergassing, leveringszekerheid van rioolslib voor vergisting, leveringszekerheid van elektriciteit uit het elektriciteitsnet of directe levering van wind- en zonenergie, leveringszekerheid van hoge temperatuur-warmte,
2. TRL (*technology readiness level*) van productietechniek van waterstofdrager met deze grondstoffen en energie (hoe hoger, hoe betrouwbaarder);
3. de betrouwbaarheid van het transportnetwerk voor waterstof, waarbij we onderscheid maken tussen het landelijke waterstofnetwerk en een regionaal waterstofnetwerk.



Figuur 38: Opbouw betrouwbaarheid

Leveringszekerheid grondstoffen en energie

Bij de beoordeling van de betrouwbaarheid van levering van grondstoffen en energie beschouwen we de levering van aardgas via het aardgasnet als de norm. Dit heeft een zeer hoge betrouwbaarheid. Voor andere grondstoffen en energie bepalen we een kwalitatief nadeel ten opzichte van deze norm. Een licht nadeel krijgt de score 1, een groter nadeel de score 2, en een nog groter nadeel de score 3. De hulpstoffen (chemicaliën) spelen een ondergeschikte rol en zijn niet gescoord, Tabel 24.

Tabel 24: Inschatting van betrouwbaarheid van levering van grondstoffen en energie ten opzichte van de norm aardgas.

Onderdeel	Nadeel ten opzichte van aardgaslevering		Motivatie
	Industrie-clusters	Decentrale industrie	
Leveringszekerheid biomassa-import uit Baltische staten)	1	n.v.t.	Risico op onderbreking van aanvoer over zee. Voldoende opslag in importhaven is mitigatiemaatregel. Zeetransport en op- en overslag is betrouwbaar. Certificatie van duurzame biomassa is een aandachtspunt.
Leveringszekerheid biomassa uit binnenland	n.v.t.	2	Risico op onderbreking van aanvoer, beperkte hoeveelheid en seizoensafhankelijkheid binnenlandse biomassa, certificatie van duurzame biomassa, verlies door broei. Voldoende opslag is mitigatiemaatregel, evenals keuze voor vergassingsproces dat naast houtsnippers ook andere lokale biomassa kan verwerken.
Leveringszekerheid rioolslib	-	-	Redelijk constant volume uit zekere bron, verwerking van afvalwater blijft immers nodig, maar beperkt beschikbaar.
Leveringszekerheid afval	-	-	Redelijk constant volume uit zekere bron, verwerking van afval blijft immers nodig, maar beperkt beschikbaar.
Leveringszekerheid water	-	1 (koelwater); 2 (proceswater)	In binnenland risico op waterinnameverbod bij droogte. Proceswateraanvoer stopt dan meteen zodat productie moet worden stilgelegd, koelwater kan nog binnen fabriek gerecycled worden totdat het te warm is.
Leveringszekerheid elektriciteit (mix uit elektriciteitsnet)	1	2	Risico op beperking van levering door netcongestie en daardoor verplichte afschakeling. Producenten in clusters houden hier met back-upvoorzieningen rekening mee.
Leveringszekerheid duurzame elektriciteit (wind, zon, direct)	2	3	Idem. Aanname is dat de locatie naast directe levering van zon en wind ook een netaansluiting als back-up zal hebben. Via netaansluiting wordt dan via PPA Wind op Zee geleverd.
Leveringszekerheid zeerhogetemperatuur-warmte	1	2	Levering van zeerhogetemperatuur-warmte in het binnenland veelal afhankelijk van een enkele leverancier, in de grote clusters meer mogelijkheden (industriële warmtenet).

Elektriciteitslevering kan worden onderbroken door een black-out of een (preventieve) capaciteitsreductie door de netbeheerder. Een SMR, ATR of vergassinginstallatie heeft in beide gevallen last omdat heropstarten van het proces na de verstoring langzaam gaat. Een elektrolyser heeft minder last omdat deze bij verstoring stopt en daarna weer snel opstart, en bij capaciteitsverlaging op deellast kan draaien. Om het risico van elektriciteitsverstoring te mitigeren hebben SMR-installaties een eigen elektriciteitsvoorziening, die gebruik maakt van de restwarmte van het proces, of kunnen ze terugvallen op nabije elektriciteitsopwekking in een cluster. Ook andere waterstofproductietechnieken kunnen deze aanpak volgen. Bij de locatiekeuze wordt juist gezocht naar plekken waar het risico het kleinst is door inpassing in een (chemisch) cluster. In de regio zijn er minder terugvalopties.

Waterschaarste kan leiden tot een verbod op industrieel gebruik van drinkwater (nu al actueel), en innameverboden van zoet oppervlaktewater, zodat de industrie meer afhankelijk wordt brak

water of effluent van waterzuiveringen. Zuivering van water is sowieso nodig omdat alle stromen stoffen bevatten die niet wenselijk zijn in waterstofproductieprocessen, behalve in het geval van rioolslibvergisting.

TRL van productietechnieken en operationele ervaring

Bij de beoordeling van de betrouwbaarheid van productietechnieken gaan we uit van de inschattingen van Technology Readiness Levels. Hoe hoger de TRL, hoe betrouwbaarder de techniek. Diverse studies geven inschattingen van TRL, waarbij soms verschillen optreden. Als een techniek op een bepaald TRL wordt ingeschat, wil dat niet zeggen dat alle fabrikanten dat al halen. Door ons gebruikte bronnen zijn o.a. Hydrogen Europe (2024), JRC, Onigbujamo (waterontleding) en Alam (rioolslibvergisting). We gebruiken de TRL om een nadeel ten opzichte van de norm SMR te bepalen. Elke TRL-schaal lager levert een punt extra op, zie Tabel 25.

Tabel 25: Inschatting van TRL productietechniek in combinatie met schaal in 2035

	Industrie-clusters	Decentrale industrie	Motivatie
Elektrolyse-mix	TRL 9	TRL 9	Elektrolyzers, zowel alkalisch als PEM, zijn verkrijgbaar en kunnen modulair gecombineerd worden tot grote installaties.
Elektrolyse-groen	TRL 9	TRL 9	idem
Houtrestenvergassing	TRL 7	TRL 8	Meerdere demonstratiefabrieken maar vooral op productie van syngas en/of vloeibare brandstoffen gericht, zelden op waterstof. Toe te voegen watergasshift en PSA zijn ook bewezen technieken. Haffner (Fra) demonstreert H ₂ via thermolyse van houtsnippers.
Afvalvergassing met CCS	TRL 8	TRL 8	Meerdere demonstratiefabrieken (commerciële fabriek in Canada gesloten) maar vooral op productie van syngas en/of vloeibare brandstoffen gericht, niet op waterstof. Techniek afvalvergassing op grote schaal wordt volwassener geacht dan voor biomassa. Toe te voegen watergasshift, PSA en CCS zijn ook bewezen technieken.
Rioolslibvergisting		TRL 7	Procestechnologie is beschikbaar, inregelen met effectieve bacteriestammen onder juiste condities vraagt ontwikkeling. Veel aandacht is gericht op maken van biogas/groengas zodat commerciële prikkel voor verbetering van slibvergisting naar H ₂ ontbreekt
Waterontleding	TRL 6	TRL 6	Op pilotschaal gedemonstreerd (met zonnewarmte, niet met industriële restwarmte). Nadruk ligt op labonderzoek naar beste redox-katalysatoren.
Methaanontleding	TRL 8	TRL 9	Plasmaproces Monolith (VS) op kleine schaal bewezen, opschaling in gang gezet.
SMR	TRL 9		Standaard techniek op grote en kleinere schaal toegepast
SMR met CCS	TRL 9		Beide onderdelen op grote schaal bewezen, combinatie is toepasbaar
ATR met CCS	TRL 9	TRL 9	Wordt op grote schaal toegepast

Naast TRL van de productietechnieken, die vooral de kunde en ervaring van de leverancier weergeeft, is ook de mate van operationele ervaring met de techniek van belang. Met de huidige marktrijpe productietechnieken is jarenlange ervaring, waarbij soms door schade en schande is geleerd hoe de techniek moet worden bedreven. Met nieuwe technieken is die ervaring ook in 2035 nog minder. Ook speelt hier mee dat nieuwe technieken eerder nieuwkomers in de markt aantrekken. Met SMR en elektrolyse (zij het minder met PEM en AEL) is in Nederland de meeste ervaring, gevolgd door ATR. Met vergassing en vergisting is wel enige ervaring, zij het niet voor productie van waterstof. Met plasmatechniek en waterontleding via thermolyse is geen ervaring. We geven daarom SMR (ook met CCS) geen extra scorepunt;

ATR, elektrolyse, vergassing en vergisting een extra score van 1; en methaantonleding en waterontleding een extra score van 2.

Stakeholders wijzen ook op de schaarste van goed personeel als een risico voor betrouwbaarheid. Enerzijds voor inzet bij de bouw van de installaties, anderzijds voor de bedrijfsvoering en onderhoud. De personeelsschaarste is echter een probleem voor alle productiepaden. De industrie wijst erop dat zij personeel sowieso een interne opleiding moet geven om ze op het gewenste kennisniveau te brengen.

Betrouwbaarheid van het waterstoftransportnetwerk en van de CCS-keten

We kennen aan het regionale waterstofnetwerk een scorepunt extra toe omdat we veronderstellen dat transport via het landelijke waterstofnetwerk betrouwbaarder zal zijn vanwege 24/7-monitoring en back-upfaciliteiten voor elektriciteitsvoorziening, caverneopslag en meerdere toevorroutes die bij een regionaal waterstofnetwerk minder sterk aanwezig zullen zijn.

Aan productietechnieken die in de regio gebruik maken van CCS kennen we ook een scorepunt extra toe vanwege het logistieke risico van vloeibaar CO₂-transport. Bij verstoringen van de keten kan geproduceerde CO₂ niet worden afgevoerd en moet het worden geventileerd, met als gevolg dat de waterstof niet de vereiste CO₂-reductie behaalt. De verstoring kan zich voordoen bij het laden van het schip bij de productielocatie, of het lossen van het schip bij het invoerpunt van Aramis. Dit risico doet zich vrijwel niet voor bij CCS in industrieclusters, waar het CO₂ per buisleiding wordt afgevoerd.

Totale resultaat

Door de voorgaande tabellen te combineren, dat wil zeggen de scores bij elkaar op te tellen, komen we tot totaalscores op het publiek belang betrouwbaarheid voor de tien waterstofproductietechnieken, voor beide scenario's, zie Tabel 26 en Figuur 39.

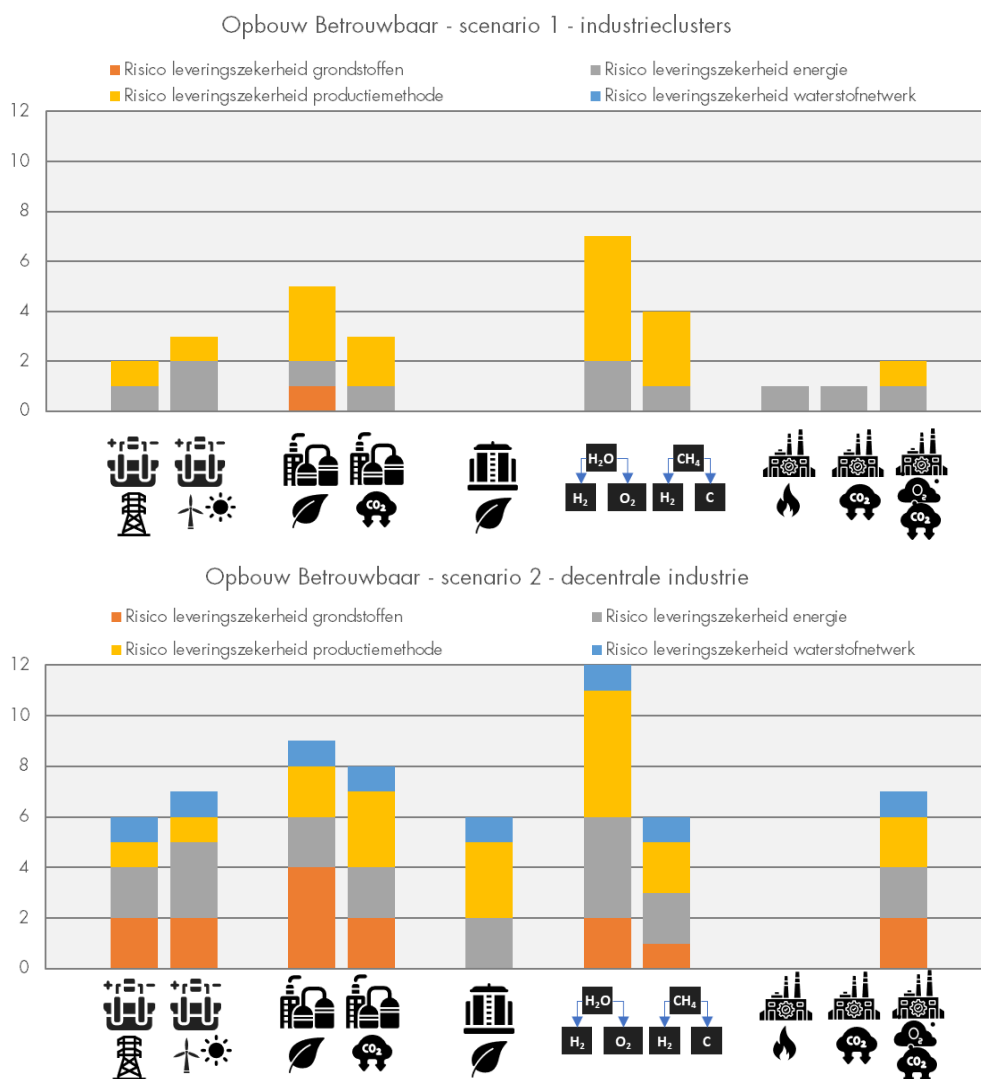
Tabel 26: Inschatting van relatieve score betrouwbaarheid (hoe lager hoe beter – niet genormaliseerd)

industriecusters	grondstoffen	energie	productie: TRL en operationele ervaring	netwerk H ₂ en/of CCS	totaal	Voornaamste risico voor betrouwbaarheid
Elektrolyse-mix	-	1	1	-	2	Elektriciteitslevering
Elektrolyse-groen	-	2	1	-	3	Elektriciteitslevering
Houtrestenvergassing	1	1	3	-	5	Biomassalevering, elektriciteitslevering, TRL-verbetering door focus op liquid fuels; met vergassing naar H ₂ is nog weinig ervaring
Afvalvergassing	-	1	2	-	3	Elektriciteit, met vergassing naar H ₂ is nog weinig ervaring, extra complexiteit CCS
Ontleding H ₂ O	-	2	5	-	7	Nog lage TRL; betrouwbaarheid van levering van HT-warmte kan ook probleem zijn
Ontleding CH ₄	-	1	3	-	4	Elektriciteit; grote schaal nog niet op TRL 9
SMR	-	1	-	-	1	Benchmark, elektriciteitslevering
SMR + CCS	-	1	0	-	1	Elektriciteitslevering
ATR + CCS	-	1	1	-	2	Elektriciteitslevering, ervaring
Decentrale industrie						
Elektrolyse-mix	2	2	1	1	6	Waterinname bij droogte, elektriciteitslevering
Elektrolyse-groen	2	3	1	1	7	Waterinname bij droogte, elektriciteitslevering
Houtrestenvergassing	4	2	2	1	9	Biomassalevering, koelwaterinname bij droogte, elektriciteitslevering
Afvalvergassing	2	2	2	2	8	Waterinname bij droogte, elektriciteitslevering, CCS afvoer risico
Rioolslibvergisting	-	2	3	1	6	Elektriciteitslevering, lage TRL
Ontleding H ₂ O	2	4	5	1	12	Nog lage TRL, waterinname bij droogte, levering van ZHT-warmte
Ontleding CH ₄	1	2	2	1	6	Elektriciteit, inname koelwater bij droogte
ATR + CCS	2	2	1	2	7	Waterinname; CCS afvoer risico, elektriciteitslevering

De meest gunstige scores zijn voor de productietechnieken die fossiele grondstoffen gebruiken doordat leveringszekerheid van het elektriciteitsnet hier geen groot risico vormt.

In scenario 2 ondervinden meerdere technieken last van een mogelijk innameverbod van oppervlaktewater bij droogte en een hoger risico op storingen in het regionaal waterstofnetwerk ten opzichte van het landelijke waterstofnetwerk.

De minst gunstige scores zijn voor de productietechniek waterontleding via thermolyse in scenario 2. Waterontleding heeft deze lage score als gevolg van de combinatie van risico van het regionaal waterstofnetwerk, beperking van waterinname bij droogte, afhankelijkheid van een zeerhogetemperatuur-warmtebron (als die bron uitvalt is er geen alternatief) en het lage TRL van de productietechniek.



Figuur 39: Opbouw betrouwbaarheid per waterstofproductietechniek

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.⁶⁸

Bij veiligheid kijken we naar direct gevaar voor de veiligheid en gezondheid van mensen. Langetermijngevolgen 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.

Bronnen die we hebben gebruikt zijn onder andere:

⁶⁸ Voor de onderlinge weging gebruiken we de weegfactoren volgens MCA waterstofdragers; 55% omgevingsveiligheid, 32% cyber & terrorisme, en 13% transportveiligheid.

- De resultaten voor de referentie per incident op basis van expertsessies voor MCA waterstofdragers
- Teamanalyse en aanvullende literatuur en interviews met experts
- Aanvullingen door TNO, JRC en stakeholders.

Omgevingsveiligheid

Omgevingsveiligheid gaat over het risico dat de omgeving loopt op potentiële incidenten bij de aanvoer van grondstoffen en energie, de productie van waterstof in de fabriek, het transport van waterstof met buisleidingen en van CO₂ per buisleiding, vrachtwagen of binnenvaartschip.⁶⁹ Bij het bepalen van de scope van het onderzoek is besloten om de effecten van transport van bijproducten naar eindgebruikers niet mee te rekenen. Alleen voor afgevangen CO₂ die moet worden opgeslagen zijn tijdelijke opslag en transport naar Aramis meegenomen.

Omdat het gaat om min of meer 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 in deze studie gebruikte methodiek voor het bepalen van de score voor omgevingsveiligheid is afgeleid van de methodiek van het regionale risicoprofiel en de rijksbrede risicoanalyse nationale veiligheid⁷⁰. Deze methodiek is zeer uitgebreid en is daarom in de MCA waterstofdragers (2024) 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. Per incidentscenario (bijvoorbeeld lekkage, explosie) en per ketenstap zijn in de MCA waterstofdragers de kans op en het effect van incidenten met verschillende waterstofdragers beoordeeld. Het omgevingsrisico van de leveringsketens is benaderd door in twee sessies met experts zes type incidenten te beoordelen en zo risicomatrices in te vullen. Hieraan namen deskundigen deel van veiligheidsregio's, omgevingsdiensten, havenbedrijven, RIVM, kennisinstellingen, provincies en rijksoverheid.

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 en het volume per installatie of het aantal afgelegde tonkilometers. De focus bij de beoordeling lag op het meest ernstige incident, maar ook andere effecten zijn in de beschouwing meegenomen. 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.

In de huidige studie hebben we een andere methode gekozen, omdat de omvang en doorlooptijd van het onderzoek niet toeliet om opnieuw sessies met experts te houden. We hebben nu gekozen voor het inschatten van een procentuele hogere of lagere incidentkans en effect ten opzichte van een referentiewaarde per ketenonderdeel, die in de MCA waterstofdragers met de experts kwalitatief en kwantitatief is beoordeeld. Dit is gedaan voor de volgende ketenonderdelen:

- Opslag en overslag van biomassa, rioolslib en afval, vergeleken met opslag van LNG

⁶⁹ Bij transport van grondstoffen en producten gaat het hier om slachtoffers als gevolg van het vrijkomen van gevaarlijke stoffen, niet om een 'gewone' aanrijding of aanvaring waarbij verkeersslachtoffers vallen. Dit laatste valt onder transportveiligheid.

⁷⁰ Analistennetwerk Nationale Veiligheid, Rijksbrede Risicoanalyse Nationale Veiligheid, 2022, Arcadis, Gemini Consultants, Houdijk Advies, Stichting Werkgemeenschap tussen Techniek en Zorg, Handreiking regionaal risicoprofiel, 2009.

- Wegtransport van biomassa en afval, vergeleken met wegtransport van LNG
- CO₂-opslag na afvang, vergeleken met opslag van LNG
- CO₂-transport per binnenvaart of per buisleiding, vergeleken met transport van LNG per binnenvaartschip of met aardgas per buisleiding
- Waterstofproductietechnieken, vergeleken met SMR als benchmark
- Waterstoftransport per regionaal waterstofnetwerk, vergeleken met het landelijke waterstofnetwerk.

De gebruikte aannames worden gegeven in tabellen per type incident. We houden hierbij geen rekening met de TRL-fase waarin de techniek zich bevindt, omdat we die bij het publiek belang Betrouwbaar al beschouwen. De kans op incidenten hebben we ingeschat voor een situatie waarin de techniek volwassen wordt verondersteld (in 2035).

Literatuur

Wij hebben geen studies gevonden die de veiligheidsaspecten van alle productietechnieken vergelijken, wel studies die een deel ervan onder de loep nemen. Zo vergelijken Calabrese et al. (2024) blauwe (koolstofarme) en groene (hernieuwbare) waterstof (Tabel 27). Naast een beschrijving van risico's geeft deze studie ook recente voorbeelden van ongevallen met waterstofproductie.⁷¹

Tabel 27: Belangrijkste veiligheidsaspecten met betrekking tot blauwe en groene waterstof

Blauwe waterstof	Groene waterstof
Tijdens de productie worden grote hoeveelheden waterstof verwerkt, wat bij onbedoeld vrijkomen tot een ontvlambare situatie leidt.	Ook bij groene waterstofproductie worden aanzienlijke hoeveelheden waterstof verwerkt, wat leidt tot potentiële gevaren bij vrijkomen ervan.
Het transport en de opslag van afgevangen CO ₂ kan gepaard gaan met lekkage en mogelijke milieueffecten.	Tijdens elektrolyse wordt hoogspanning gebruikt, met risico op elektrische schokken, elektrocutie, kortsluiting en brand.
De reformingprocessen vinden plaats bij hoge temperaturen en druk, waardoor robuuste apparatuur en veiligheidsmaatregelen vereist zijn.	Elektrolyse maakt gebruik van elektrolyten die tot chemische blootstelling van personeel kunnen leiden.
Typische ongevallen: Ontbranding van vrijkomend waterstof, die leidt tot CO ₂ emissie door verbranding van grondstoffen voor waterstofproductie.	Typische ongevallen: Brand in alkalische elektrolysecellen, waterstofexplosie, waterstof-zuurstofexplosie, membraanperforatie in een PEM-cel, vernietiging van een PEM short stack, explosie van H ₂ /O ₂ met kortsluiting, brand, explosie van waterstofgashouder door een storing in de elektrolyser.

Chau et al. (2022) hebben met een multi-criteria-benadering de veiligheidsaspecten van SMR, ATR, alkalische elektrolyse en PEM-elektrolyse vergeleken (naast partiële oxidatie en solid oxide electrolyzer cell elektrolyse).⁷² Zij bepaalden de bedrijfsveiligheid kwalitatief op basis van de soorten mogelijke ongevallen en de blootstelling van personeel aan gevaarlijke omstandigheden tijdens de waterstofproductie. Aspecten die zij meewogen zijn:

⁷¹ Calabrese, M., M. Portarapillo, A. Di Nardo, V. Venezia, M. Turco, G. Luciani, A. Di Benedetto (2024). Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive Review on Production, Storage, Transport, Utilization, and CFD-Based Consequence and Risk Assessment. *Energies* **2024**, *17*, 1350.

⁷² Kevin Chau, Abdoulaye Djire, Faisal Khan (2022). Review and analysis of the hydrogen production technologies from a safety perspective. *International Journal of Hydrogen Energy* *47*, 13990-14007.

- De mogelijkheid van dampwolkexplosies maakt SMR riskant. SMR-systemen zijn explosiegevoeliger en complexer dan de andere alternatieven, zodat het effect hoger wordt ingeschat. Processen bij hoge temperaturen en druk vereisen een betere procesbeheersing en robuustere materialen om de veiligheidsrisico's te minimaliseren.
- Kortere opstart- en stoptijden maken ATR veiliger, maar er is nog steeds een risico op dampwolkexplosies.
- Door de relatieve eenvoud is alkalische elektrolyse minder explosiegevoelig.
- De hogere druk van PEM maakt de werking gevaarlijker dan die van alkalische elektrolyse. Elektrolytische processen bij hoge druk verhogen het risico voor waterstof-zuurstofmengsels, en vereisen daarom nauwlettende controle.

De studie geeft SMR-technologie niet de hoogste beoordeling op het gebied van veiligheid of automatisering, maar acht controle en monitoring ervan voorspelbaarder dan van concurrerende technologieën omdat het SMR-proces goed begrepen wordt.

We hebben deze argumenten gebruikt bij het beoordelen van de waterstofproductietechnieken, waarbij we voor de in de genoemde studies niet behandelde technieken dezelfde aspecten hebben meegewogen.

Opslag en transport biomassa, afval en rioolslib

Het risico (kans maal effect) van transport en overslag/opslag van biomassa (broei & brandbaar), afval (brandbaar) en nat rioolslib (niet brandbaar) is laag ten opzichte van transport en opslag van LNG (koude, drukopbouw, explosie (bleve) en brandgevaar). Dit is vertaald in de volgende inschattingen voor kans en effect, zie Tabel 28. De inschattingen voor transport zijn geschaald naar hoeveelheid tonkm, voor opslag naar aantal ton dat wordt opgeslagen.⁷³

Tabel 28: Gebruikte inschattingen omgevingsveiligheid opslag en transport biomassa en afval t.o.v. LNG (100%)

	Opslag/overslag biomassa/afval		Wegtransport biomassa/afval	
	Kans	Effect (kton)	Kans	Effect (tonkm)
Houtrestenvergassing: scenario 1	10%	20%	5%	5%
Houtrestenvergassing: scenario 2	10%	12%	5%	5%
Afvalvergassing: scenario 1	5%	10%	5%	3%
Afvalvergassing: scenario 2	5%	6%	5%	3%
Rioolslibvergisting: scenario 2	2%	0%	2%	0%

CO₂ opslag en transport

Het risico (kans maal effect) van transport en overslag van CO₂ (niet brandbaar, verstikkende deken des te meer bij grote lekkage van grote opslag of buisleiding) is lager dan voor transport en opslag van LNG (koude, drukopbouw, explosie (bleve) en brandgevaar).

We hebben de kans op een incident bij CO₂-opslag lager verondersteld vanwege de minder lage temperatuur dan LNG, minder materiaalstress dan LNG, maar heeft bij een grote lekkage wel risico op een verstikkende deken, zie Tabel 29. Er is minder *boil-off* bij vloeibaar CO₂ dan bij LNG en het is niet-brandbaar. Het risico op graafschade aan een buisleiding is even hoog geschat voor aardgas en CO₂, net als op een aanvaring met een binnenvaartschip met LNG of vloeibaar CO₂.

⁷³ Wortel functie voor verhouding scenario 1 en 2.

Omdat bij CO₂ geen brand of explosie optreedt, zoals bij LNG, is het effect lager. Een lek van vloeibaar CO₂ is zichtbaar (condensatie/droogijs). Bij een grote lekkage kan met name bij gasvormige CO₂ onder druk wel een verstikkende deken ontstaan, die onzichtbaar en reukloos is.

Tabel 29: Gebruikte inschattingen omgevingsveiligheid opslag en transport CO₂ ten opzichte van aardgasleiding of LNG-transport en opslag (100%)

	Opslag/overslag CO ₂		Binnenvaarttransport CO ₂		Buistransport CO ₂	
	Kans	Effect (kton)	Kans	Effect (tonkm)	Kans	Effect (tonkm)
Scenario 1	n.v.t.	n.v.t. (15)	n.v.t.	n.v.t.	100%	15%
Scenario 2	15%	9%	100%	10%	n.v.t.	n.v.t.

Productietechnieken

Om de kans en effect van een incident te bepalen voor de verschillende productietechnieken hebben we de factoren die hierop van invloed zijn systematisch afgelopen per techniek voor scenario 1. Elke eigenschap die de kans of het effect verhoogt ten opzichte van SMR (100% = referentie) geven we een 5%-punten hogere kans of effect. Iedere eigenschap die gunstig is betekent juist een verlaging van kans of effect met 5%-punten. De kans op een incident is in scenario 2 gelijk verondersteld. Het effect is vanwege het lagere volume kleiner, maar niet proportioneel kleiner. Hiervoor hebben we de volgende formule⁷⁴ gebruikt:

$$\text{Effect scenario 2} = \text{effect scenario 1} \times \sqrt[3]{50 \text{ kton} / 10 \text{ kton}}$$

De verschillende kenmerken hebben we gelijk gewogen, behalve het aspect ervaring. Dat hebben we twee keer zo zwaar meegewogen in de beoordeling van de kans op een incident, zie Tabel 30.

⁷⁴ Dit geldt ook voor opslag.

Tabel 30: Kenmerken en beoordeling kans op incident (groen gunstig, geel neutraal, rood ongunstig, paars zeer ongunstig)

Kans op incident productie	Hoge druk/temperatuur (brand/e xplosie)	Brand-bare grondstof (brand/e xplosie)	CO ₂ -afvang (verstik-king)	Waterstof eindpro-duct (brand/e xplosie)	Hoog-span-nig/ elektrocu-tie	O ₂ (explo-sie/ brand)	Extra	Ervaring
Elektrolyse (AEL)						Output	*	
Elektrolyse (PEM)						Output	**	
Houtrestenver-gassing						Input	***	
Afvalvergasa-sing						Input	***	
Rioolslibver-gisting								
Waterontle-ding	Tempera-tuur					Output	****	
Methaanont-leding	Temp. plasma						****	
SMR								
SMR + CCS								
ATR + CCS						Input		
Weging	1	1	1	1	1	1	1	2
* Het gebruik van kaliloog kan corrosie veroorzaken en daarmee risico op incidenten. ** Bij gasdoorslag door het membraan in een PEM-elektrolyser kunnen waterstof en zuurstof zich mengen. Dit levert een explosief mengsel op. *** Risico door wisselende samenstelling grondstof, vastlopen proces door afzetting vaste stoffen. **** Relatief eenvoudig proces en ontwerp installatie.								

Voor het effect hebben we een vergelijkbare exercitie gedaan. In dit geval is ervaring minder relevant, maar de mogelijkheid om het proces snel te stoppen is dat wel. Als het proces niet snel gestopt kan worden door bijvoorbeeld de elektriciteitstoevoer te stoppen, brengt dit een risico op runaway-effecten met zich mee, zie Tabel 31.

Tabel 31: Kenmerken en beoordeling effect van incident (groen gunstig, geel neutraal, rood ongunstig)

Effect van incident productie	Hoge druk/temperatuur (brand/-explosie)	Brandbare grondstof (brand/-explosie)	CO ₂ -afvang (verstikking)	Waterstof eindproduct (brand/explosie)	Hoogspanning/elektrocute	O ₂ (explosie/brand)	Beperking effect
Elektrolyse (AEL)						Output	
Elektrolyse (PEM)						Output	Snelle stop
Houtrestenvergassing						Input	
Afvalvergassing						Input	
Rioolslibvergisting							
Waterontleding	Temperatuur					Output	Snelle stop/start
Methaanontleding	Temp. plasma						Snelle stop/start
SMR							
SMR + CCS							
ATR + CCS						Input	Snelle stop
Weging	1	1	1	1	1	1	1

Het gebruik van natronloog (afvalvergassing), zoutzuur (rioolslibvergisting) en het vrijkomen van waterstofsulfide (rioolslibvergisting) kan nadelig effect hebben op de veiligheid van personeel. Dit hebben we niet apart meegenomen. In een industriële setting is dit effect ondergeschikt verondersteld aan andere risico's. De resulterende kansen en effecten van deze analyse staan in Tabel 32.

Tabel 32: Gebruikte inschattingen omgevingsveiligheid productie ten opzichte van productie SMR in scenario 1, effect scenario 2 geschaald

Productie	Kans	Effect
Elektrolyse scenario 1 (AEL)	100%	100%
Elektrolyse scenario 2 (PEM)	110%	53% (90%*)
Houtrestenvergassing scenario 1	130%	105%
Houtrestenvergassing scenario 2		61%
Afvalvergassing scenario 1	130%	105%
Afvalvergassing scenario 2		61%
Rioolslibvergisting scenario 2	115%	50%
Waterontleding scenario 1	115%	85%
Waterontleding scenario 2		50%
Methaanontleding scenario 1	115%	95%
Methaanontleding scenario 2		56%
SMR scenario 1	100%	100%
SMR + CCS scenario 1	115%	105%
ATR + CCS scenario 1	130%	105%
ATR + CCS scenario 2		61%

* bij productie in scenario 1 is effect 90%

Waterstofnetwerk

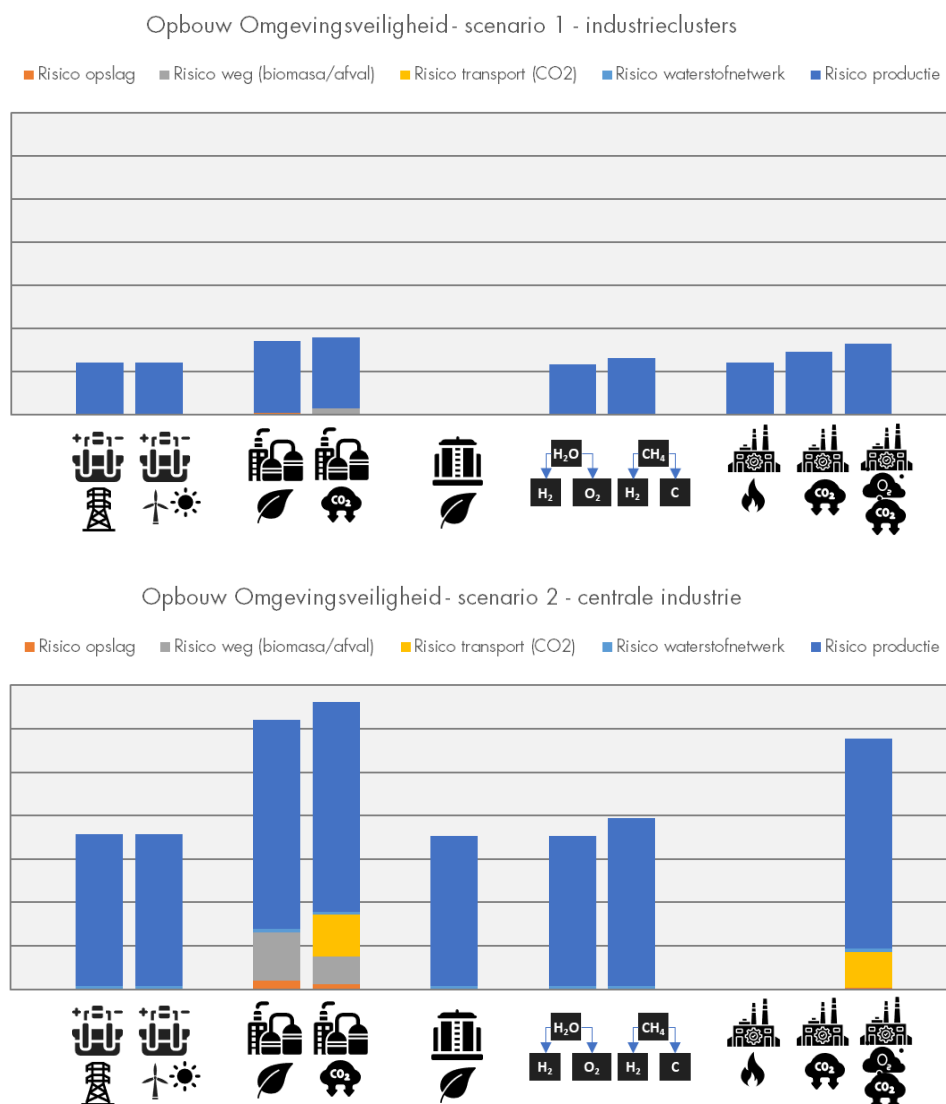
Het risico (kans maal effect) van een incident (brand, explosie) bij het transport van waterstof in het regionale waterstofnetwerk is per kilometer iets hoger door de hoger veronderstelde kans op een incident per kilometer dan in het landelijke waterstofnetwerk. Het effect wordt door stakeholders gelijk verondersteld, zie Tabel 33. Bij dit soort volumes kan in beide gevallen een explosie en brand ontstaan. In de vergelijking per kilogram waterstof levert dit een significant hoger risico op voor scenario 2 omdat het aantal nieuw aangelegde km buisleiding per kton waterstof veel hoger is dan voor een hoge capaciteit aansluiting op het landelijke waterstofnetwerk.

Tabel 33: Gebruikte inschattingen omgevingsveiligheid regionaal waterstofnetwerk ten opzichte van landelijke waterstofnetwerk

Per tonkm	Buisleiding transport waterstof	
	Kans	Effect (tonkm)
Scenario 1	100%	100%
Scenario 2	105%	100%

Totaalscores op omgevingsveiligheid

Figuur 40 laat het eindresultaat zien van de verschillende inschattingen voor kans en effect. Hoewel doorgaans de hoogste risico's optreden in de logistieke keten, vormen de productierisico's een groter aandeel van het geheel. Dit komt omdat de stoffen die over weg en binnenvaart vervoerd worden relatief weinig tot geen omgevingsrisico opleveren ten opzichte van de vaak brandbare, explosieve stoffen en hoge temperaturen en voltages die in de productiefaciliteit aanwezig zijn. Van de getransporteerde stoffen heeft CO₂ het grootste risico (op verstikking). Dit risico hebben de experts als veel lager ingeschat dan het risico bij brand of explosie. Een lekkage van CO₂ zal meestal klein zijn en snel verdunnen of verwaaien waardoor geen verstikkingsgevaar optreedt. Voor CO₂ kijken we alleen naar transport per binnenvaartschip (scenario 2) en buisleiding (scenario 1). Dit zijn relatief veilige transportwijzen vergeleken met transport over weg of spoor.



Figuur 40: Opbouw omgevingsveiligheid per waterstofproductietechniek

Cyberveiligheid 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.

In het kader van de MCA waterstofdragers (2024) is een expertsessie gehouden om dit risico in te schatten. Hieraan namen deskundigen van veiligheidsregio's, infrastructuurbeheerders, industrie en rijksoverheid deel. 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 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 hebben de experts ingeschat voor verschillende ketenonderdelen.

In de huidige studie hebben we een andere methode gekozen omdat de omvang en doorlooptijd van het onderzoek niet toeliet om opnieuw sessies met experts te houden. We hebben nu gekozen voor het inschatten van een procentuele hogere of lagere incidentkans ten opzichte van een referentiewaarde per ketenonderdeel, die in de MCA waterstofdragers met de experts kwalitatief en kwantitatief is beoordeeld. Dit is gedaan per ketenonderdeel net als voor de indicator omgevingsveiligheid.

De ernst van het effect van een incident in waterstofproductieketen is bepaald in de hiervoor gepresenteerde teamanalyse voor 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 (bijvoorbeeld platleggen van het energiesysteem). De scores per waterstofproductieketen zijn een optelsom van de afzonderlijke ketenonderdelen.

De 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 rangschikking zal hierdoor waarschijnlijk niet verschuiven.

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 in elke waterstofproductieketen 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.

De gebruikte input wordt gegeven in de tabellen bij de toelichting per type incident.

Opslag en transport biomassa, afval en rioolslib

We veronderstellen dat voor terroristen een cyberaanval of aanslag op een LNG-opslag veel interessanter is dan op biomassa- of afvalopslag: ICT-intensief en explosief/bleve versus ICT-arm en moeizame ontbranding. Voor terroristen is een aanslag op LNG-vervoer veel interessanter dan op biomassa- of afvaltransport: explosief/bleve versus moeizame ontbranding. De kansen hebben we daarom lager ingeschat dan bij omgevingsveiligheid, zie Tabel 34.

Tabel 34: Gebruikte inschattingen cyberveiligheid en terrorisme opslag en transport biomassa en afval ten opzichte van LNG (100%)

	Opslag/overslag biomassa/afval		Wegtransport biomassa/afval	
	Kans	Effect	Kans	Effect
Houtrestenvergassing: scenario 1	1%	20%	1%	5%
Houtrestenvergassing: scenario 2	1%	12%	1%	5%
Afvalvergassing: scenario 1	1%	10%	1%	3%
Afvalvergassing: scenario 2	1%	6%	1%	3%
Rioolslibvergisting: scenario 2	1%	0%	1%	0%

CO₂ opslag en transport

De kans op een aanval op een CO₂-opslag is kleiner dan op een LNG-opslag, want voor terreur is het kleinere effect minder interessant. De kans op een aanslag op een binnenvaartschip is klein omdat een CO₂-lek een beperkt effect heeft (alleen op de bemanning). Voor terroristen is aanslag op een LNG-tankschip interessanter. Een verstikkende CO₂-wolk veroorzaken is minder interessant dan een gasleidingexplosie/brand, maar interessanter dan andere CO₂-incidenten doordat de leiding onder druk tot grotere uitstroom leidt, zie Tabel 35.

Tabel 35: Gebruikte inschattingen cyberveiligheid en terrorisme opslag en transport CO₂ ten opzichte van aardgasleiding of LNG-transport en opslag (100%)

	Opslag/overslag CO ₂		Binnenvaarttransport CO ₂		Buistransport CO ₂	
	Kans	Impact	Kans	Impact	Kans	Effect
Scenario 1	n.v.t.	n.v.t. (15)	n.v.t.	n.v.t.	50%	15%
Scenario 2	15%	9%	5%	10%	n.v.t.	n.v.t.

Productietechnieken

Industrieclusters zijn interessantere doelwitten dan installaties in de regio. We veronderstellen een relatie tussen het effect van een incident gericht op een van de onderzochte waterstofproductieketens en de aantrekkelijkheid voor een terreur- of cyberaanval op dit doelwit. Dat betekent dat de percentages overeenkomen met het veronderstelde effect per productietechniek in scenario 1. De kleinere schaal in scenario 2 maakt een aanval minder interessant, dus minder kansrijk. Ten opzichte van scenario 1 halveren we de kans op een incident per fabriek. Door de lagere volumes is de resulterende kans per kilogram waterstof net iets hoger dan in scenario 1, zie Tabel 36.

Tabel 36: Gebruikte inschattingen cyberveiligheid en terrorisme productie ten opzichte van productie SMR scenario 1

Productie	Kans	Effect
Elektrolyse scenario 1 (AEL)	100%	100%
Elektrolyse scenario 2 (PEM)	45%	53% (90%)*
Houtrestenvergassing scenario 1	105%	105%
Houtrestenvergassing scenario 2	52,5%	61%
Afvalvergassing scenario 1	105%	105%
Afvalvergassing scenario 2	52,5%	61%
Rioolslibvergisting scenario 2	42,5%	50%
Waterontleding scenario 1	85%	85%
Waterontleding scenario 2	42,5%	50%
Methaanontleding scenario 1	95%	95%
Methaanontleding scenario 2	47,5%	56%
SMR scenario 1	100%	100%
SMR + CCS scenario 1	105%	105%
ATR + CCS scenario 1	105%	105%
ATR + CCS scenario 2	52,5%	61%

* bij productie in scenario 1 zou effect 90% zijn

Waterstofnetwerk

Een regionale waterstofleiding is mogelijk gemakkelijker te bereiken maar minder aantrekkelijk als het doel is om maatschappelijke ontwrichting te veroorzaken. De aan te leggen regionale waterstofleiding zal doorgaans in dunner bevolkt gebied liggen waar minder industriële activiteit is dan de aansluiting in een industrieel cluster. Hierdoor is de verwachte maatschappelijke ontwrichting kleiner, zie Tabel 37.

Tabel 37: Gebruikte inschattingen cyberveiligheid en terrorisme regionaal waterstofnetwerk ten opzichte van landelijk waterstofnetwerk

Per tonkm	Buisleiding transport waterstof	
	Kans	Effect
Scenario 1	100%	100%
Scenario 2	50%	100%

Transportveiligheid

De derde indicator voor het publieke belang Veilig is transportveiligheid. Het transport van grond- en hulpstoffen en afvangen CO₂ over de weg en het water (en het spoor) kan leiden tot een toename van het aantal verkeersongevallen.

Het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) en CE Delft hebben de maatschappelijke kosten van verkeersongevallen uitgedrukt in gemiddelde bedragen per vervoerd volume in tonkm. In de waardering van transportveiligheid zijn de volgende maatschappelijke kosten meegenomen: medische kosten, afhandelingskosten, materiële kosten, kosten van productieverlies, immateriële kosten en filekosten.

De kosten voor de deelindicator transportveiligheid hebben we berekend door deze waarderingskenticellen te vermenigvuldigen met de transportvolumes in tonkm voor grond- en hulpstoffen en afvangen CO₂ voor elke waterstofproductieketen (zie bijlage A). Voor buisleidingen zijn er (logischerwijs) geen kosten van verkeersongevallen, zie Tabel 38.

Tabel 38: Waarderingskentallen voor marginale kosten van verkeersongevallen (bron KiM 2023 en CE Delft 2022)

Modaliteit	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm	Toelichting
Weg	€ 3,30	Marginale kosten, gemiddelde vrachtwagen, KiM
Water	€ 0,41	Marginale kosten, gemiddeld binnenvaartschip, KiM
Zeevaart/kustvaart	€ 0,01	Gemiddelde kosten, CE Delft
Buisleiding, waterstofnet, aardgasnet	€ -	

DUURZAAM

Voor het publieke belang Duurzaam worden drie deelindicatoren gebruikt: broeikasgassen, energieverlies en materiaalgebruik.⁷⁵ Emissies van NO_x worden bij het publiek belang Milieu behandeld.

Broeikasgassen

In de verschillende productieketens worden bij waterstofproductie, grondstofwinning, opslag en transport hoeveelheden kool(stof)dioxide, methaan, lachgas en/of waterstof uitgestoten:

- Kooldioxide als gevolg van gemotoriseerd transport naar en binnen Nederland.
- Kooldioxide, methaan en waterstof bij de productie van waterstof, zie bijlage A.
- Methaan door *boil-off* van LNG tijdens transport en opslag en door lekkage uit het aardgasnet, bij de winning van aardgas. Deze emissies zijn per kilogram aardgas uitgedrukt, zie bijlage B.
- Waterstof door lekkage uit het waterstofnetwerk.

Deze emissies dragen direct (kooldioxide, methaan, lachgas) of indirect (waterstof) bij aan de opwarming van de aarde en daarmee aan versterkte klimaatverandering.

Om te kunnen voldoen aan de Europese broeikasgasemissie-eisen voor koolstofarme waterstof is het nodig dat bij SMR, ATR en de vergassing van afval CCS wordt toegepast.⁷⁶ Bij gebruik van groengas of biogene grondstoffen (houtrestenvergassing en rioolslibvergisting) wordt de vrijkomende CO₂ niet meegeteld, omdat het CO₂ betreft die eerder uit de atmosfeer is opgenomen.

We hebben de inschattingen voor de omvang van de emissies in de verschillende ketenstappen gebaseerd op literatuur. Bronnen die we gebruiken zijn onder andere:

- 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.
- Hydrogen Europe, stakeholderinterviews, Alam (rioolslibvergisting), Onigbujamo (waterontleding), MER FUREC (afvalvergassing), PBL (SDE++-advies 2025).
- De externe effecten van import van aardgas volgen uit Equinor, 2021.

⁷⁵ Voor de onderlinge weging gebruiken we de weegfactoren volgens MCA waterstofdragers; 67% broeikasgasemissies, 17% materiaalbeslag en 16% energieverlies.

⁷⁶ Bij toepassen van CCS bij bestaande SMR-installaties kan niet altijd aan deze eis worden voldaan. In bijlage A wordt dit verder besproken.

Broeikasgasemissies tijdens transport als gevolg van brandstofgebruik

Voor de uitstoot van CO₂ tijdens transport in Nederland gebruiken we kentallen van KiM (gebaseerd op CE Delft), uitgedrukt in kilogram CO₂ per tonkm, voor vrachtwagens en binnenvaartschepen.

- We nemen aan dat in 2035 de waarde van emissies door vrachtwagens en binnenvaart nog maar 70% is van de waarde in 2018-2023 vanwege aangescherpte normen onder druk van EU-regelgeving en klimaatambities.⁷⁷
- Voor buisleidingen nemen we aan dat compressie en verpompen elektrisch gebeurt.

Voor de broeikasgasemissies van transport over zee naar Nederland gebruiken we kentallen van de STREAM-studie van CE Delft.⁷⁸ Voor zeetransport nemen we de waarden voor een *deep sea bulkcarrier* van 35.000-60.000 *deadweight ton*. Voor kustvaart nemen we de waarden voor een *bulkcarrier* van 5.000-10.000 *deadweight ton*. Voor 2035 veronderstellen we een afname van 15% ten opzichte van gerapporteerde waarden, zie Tabel 39.

Tabel 39: Broeikasgasemissie tijdens transport (KiM, STREAM). CO₂, CH₄, N₂O uitgedrukt in CO₂-equivalenten

Som van <i>tank-to-wheel+well-to-tank</i>	Gecorrigeerde waarde 2035	
Weg	€ 17,64	-30% t.o.v. 2022 KiM
Binnenvaart	€ 6,16	-30% t.o.v. 2022 KiM
Buisleiding	Afhankelijk van elektriciteitsgebruik	
Zeevaart (LNG)	€ 0,73	-15% t.o.v. STREAM
Kustvaart (biomassa - kustvaart)	€ 2,43	-30% t.o.v. STREAM

Lekkage van waterstof bij buisleidingtransport

Volgens Gasunie bedraagt het verlies door emissie gemiddeld 0,01% van de getransporteerde waterstof. Dit percentage gebruiken we voor zowel het landelijke waterstofnetwerk als het regionale waterstofnetwerk. Doordat dit percentage voor alle productietechnieken gelijk is en ook per scenario heeft dit geen invloed op de rangschikking van de productietechnieken.

Global Warming Potentials

We hanteren de Global Warming Potential waarden voor de vrijkomende broeikasgassen zoals vermeld in Tabel 40. Global Warming Potential (GWP) 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.

⁷⁷ Volgens [Europees beleid](#) moeten 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.

⁷⁸ CE Delft (2021), STREAM Goederenvervoer 2020. Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer Versie 2.

Tabel 40: Global Warming Potentials van broeikasgassen (bron IPCC⁷⁹)

Broeikasgas	Global Warming Potential (100 jaar)
CO ₂	1
CH ₄	27,9
H ₂	11,6*

*) De GWP van H₂ ontbreekt in de IPCC-bron, deze waarde is ontleend aan Sand, M., et al. (2023).⁸⁰

Milieuprijs CO₂

Het GWP-cijfer vermenigvuldigen we met de milieuprijs (centrale waarde) voor uitstoot van CO₂ volgens het milieuprijzenhandboek van CE Delft (€ 130/ton CO₂).⁸¹ Deze waarde zou opgehoogd kunnen worden omdat we nu kijken naar 2035. Aan de andere kant zijn er ook verschillende scenario's waarbij de prijs in 2035 varieert tussen € 29 en € 726 per ton⁸². We hebben ervoor gekozen deze waarde nu niet aan te passen. Dit zou namelijk ook de milieuwaarde voor methaan beïnvloeden.

Energieverlies

De tweede deelindicator voor het publieke belang Duurzaam is energieverlies. Voor de waterstofproductietechnieken is voor verschillende ketenstappen energie-input nodig:

- Voor productie van waterstof en het afvangen van CO₂ in de vorm van de gebruikte energie (warmte, elektriciteit of aardgas, zie bijlage A) en grondstoffen (houtpellets, houtsnippers, slib, afval, zuurstof, zie bijlage B)
- Voor het transport van de energie en grondstoffen per zeeschip (LNG en houtpellets), per binnenvaartschip (CO₂) en over de weg (rioolslib, afval, houtsnippers) en voor het transport van waterstof, CO₂ en aardgas per buisleiding.
- Gedurende transport zijn er verliezen van methaan/aardgas en waterstof door lekkage, zie bijlage B.
- Voor het vloeibaar maken en de tijdelijke opslag van CO₂ is in scenario 2 ook energie nodig, zie Tabel 41.

Al deze energie-input beschouwen we als energieverlies. Het alternatief dat de minste energie-input nodig heeft om een kilogram waterstof bij de eindgebruiker af te leveren krijgt de hoogste score op dit aspect.

We hebben de inschattingen voor de benodigde hoeveelheid energie en de verliezen gedurende productie en transport gebaseerd op literatuur, onder andere:

⁷⁹ 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.

⁸⁰ 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.

⁸¹ CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.

⁸² Met ingang van 1 januari 2026 gelden een nieuwe discontovoet en nieuwe Welvaart- en Leefomgevingsscenario's. Hierdoor is de inschatting van de CO₂-schaduwprijs nu hoger dan tijdens het uitvoeren van het onderzoek is verondersteld. Voor genormaliseerde scores maakt de prijs geen verschil.

- JRC2, Hydrogen Europe, stakeholderinterviews, Alam (rioolslibvergisting), Onigbujamo (waterontleding), MER FUREC (afvalvergassing), PBL (SDE++-advies 2025).

Tabel 41: Energieverlies (elektriciteit) voor vloeibaar maken en opslaan CO₂ in MJ/ kg waterstof

centraal		toelichting	
Opslag CO ₂	0,4 MJ per kg CO ₂	Aanname o.b.v. artikel Øy en Eldrup ⁸³	

Energieverlies van transport

Tabel 42 geeft het veronderstelde energiegebruik van het transport in 2035.

Tabel 42: Energieverlies van binnenlands transport van waterstofdragers in 2035 in MJ/tonkm

Energiegebruik MJ/tonkm	Stream 2020	Correctie voor 2035	Gebruikte waarde	Toelichting
Weg	0,90	-20%	0,72	
Binnenvaart	0,40	-20%	0,32	
Zeevaart	0,07	-10%	0,06	
Kustvaart	0,23	-10%	0,21	

Materiaalgebruik

De derde deelindicator voor publiek belang Duurzaam is materiaalgebruik. Onder materiaalgebruik bepalen we de omvang van het beslag op de schaarse materialen die nodig zijn voor de productieketen (kritieke materialen voor installaties, processen en als grondstof voor waterstof). Het gaat hierbij om verschillende katalysatoren en gebruikte grondstoffen die door EU zijn aangemerkt als kritiek.

De verschillende materialen brengen we onder één noemer door ze te vermenigvuldigen met de huidige marktprijs. De indicator die we per productietechniek vergelijken, is de waarde van het beslag op kritieke materialen per kton waterstof.

Als voor de productie van waterstof veel en schaarse materialen nodig zijn, beschouwen we dat als minder duurzaam. Ook heeft het gebruik van schaarse materialen economische en geopolitieke aspecten. Deze hebben we 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:

- Per ketenstap bepalen we welke en hoeveel schaarse materialen nodig zijn per kton waterstof (zie bijlage A). We beschouwen een materiaal als schaars als het op de lijst van kritieke en strategische materialen staat die de Europese Commissie bijhoudt.⁸⁴ Dit betreft in het bijzonder de materialen nikkel, platina en cerium, die worden gebruikt in katalysatoren voor elektrolyse en bij ontleding van water via thermolyse.
- De materialenbehoefte 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.

⁸³ [\(PDF\) Simulation and Cost Comparison of CO₂ Liquefaction](#)

⁸⁴ [Lijst van kritieke en strategische materialen van Europese Commissie.](#)

- De resulterende bedragen per waterstofproductieketen plotten we op een schaal van 0 tot 1, waarbij 0 staat voor het hoogste effect van materiaalgebruik en 1 voor het laagste effect van materiaalgebruik in de ketens.

De gebruikte waarden zijn samengevat in Tabel 43.

Tabel 43: Gebruikte marktprijzen voor kritieke materialen

Materiaal			bron
Nikkelprijs	€ 16,79	per kg	www.lme.com (London Metal Exchange), https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel#Summary
Platinaprijs	€ 27.852	per kg	https://stonexbullion.com/en/charts/platinum-price/ki-logram/1year/
Koperprijs	€ 7,78	per kg	https://www.cablesrct.com/en/copper-prices
Cerium	€ 3,36	per kg	Budama (\$ 7,5 dollar) https://www.metal.com/Rare-Earth-Metals (3,7 \$/kg)
Iridium	€ 132.700	per kg	16/04/2025 https://pmm.umicore.com/en/prices/iridium/
Ruthenium	€ 19.850	per kg	23/4/25 Ruthenium price Umicore Precious Metals Management
Titanium	€ 6,82	per kg	Live Titanium Prices Today • Rutile Titanium Dioxide & Metal Pricing

Bronnen die we gebruiken zijn o.a.:

- JRC2
- Website van Europese Commissie over Critical Raw Materials
- Marktinformatie over prijzen grondstoffen

ADAPTIEF

Adaptiviteit is belangrijk vanwege de onzekerheden rondom de ontwikkeling van waterstofproductietechnieken. Hierdoor lopen marktpartijen investeringsrisico's. Het is daarom een voordeel als er minder risicovolle investeringen nodig zijn voor een alternatief, 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'. Op basis van de eerdere resultaten uit expertsessie adaptief in het kader van de MCA waterstofdragers en aangevuld met interviews met experts hebben we het aandeel ingeschat van alle investeringen dat aanvullend moet worden gedaan en de mate waarin de investering voor andere doeleinden kan worden aangewend. De investeringen die per keten nodig zijn, hebben we zoveel mogelijk gebaseerd op literatuur.

De uiteindelijke indicator per keten is de omvang van de investering die nodig is en later niet anders kan worden ingezet, uitgedrukt per kton waterstof. Hoe hoger deze risicovolle investeringen, hoe lager de score op adaptiviteit.

Indicator = Investering per kg waterstof x (aandeel waarvoor nog FID nodig is) x (1- aandeel dat kan worden hergebruikt).

Een beschouwing van adaptiviteit kent vele onzekerheden, maar door het gebruik van een standaardmethode voor alle waterstofproductieketens 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 en 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.

Van de experts die betrokken waren bij de MCA waterstofdragers hebben we geleerd dat de investeringen in productiecapaciteit, inclusief aanpalende onderdelen zoals compressie, zuivering en afvanginstallaties doorgaans niet herbruikbaar zijn (zie Tabel 44). Evenmin zijn de installaties op dit moment nu al beschikbaar. Voor bijna alle te vergelijken productietechnieken is de totale investering dus 100% een investering 'at risk'. De uitzonderingen hierop zijn:

- de SMR-installaties. We nemen aan dat die in scenario 1 al aanwezig zijn, omdat een van de uitgangspunten is dat we SMR berekenen op basis van retrofit.
- de productie-installaties die in scenario 1 kunnen worden hergebruikt voor syngasproductie. In die gevallen hebben we het percentage herbruikbaar gelijk gesteld aan 100% minus het aandeel in de investeringen voor shift reactor, CO₂-afvang, PSA, H₂-compressor, CO₂-compressor en condensator. In dat geval is ook de investering in aansluitcapaciteit voor het elektriciteitsnetwerk herbruikbaar. Voor scenario 2 veronderstellen we 0% hergebruik. De reden is dat er momenteel geen afzetmarkt buiten de industrieclusters voor syngas is en die markt de komende jaren niet wordt verwacht.

Voor het transport van grondstoffen, waterstof en CO₂ en voor aansluiting op het waterstofnetwerk zijn additionele investeringen nodig. Doorgaans kunnen deze investeringen beperkt worden hergebruikt of vraagt hergebruik anders dan gebruik als grondstof en van onderdelen (recycling) aanvullende investeringen.

Tabel 44: Overzicht uitgangspunten met betrekking tot adaptiviteit

	CAPEX	Herbruikbaar	
Investerings in basis productiecapaciteit, zuivering, compressoren etc.	Zie bijlage A; additioneel behalve SMR en SMR+CCS	Nee: 0%, behalve afvalvergassing, houtrestenvergassing, ATR en SMR in scenario 1	Zie voor uitzonderingen bijlage A
Investerings in CCS	Zie bijlage A; additioneel	Nee: 0%	
Investerings in vrachtwagens	Niet additioneel	100%	
Investerings in CO ₂ -binnenvaartschepen	Additioneel: aanname 15 mln. euro per schip met capaciteit van 1000 ton	30%	Cijfers gelijk aan expert judgement voor NH ₃ -binnenvaartschip
Investerings in aansluiting elektriciteitsnet, waterstofnet en CO ₂ -buisleiding	Additioneel (m.u.v. bestaande SMR) voor wat betreft elektriciteitsnet en waterstofnet	Nee: 0%, behalve elektriciteitsnet in geval van syngasproductie	
Investerings in waterstofnetwerk	Scenario 1: Niet additioneel voor wat betreft net, wel additioneel aansluiting erop Scenario 2: additioneel	Nee: 0%	

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).

Bronnen die we gebruiken zijn o.a.:

- Resultaten expertsessie Adaptief MCA waterstofdragers,
- Resultaten CAPEX Betaalbaar.

RECHTVAARDIG

Rechtvaardig gaat over de eerlijke verdeling van lusten en lasten. We concretiseren het belang Rechtvaardig in twee deelindicatoren: 1) de afwenteling van externe kosten van import van grondstoffen en energie op het buitenland en 2) de afwenteling van de externe kosten van de leveringsketen in Nederland op de omgeving.⁸⁵

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 buiten Nederland terecht komt, of als er relatief veel externe effecten van de waterstofproductie in Nederland neerslaan. De *'true price'* ligt dan veel hoger dan de in rekening gebrachte kostprijs.⁸⁶

Omdat we met een representatieve keten werken en niet individuele bedrijven en hun aandeelhouders en ketenproces beoordelen, kunnen we andere mogelijke uitwerkingen van het begrip Rechtvaardig niet goed invullen. De gekozen invulling komt overeen met die van de MCA waterstofdragers.

Afwenteling buitenland

Importketens van grondstoffen 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 van de grondstoffen in Nederland. Hoe hoger de uitkomst, des te meer sprake is van afwenteling van externe kosten op het buitenland en dus hoe minder rechtvaardig en hoe lager de score op dit belang. Externe effecten die we hier meenemen zijn milieukosten en broeikasgasemissies in het buitenland. Dit speelt bij de import van houtpellets en bij het gebruik van aardgas.

De kosten van import hebben we bepaald bij het publieke belang Betaalbaar. De externe kosten in het buitenland volgen deels uit de informatie bepaald voor het publieke belang Milieu en deels uit Duurzaam (broeikasgassen) en Veilig (transportveiligheid).

Bronnen die we gebruiken zijn onder andere:

- De kosten van de geïmporteerde grondstoffen worden bepaald bij het publiek belang Betaalbaar.
- De externe effecten van import van aardgas volgen uit Equinor, 2021.
- CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kentallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.

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 productie van waterstof, zoals luchtmissies en -geluid en risico's op ongevallen en op incidenten met

⁸⁵ Voor onderlinge weging gebruiken we de weegfactoren volgens MCA waterstofdragers; 43% voor score afwenteling in Nederland en 57% voor afwenteling op buitenland.

⁸⁶ 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.

waterstof. Hoe meer deze externe effecten worden meegenomen in de kosten van waterstof 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 totale 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. De externe kosten die we berekenen, bestaan uit de gemonetariseerde uitstoot van broeikasgassen, de gemonetariseerde milieueffecten en de kosten van transportveiligheid in Nederland. Deze hebben we bij andere publieke belangen bepaald. De noemer van de vergelijking wordt gevormd door alle kosten bepaald bij Betaalbaar minus de kosten voor import van grondstoffen, energie en CAPEX.

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 productietechnieken met een hoog risico voor omgevings- en cyberveiligheid en terrorisme.

TOEGANKELIJK

Het publieke belang Toegankelijk concretiseren we in deze studie in twee deelindicatoren: 1) het verschil in de kosten per productietechniek voor de industrieclusters en de decentrale industrie (gelijk speelveld qua kosten) en 2) de nabijheid van of mate van toegang tot de leveringsketens.⁸⁷

Kostenverschillen per locatie

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 waterstofmarkt. De mate waarin dit het geval is hangt onder meer af van het kostenniveau wat men kan bereiken afhankelijk van de locatie. We vergelijken de kosten van de waterstof per productietechniek voor verschillende locaties: dat wil zeggen scenario 1 en scenario 2 versus de goedkoopste locatie.

Doorgaans zijn de kosten per afgeleverde kilogram waterstof het laagst in scenario 1 vanwege de schaalgrootte in de industrieclusters. Voor houtrestenvergassing zijn de kosten in scenario 2 lager doordat binnenlandse houtsnippers worden gebruikt. Hoe hoger de kosten in een scenario zijn ten opzichte van de referentie, des te minder sprake is van een toegankelijk kostenniveau.

De indicator voor dit publiek belang is de verhouding tussen de kosten per scenario ten opzichte van de referentie qua kosten (meestal scenario 1). De variabelen voor deze vergelijking volgen uit de productiekosten berekend voor het publiek belang Betaalbaar.

Nabijheid

Om te kunnen participeren in de waterstofmarkt is naast het kostenniveau ook de fysieke toegankelijkheid tot waterstof van belang. Bedrijven moeten de waterstof op hun terrein kunnen krijgen.

De toegankelijkheid van de verschillende productietechnieken concretiseren we als het netto oppervlak van de bedrijventerreinen in gemeenten die zijn aangesloten via het landelijke wa-

⁸⁷ Voor onderlinge weging gebruiken we de weegfactoren volgens MCA waterstofdragers; 78% voor score toegankelijk kostenniveau en 22% voor nabijheid.

terstofnetwerk (alleen de industrieclusters) of via een regionaal waterstofnetwerk (de concentratiegebieden volgens HyRegions) gedeeld door het totale oppervlak van de bedrijventerreinen in Nederland, zie Tabel 45.

We hebben aangenomen dat een bedrijventerrein dat ligt in een gemeente in een van de vijf industrieclusters kan worden aangesloten op het landelijke waterstofnetwerk. Een bedrijventerrein dat ligt in een gemeente in een van de in de studie HyRegions onderscheiden 11 concentratiegebieden⁸⁸ kan worden aangesloten op een regionaal waterstofnetwerk.

Bronnen die we gebruiken zijn onder andere:

- IBIS-database voor aansluiting van bedrijventerreinen en het oppervlak,
- Concentratiegebieden HyRegions.

Tabel 45: Nabijheid voor potentiële gebruikers

	Opp. bedrijventerreinen met (mogelijke) aansluiting	Percentage opp. van 3.791 bedrijventerreinen	Toelichting
Regionale netwerken	7.940	9,6%	Schatting bedrijventerreinen in concentratiegebieden HyRegions
Landelijke waterstofnet in 2035	19.525	23,5%	Schatting bedrijventerreinen die onder industrieclusters vallen
Totaal opp. bedrijventerreinen	82.910	100%	

RUIMTE

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

Het publiek belang Ruimte hebben we uitgewerkt door het ruimtebeslag voor verschillende onderdelen van de waterstofproductieketen te vermenigvuldigen met de relevante grondprijzen. Het gaat dan om:

- Ruimtegebruik voor productie-installaties, inclusief ruimte voor opslag, compressie et cetera.
- Ruimte voor buisleidingen. We hebben het additionele ruimtegebruik meegenomen. Dat wil zeggen enkel de aansluiting met het landelijke waterstofnetwerk in scenario 1, niet het ruimtegebruik van het landelijke waterstofnetwerk. In scenario 2 is wel het regionale waterstofnetwerk additioneel.
- Ruimtegebruik voor aardgas; dit is voor op- en overslag van het aandeel LNG in de importhavens. We hebben aangenomen dat voor aardgas dat via buisleidingen wordt geleverd geen additioneel ruimtebeslag nodig is.
- Ruimtegebruik voor elektriciteitsopwekking; Dit is het ruimtegebruik voor gascentrales, wind op land en zon op land (agrarisch) en wind op zee.

⁸⁸ Trinomics en Blueterra (2024). HyRegions, Onderzoek naar de aanpak voor de mogelijke uitrol van regionale waterstof netwerk infrastructuur, April 2024.

- Voor warmte, houtsnippers en houtpellets, afval, rioolslib is geen additioneel ruimtegebruik verondersteld. Het gaat om restproducten van andere processen waarbij ruimtegebruik wordt toegeschreven aan andere processen of om import.

Transport over weg en water maakt gebruik van publieke infrastructuur die ook ruimte inneemt. De gemonetariseerde maatschappelijke kosten van deze vorm van ruimtebeslag hebben we meegenomen in de uitwerking van publiek belang Economisch krachtig.

Het publieke belang betreft hier fysieke ruimte. De beschikbare milieu- en veiligheidsruimte is mogelijk schaarser is dan de beschikbare fysieke ruimte. Op plaatsen waar wel fysieke ruimte is, kan een ontwikkeling misschien toch geen doorgang vinden bij gebrek aan voldoende milieu- en veiligheidsruimte. We hebben dit aspect niet uitgewerkt.

Bronnen die we gebruiken zijn onder andere:

- HyDelta (2024): Spatial requirement contours of hydrogen projects,
- Milieueffectrapportages, stakeholderinterviews en google earth,
- Grondprijzen vergelijkbaar met MCA waterstofdragers, Wind op Zee aanname 1/100 van agrarische grondprijs,
- Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang,
- Klimaat, Energie en Ruimte, 2018.

Productie-installaties

Gegevens voor het benodigde ruimtebeslag per productietechniek zijn afkomstig uit verschillende bronnen, zie hiervoor Bijlage A. Het ruimtebeslag hebben we aangevuld met het ruimtebeslag voor de zuivering van water zoals bepaald in bijlage B. We hebben de waarde van het ruimtebeslag bepaald door de vierkante meters te vermenigvuldigen met de industriële grondprijs (304 euro/m²).

Buisleidingen

Het ruimtebeslag van een buisleiding is 5 meter aan beide kanten, dus 10.000 m² per km buislengte.⁸⁹ We rekenen alleen met de additionele leidingen die moeten worden aangelegd. Voor scenario 1 is dat 1 km (aanname) en voor scenario 2 is dat 50 km. Het laatste tracé loopt deels door landelijk (landbouw- of natuur-) gebied en door of langs bebouwde/industriële omgeving.

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, zie Tabel 46.

⁸⁹ Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur, Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang, 2023.

Tabel 46: Waarden voor bepalen ruimtelijke investering waterstofnetwerken

	Bestaande leiding in 2035	Nieuw op landbouwgrond	Nieuw op industriële grond	Eenheid
Landelijk waterstofnetwerk scenario 1	Compleet netwerk industrie-clusters scenario 1	0	1	km
Regionaal waterstofnetwerk scenario 2	0	40	10	km
Grondprijs		8	304	€ / m ²

Aardgasgebruik

Als additionele ruimtebeslag voor het gebruik van aardgas hebben we alleen het ruimtebeslag voor de op- en overslag van LNG in de haven genomen.

Ruimtebeslag (in m²/kton aardgas) = ruimtegebruik LNG (in m²/kton LNG) x 14 dagen/365 dagen x aandeel LNG.

Het aandeel LNG is 30%. We veronderstellen dat LNG gemiddeld 14 dagen in haven wordt opgeslagen. Het ruimtebeslag is 234 m² per opgeslagen kton LNG. We hebben dit ruimtegebruik vermenigvuldigd met de industriële grondprijs (304 euro/m²), zie Tabel 47.

Tabel 47: Ruimtegebruik gas/LNG-import

Bron opwek	aandeel	m ² /kton LNG	Gem. prijs grond	Toelichting
Op- en overslag LNG import	30%	234	€ 304	Opslagvolume is 14/365 x jaarlijks gebruik

Elektriciteitsgebruik

Het additionele ruimtebeslag nodig om elektriciteit op te wekken hangt sterk af van de mix. Als grondprijzen hebben we industriële grond verondersteld voor een gascentrale, agrarische grond voor zonnepanelen op land en de helft voor wind op land. Het ruimtebeslag op zee hebben we gewaardeerd door 1/100 van de prijs van agrarisch land te nemen. Dit is een zeer grove schatting, die we hebben gecheckt met een prijs van zee als we de totale opbrengsten van de oceanen delen door oppervlak en bepalen hoeveel grondwaarde op land nodig is om de wind te laten aanlanden, zie Tabel 48.

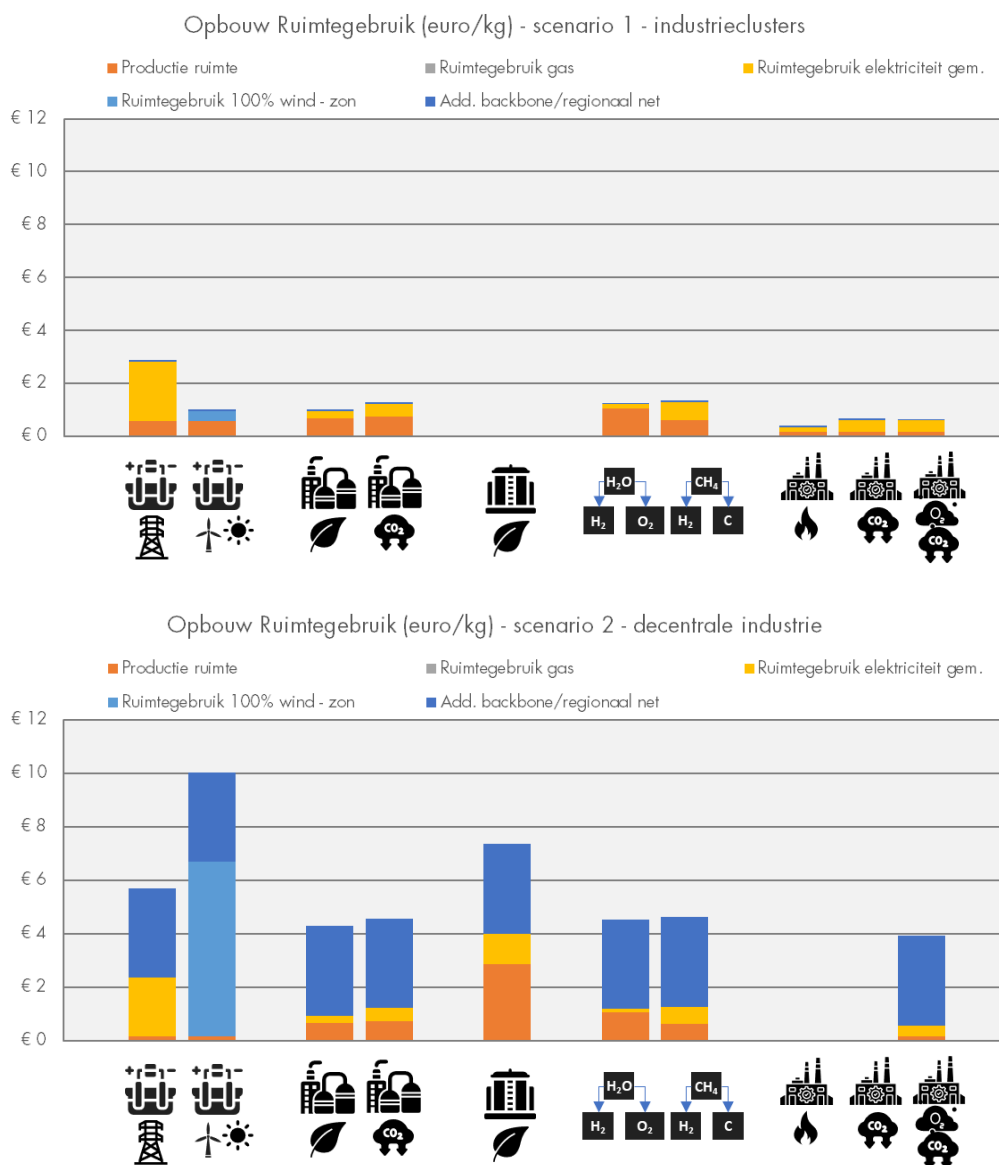
Tabel 48: Ruimtegebruik elektriciteit

Bron opwek	aandeel	m ² /GJ	Gem. prijs grond	Toelichting
Gascentrale	100%	0,0043	€ 304	Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang: 230 GJ/m ²
Zon	100%	2,77	€ 8	Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang, 0,36 GJ/m ²
Wind op Land (WoL)	100%	12,96	€ 4	Grondprijs gehalveerd vanwege restgebruiksmogelijkheden, opp. Klimaat, Energie en Ruimte
Wind op Zee (WoZ), 100% hernieuwbaar scenario 1	100%	23,74	€ 0,08	1/100 x agrarisch. ⁹⁰ opp. Klimaat, Energie en Ruimte
Mix 2035	20% gascentrale, 20% zon, 11% WoL 49% WoZ	13,64	€ 5,64	Mix o.b.v. inschatting NPE hernieuwbare mix in 2035, overige 20% gascentrale
100% hernieuwbaar scenario 2	45% zon, 45% WoL, 10% WoZ	9,46	€ 33,52	Mix eigen aanname

Totaal ruimtebeslag

Het totale ruimtebeslag loopt sterk uiteen vanwege het meenemen van de elektriciteitsopwekking en vanwege het ruimtebeslag van het regionale waterstofnetwerk, zie Figuur 41.

⁹⁰ Dit is een grove schatting, die is vergeleken met minimale benodigde kosten op land voor aanlanding (€ 0,05 per m²) en waarde van opbrengsten op zee per m² (€ 0,06 per m²).



Figuur 41: Opbouw ruimtegebruik per waterstofproductietechniek

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 en andere vervuulende emissies, habitatschade, geluidsoverlast, de ecotoxiciteit en smogvorming van methaan. Het milieueffect van het gebruik van water is ook toegevoegd. Deze kosten hebben we meegeteld in het publieke belang Milieu voor zover deze kosten in Nederland optreden. Milieueffecten in het buitenland door de gebruikte grondstoffen zijn alleen meegenomen bij het belang Rechtvaardig.

Directe en indirecte broeikasgasemissies (kooldioxide, methaan, lachgas en waterstof) zijn voor zover ze tot opwarming van de aarde en daarmee tot klimaatverandering leiden, meegenomen bij het publieke belang Duurzaam. De effecten van methaan hebben we daarom gesplitst in klimateffecten en effecten als gevolg van de ecotoxiciteit en smogvorming.

Het effect van een calamiteit op het milieu hebben we verwaarloosd, omdat we niet voor alle mogelijke incidenten voldoende informatie over de hoeveelheid vrijkomende stof hebben. Bovendien bleek in de MCA waterstofdragers dat zelfs bij een ammoniakincident het effect wegvalt tegen andere emissies vanwege de lage kans van optreden.

Er zijn geen vergelijkende studies gevonden van emissies in waterstofproductieketens. De emissies kunnen voor een afzonderlijke productietechniek bovendien verschillen afhankelijk van keuzes voor type proces, type reactor en nabehandelingssysteem. Gevonden bronnen geven veelal berekende emissies en geen gemeten emissies. Met deze beperkingen hebben we een zo goed mogelijke keuze gemaakt.

Voor enkele alternatieven is binnenlands transport per weg, water of spoor nodig. Dit veroorzaakt NO_x en fijnstofemissies, habitatschade en geluidsoverlast. Transport van waterstof per buisleiding levert bij gebruik van elektrische pompen geen directe uitstoot van NO_x, fijnstof of geluid op, maar de opwekking van de gebruikte elektriciteit in 2035 nog wel NO_x-emissies. De verschillende vormen van uitstoot en effecten combineren we door het gebruik van schaduwkosten.⁹¹ Voor de fysieke grootte van het effect gaan we af op literatuurbronnen en de input van betrokkenen (bestaande productielocaties, milieuvergunningen).

Bronnen die we gebruiken zijn onder andere:

- De emissies volgen uit de LCA-studie van JRC2, uit wetenschappelijke literatuur, milieuvergunningen en uit stakeholderinterviews.
- CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kentallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts voor schaduwpreizen.

Luchtvervuiling door transport (som van NO_x en PM)

Bij het vervoer per schip of wegtransport komen luchtvervuilende stoffen vrij door de verbranding van brandstoffen voor transportmiddelen. We gebruiken kentallen van KiM (gebaseerd op CE Delft)⁹², uitgedrukt in kilogram NO_x en fijnstof per tonkm, voor vrachtwagens en transport over water.

We nemen aan dat in 2035 de waarde van vrachtwagenemissies, en binnenvaart nog 70% is van de waarde in 2018-2023 vanwege aangescherpte verbruiksprestaties onder druk van EU-regelgeving en klimaatambities. Voor de zee- en kustvaart hebben we de waarden met 15% gecorrigeerd ten opzichte van de STREAM-waarden.

Voor buisleidingen nemen we aan dat compressie en verpompen elektrisch gebeurt zonder emissies.

De emissies per tonkm hebben we vervolgens vermenigvuldigd met de milieukosten voor verschillende soorten emissies volgens het Handboek Milieuprijzen van CE Delft.⁹³ Dat resulteert in de waarderingskentallen in Tabel 49.

⁹¹ CE Delft, 2023, Handboek Milieuprijzen 2023.

⁹² 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.

⁹³ CE Delft (2023), Handboek Milieuprijzen 2023, Methodische onderbouwing van kentallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts.

Tabel 49: Waarderingskentallen voor marginale kosten van luchtvervuiling, som van NO_x en fijnstof (bron KiM 2023 = CE Delft 2022)

Waarderingskentallen voor kosten van luchtvervuiling	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm 2035 Nederland	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm 2035 buitenland	Toelichting
Weg	€ 7,70		Gemiddelde vrachtwagen, KiM
Binnenvaart	€ 9,80		Gemiddelde binnenvaart, KiM
Buisleiding, H ₂ -net	€ -		
Zeevaart		€ 0,98	Prijs van een reis, CE Delft zeevaart
Kustvaart		€ 0,98	Prijs van een reis, CE Delft zeevaart

Emissies bij productie, winning en opwek van energie

Bijlage A bevat voor de verschillende productietechnieken welke emissies er per kilogram waterstof optreden. In bijlage B zijn de veronderstelde emissies opgenomen bij de winning en distributie van aardgas en bij de elektriciteitsopwekking in Nederland. De milieuemissies worden in Nederland uitgestoten en hebben we gemonetariseerd met verschillende schaduw prijzen om ze op te kunnen tellen, zie Tabel 50. Broeikasgasemissies hebben we bij Duurzaam meegenomen (Broeikasgassen).

In de schaduwkosten voor methaanemissie zit een effect als broeikasgasemissie en een milieueffect. Het milieueffect is hier meegeteld. De kosten van methaan die we hier meenemen, bedragen de schaduw prijs van methaan (€ 4,70 per kilogram methaan) minus het effect dat is meegeteld bij Duurzaam (Broeikasgassen).

Tabel 50: Schaduwkosten milieuemissies (CE Delft handboek milieuprijzen)

Emissies productie in g/kg H ₂ in Nederlandse deel van keten			
Emissie	schaduw prijs	eenheid	Toelichting
NO _x schaduwkosten (milieu)	€ 29,90	euro per kg	
CH ₄ schaduwkosten (milieu)	€ 1,07	euro per kg	
Water schaduwkosten oppervlaktewater (milieu)	€ 0,00014	euro per kg	Heeft betrekking op bruto opp. waterinname
VOC (NMVOS ⁹⁴) (milieu)	€ 2,73	euro per kg	
CO (milieu)	€ 0,08	euro per kg	
Fijnstof PM ₁₀ (milieu)	€ 69,30	euro per kg	
Fijnstof PM _{2.5} (milieu)	€ 121,00	euro per kg	
SO _x (milieu)	€ 57,50	euro per kg	
NH ₃ (milieu)	€ 49,30	euro per kg	

⁹⁴ Vluchtige organische stoffen zonder methaan.

Geluid

We hebben de milieukosten van geluid berekend door de transportvolumes (tonkm) te vermenigvuldigen met kentallen van KiM/CE Delft.⁹⁵ Geluid van productie-installaties is niet meegenomen vanwege gebrek aan data, zie Tabel 51.

Tabel 51: 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
Water	€ -	Gemiddelde binnenvaart, KiM
Buisleiding, H ₂ -net, aardgasnet	€ -	

Habitatschade bij transport

De habitat is het woongebied van dieren en planten. Vervoer van energie, grondstoffen en CO₂ kan schade aan de habitat toebrengen doordat gebruikte infrastructuur oppervlakte in beslag neemt (habitatverlies), de habitat versnipperd of vervuult. Ecologische schade door luchtvervuiling hebben we 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 hebben we berekend door de transportvolumes (tonkm) te vermenigvuldigen met kentallen van CE Delft.⁹⁶ 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, zie Tabel 52. Dit is dus een onderschatting.

Tabel 52: Waarderingskentallen voor marginale kosten van habitatschade (bron CE Delft 2019)

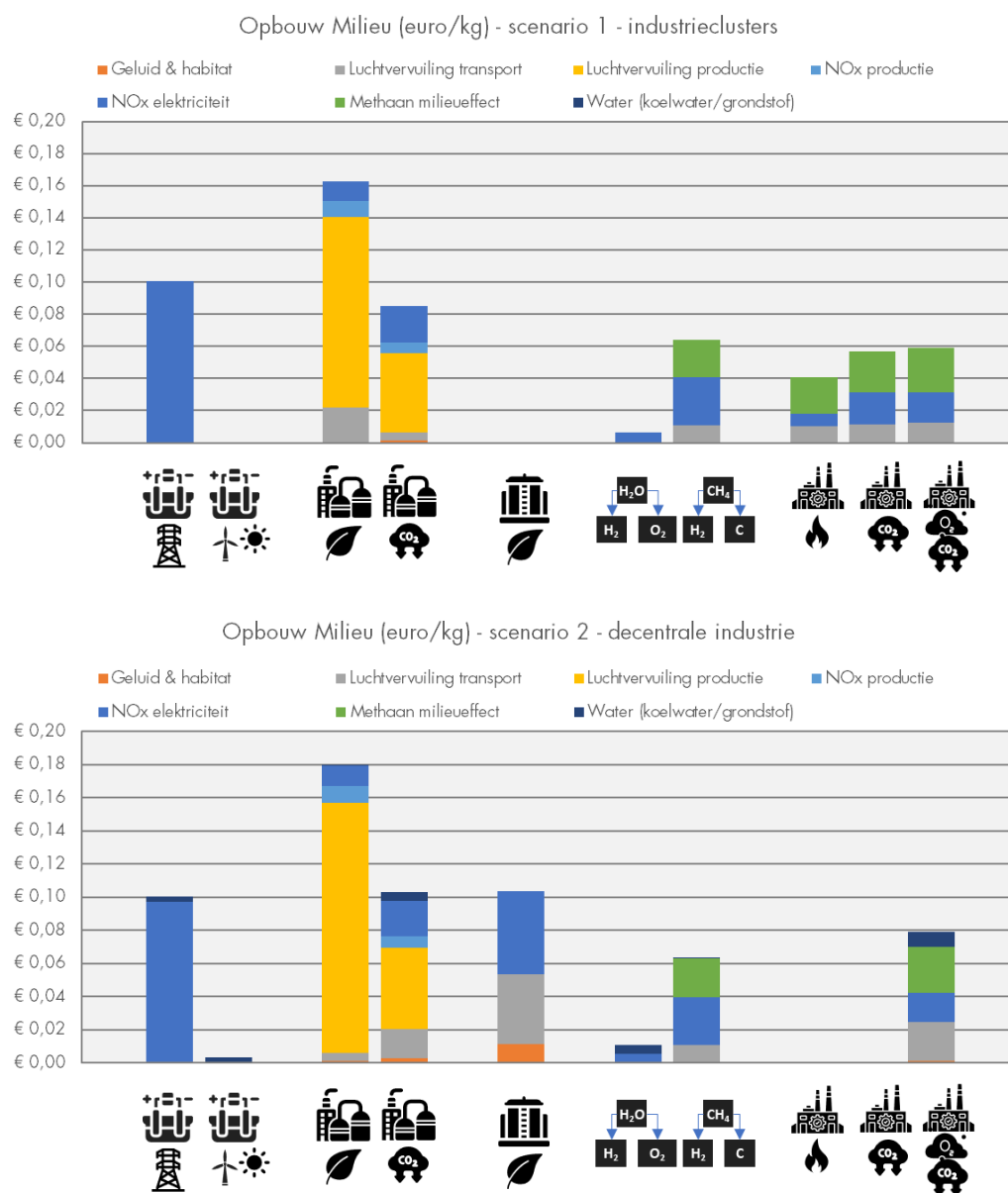
Waarderingskentallen voor kosten van habitatschade	Gemiddelde kosten per 1000 tonkm	Toelichting
Weg	€ 1,51	Gemiddelde vrachtwagen
Water	€ 0,94	Gemiddelde binnenvaart
Buisleiding, H ₂ -net, aardgasnet	€ -	Geen kentallen

Totaal milieueffect

Het totale milieueffect wordt vooral bepaald door directe emissies tijdens productie van biomassa en afvalvergassing, zie Figuur 42, en door de indirecte milieuemissies van gascentrales in de netstroom.

⁹⁵ 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.

⁹⁶ CE Delft (2019), Handbook on the external costs of transport.



Figuur 42: Opbouw milieueffect per waterstofproductietechniek

BIJLAGE D: GEVOELIGHEIDSANALYSES

Deze bijlage gaat in op de resultaten van negen gevoeligheidsanalyses:

1. Impact van leveringszekerheid van energie;
2. Impact van Nederlandse innovatie op het gebied van reactoren en elektrolyzers;
3. Impact van gelijke in plaats van gedifferentieerde marktwaarde voor 100% hernieuwbare waterstof (RFNBO), koolstofarme en niet-koolstofarme waterstof;
4. Impact van het niet meenemen van het ruimtebeslag van de energie en elektriciteitsopwekking;
5. Impact van een kortere lengte van de ringleiding of directe aansluiting in scenario 2, decentrale industrie;
6. Impact van hogere en lagere energieprijzen;
7. Impact van een hoger of lager aandeel van de bijproducten dat vermarkt kan worden.
8. Impact van vergelijking ten opzichte van het nulalternatief, met name voor afvalvergassing en in beperkte mate voor rioolslibvergisting;
9. De gevoeligheid voor verschillende sets weegfactoren, naast de aangeleverde set door de opdrachtgever: een set weegfactoren ontleend aan de MCA waterstofdragers; en *gelijke* weging van de publieke belangen (elk publiek belang 10%).

D1. IMPACT LEVERINGSZEKERHEID ENERGIE

In de baseline hebben we verondersteld dat ook in 2035 sprake is van netcongestie die de betrouwbaarheid van elektriciteitslevering vermindert. Omdat in 2035 dit probleem opgelost zou kunnen zijn, laten we zien wat het betekent als niet de levering van elektriciteit maar van aardgas (LNG-import) minder zeker zou zijn. We verhogen daarvoor het leveringsrisico bij aardgasgebruikers met 1 risicopunt en laten de risicopunten voor netcongestie bij het gebruik van netstroom vervallen. Voor het gebruik van 100% hernieuwbare elektriciteit blijft 1 risicopunt over. Het resultaat staat in Tabel 53.

Tabel 53: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Betrouwbaar voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij variatie leveringszekerheid. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Betrouwbaar										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	riooslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,83	0,75	0,58	0,75		0,42	0,67	0,92	0,92	0,83
Decentrale industrie	0,50	0,42	0,25	0,33	0,50	0,00	0,50			0,42

Productietechniek waterstof: Betrouwbaar - Gevoeligheid betrouwbaarheid energie										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	riooslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,92	0,83	0,67	0,83		0,50	0,67	0,92	0,92	0,83
Decentrale industrie	0,67	0,58	0,42	0,50	0,67	0,17	0,58			0,50

Alle productietechnieken die geen gas maar wel elektriciteit gebruiken, krijgen een hogere **score op Betrouwbaar** (elektrolyse, vergassing, waterontleding). Elektrolyse uit netstroom behaalt een vergelijkbare score als SMR zonder CCS. Voor de productietechnieken op basis van aardgasalternatieven in scenario industriecusters compenseren de effecten elkaar. In scenario decentrale industrie is de winst van de verminderde netcongestie groter dan het veronderstelde effect op de betrouwbaarheid van aardgaslevering. De productietechnieken met de hoogste scores blijven min of meer gelijk. In scenario industriecusters valt elektrolyse uit netstroom ook onder deze groep en in scenario decentrale industrie valt methaanontleding uit de groep met de hoogste scores.

Het effect van de aangepaste scores van Betrouwbaar op de **totaalscore** is beperkt. De meeste scores veranderen 0-1 procentpunt. Alleen voor waterontleding via thermolyse en vergassing van houtresten is de verandering in de decentrale industrie iets groter (3-5 procentpunt). Dit leidt echter niet tot een andere rangschikking van de productietechnieken met de hoogste en laagste totaalscores, zie Tabel 54.

Tabel 54: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscore voor scenario's industriecusters en decentrale industrie bij variatie leveringszekerheid. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-custers	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Gevoeligheid betrouwbaarheid energie										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-custers	0,52	0,62	0,59	0,65		0,58	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,34	0,53	0,55	0,52	0,51	0,45	0,58			0,55

D2. IMPACT NEDERLANDSE INNOVATIE EN CAPEX OP ECONOMISCH KRACHTIG

Bij de bepaling van scores voor het publieke belang Economisch krachtig is in de baseline aangenomen dat een deel van de CAPEX uit het buitenland afkomstig is. Dat betreft het reactorgedeelte en de elektrolyzers (exclusief de Balance of Plant (BoP))⁹⁷. Wanneer dit percentage door Nederlandse innovatie op het gebied van reactoren en elektrolyzers niet meer geïmporteerd hoeft te worden, heeft dit effect op de **scores voor Economisch krachtig**. Het effect is klein: voor de productietechnieken waarvoor een relatief groot deel geïmporteerd wordt maximaal 2 procentpunten, zie Tabel 55. Alleen voor de PEM-elektrolyse in scenario decentrale industrie is het effect een 3 procentpunt verbetering van de score.

⁹⁷ De BoP verwijst naar de essentiële ondersteunende componenten en hulpsystemen die nodig zijn voor een efficiënte werking, exclusief de hoofdinstallatie (reactor, elektrolyser).

Tabel 55: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Economisch Krachtig voor scenario's industriecusters en decentrale industrie bij variatie aandeel Nederlandse CAPEX. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,16	0,30	0,08	0,14		0,21	0,14	0,10	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,15	0,29	0,15	0,13	0,58	0,18	0,14			0,11

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig - Innovatie NL										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,17	0,32	0,09	0,15		0,22	0,15	0,10	0,12	0,12
Decentrale industrie	0,17	0,32	0,17	0,15	0,58	0,19	0,15			0,12

Het effect op de **totaalscores** van de hogere scores op Economisch Krachtig is beperkt. Enkel bij methaanontleding, vergassing van houtresten en afval scheelt het 1 procentpunt. Het heeft geen gevolg voor de onderlinge verhouding van de scores, zie Tabel 56.

Tabel 56: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscore voor scenario's industriecusters en decentrale industrie bij variatie aandeel Nederlandse CAPEX. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Innovatie NL										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,51	0,62	0,59	0,65		0,57	0,64	0,52	0,64	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,52	0,50	0,42	0,58			0,55

D3. IMPACT GELIJKE MARKTWAARDE WATERSTOF OP ECONOMISCH KRACHTIG

Een gevoeligheidsanalyse van het effect van de gekozen marktwaarde van waterstof heeft op twee productietechnieken effect, namelijk elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en SMR, zie Tabel 57. In plaats van verschillende waarden voor hernieuwbare, koolstofarme en niet-koolstofarme waterstof zoals in de baseline, gebruiken we waarden van koolstofarme waterstof (4 euro per kg) voor alle productietechnieken.

Tabel 57: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Economisch krachtig voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij variatie marktwaarde waterstof. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,16	0,30	0,08	0,14		0,21	0,14	0,10	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,15	0,29	0,15	0,13	0,58	0,18	0,14			0,11

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig - Gevoeligheid marktprijs waterstof										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,16	0,16	0,08	0,14		0,21	0,14	0,12	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,15	0,15	0,15	0,13	0,58	0,18	0,14			0,11

Alleen waterstof uit elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit behaalt in de baseline een hogere waarde en alleen SMR heeft een iets lagere waarde. Indien een gelijke marktwaarde voor de waterstof wordt gebruikt, dan behaalt elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit **op Economisch krachtig** een score gelijk aan elektrolyse met netstroom. De score ligt in dezelfde bandbreedte als de meeste andere productietechnieken (tussen 0,2 en 0,3). Dit is een relatief grote afname ten opzichte van de baseline (15 procentpunten lager). Alleen rioolslibvergisting en waterontleding via thermolyse resulteren bij de aangepaste marktwaarde nog in een hogere score dan 0,3. Methaanontleding en SMR gaan er 3-4 procentpunten op vooruit.

Het effect van de aangepaste scores van Economisch krachtig op de **totaalscore** is klein. Alleen elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit verliest 1 procentpunt. Dit leidt niet tot veranderingen in de rangschikking van de productietechnieken volgens de totaalscores, zie Tabel 58.

Tabel 58: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscore voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij variatie marktwaarde waterstof. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Gevoeligheid marktprijs waterstof										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,61	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,51	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

D4. IMPACT WEGLATEN RUIMTEBESLAG ENERGIE OP RUIMTE

Omdat de aannames voor de wijze van elektriciteitsopwekking onzeker zijn, laten we ook de resultaten zien als het ruimtebeslag van de opwekking en van het gebruik van energie niet meegenomen worden, zie Tabel 59. De laagste **score op Ruimte** behaalt dan rioolslibvergisting in scenario 2 in plaats van elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit. Alle productietechnieken krijgen een hogere score. Productietechnieken die veel elektriciteit gebruiken, stijgen relatief

het meest. Met name elektrolyse met 100% duurzame opwekking van vooral zon en wind op land komt gunstiger uit.

Tabel 59: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Ruimte voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij niet meenemen ruimtebeslag energie. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Ruimte										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,71	0,90	0,90	0,87		0,87	0,87	0,96	0,93	0,94
Decentrale industrie	0,44	0,01	0,57	0,55	0,27	0,55	0,54			0,61

Productietechniek waterstof: Ruimte - Geen ruimtebeslag energie										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,94	0,94	0,93	0,92		0,89	0,93	0,98	0,98	0,98
Decentrale industrie	0,65	0,65	0,60	0,60	0,38	0,56	0,61			0,65

De hogere score van elektrolyse heeft enige invloed op de **totaalscores** van elektrolyse, zie Tabel 60. Door de geringe weging van het publieke belang Ruimte gaat het om een relatief kleine verbetering van de score van elektrolyse met netstroom (1 procentpunt). Voor elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit is het effect in de industrieclusters nihil. De opportuniteitskosten van het ruimtegebruik op zee zijn laag verondersteld. Voor de decentrale industrie is het effect 3 procentpunt. De opportuniteitskosten van landbouwgrond voor zonnepanelen zijn hoger, maar geven geen grote verschuivingen in de onderlinge rangschikking. Bij methaantonleding en SMR+CCS leidt een kleine verbetering door afronding tot een 1 procentpunt hogere score, bij andere productietechnieken wordt de verbetering naar beneden afgerond en blijft de score gelijk.

Tabel 60: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscore voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij niet meenemen ruimtebeslag energie. Boven: baseline; onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Geen ruimtebeslag energie										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,52	0,62	0,58	0,64		0,57	0,64	0,52	0,64	0,64
Decentrale industrie	0,34	0,55	0,52	0,51	0,50	0,42	0,58			0,55

D5. IMPACT KORTERE WATERSTOFVERBINDING IN SCENARIO DECENTRALE INDUSTRIE

De aanleg van een regionaal waterstofnetwerk heeft invloed op de scores op verschillende publieke belangen. Hoe groot deze impact is onderzoeken we door een gevoeligheidsanalyse van de scores bij inkorting van het waterstofnetwerk naar 5 kilometer in plaats van 50 kilometer,

en van de impact bij een directe verbinding tussen de waterstofproductie en de afzet van waterstof op een industrieterrein. De zeven publieke belangen waarop dan verschillen in de scores ontstaan zijn vermeld in Tabel 61. Voor de overige belangen zien we geen verschil in scores.

Tabel 61: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Betaalbaar voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting

	Baseline	Energiehub – 5 km	Directe aansluiting
Betaalbaar	Basis	Lagere CAPEX en OPEX	Lagere CAPEX en OPEX
Betrouwbaar	Basis	Basis	Geen impact op betrouwbaarheid buisleiding
Veilig (omgevingsveiligheid en cyber/terrorisme)	Basis	Lagere relatieve kans op falen van de leiding maar kans is zeer klein	Geen aanvullend risico bovenop risico van productie en opslag
Adaptief	Basis	Lagere CAPEX	Lagere CAPEX
Toegankelijk, Rechtvaardig	Basis	Indirect effect van hogere score Betaalbaar	Indirect effect van hogere score Betaalbaar
Ruimte	Basis	Minder ruimtebeslag voor buisleiding	Geen extra ruimtebeslag voor buisleiding

Voor alle publieke belangen geldt: hoe korter de leiding, hoe hoger de **score op Betaalbaar, Veilig, Adaptief, Toegankelijk en Ruimte**, zie Tabel 62 tot en met Tabel 68. De verschillen voor Rechtvaardig zijn verwaarloosbaar. De score op Betrouwbaar blijft bij de energiehub gelijk met de baseline en verbetert bij een directe aansluiting. In geval van een directe aansluiting vervalt de impact van de leiding op Betrouwbaar, Veilig en Ruimte volledig. De impact (qua procentpunten verschil) van de kortere ringleiding en de directe aansluiting is het grootst op Ruimte. De effecten zijn gelijk voor de verschillende productietechnieken en veroorzaken dus geen verschil in rangschikking. Wel wordt het verschil ten opzichte van de industrieclusters kleiner.

Tabel 62: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Betaalbaar voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Betaalbaar										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,23	0,50	0,70	0,65	0,45	0,42	0,75			0,72

Productietechniek waterstof: Betaalbaar - Ringleiding 5 km										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,24	0,52	0,71	0,66	0,46	0,43	0,76			0,73

Productietechniek waterstof: Betaalbaar - Directe verbinding										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,24	0,52	0,71	0,66	0,47	0,43	0,76			0,73

Tabel 63: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Betrouwbaar voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Betrouwbaar									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,50	0,42	0,25	0,33	0,50	0,00	0,50		0,42

Productietechniek waterstof: Betrouwbaar - Ringleiding 5 km									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,50	0,42	0,25	0,33	0,50	0,00	0,50		0,42

Productietechniek waterstof: Betrouwbaar - Directe verbinding									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,58	0,50	0,33	0,42	0,58	0,08	0,58		0,50

Tabel 64: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Veilig voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Veilig									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,51	0,51	0,24	0,14	0,40	0,53	0,47		0,24

Productietechniek waterstof: Veilig - Ringleiding 5 km									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,60	0,60	0,33	0,23	0,49	0,61	0,56		0,33

Productietechniek waterstof: Veilig - Directe verbinding									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,62	0,62	0,35	0,25	0,51	0,64	0,58		0,35

Tabel 65: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Adaptief voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Adaptief									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,00	0,02	0,17	0,12	0,17	0,35	0,52		0,65

Productietechniek waterstof: Adaptief - Ringleiding 5 km									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,07	0,08	0,23	0,18	0,23	0,41	0,58		0,71

Productietechniek waterstof: Adaptief - Directe verbinding									
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas	
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS
Decentrale industrie	0,07	0,09	0,24	0,19	0,24	0,42	0,59		0,72

Tabel 66: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Rechtvaardig voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Rechtvaardig										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,97	1,00	0,98	0,96	0,98	1,00	0,83			0,79

Productietechniek waterstof: Rechtvaardig - Ringleiding 5 km										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,97	1,00	0,98	0,96	0,98	1,00	0,83			0,79

Productietechniek waterstof: Rechtvaardig - Directe verbinding										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,97	1,00	0,98	0,96	0,98	1,00	0,83			0,79

Tabel 67: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Toegankelijk voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Toegankelijk										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,47	0,80	0,80	0,15	0,80	0,59	0,55			0,59

Productietechniek waterstof: Toegankelijk - Ringleiding 5 km										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,49	0,80	0,80	0,19	0,80	0,62	0,60			0,63

Productietechniek waterstof: Toegankelijk - Directe verbinding										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,49	0,80	0,80	0,20	0,80	0,62	0,60			0,63

Tabel 68: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Ruimte voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Ruimte										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,44	0,01	0,57	0,55	0,27	0,55	0,54			0,61

Productietechniek waterstof: Ruimte - Ringleiding 5 km										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,69	0,26	0,83	0,80	0,53	0,81	0,80			0,87

Productietechniek waterstof: Ruimte - Directe verbinding										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,76	0,34	0,90	0,88	0,60	0,88	0,87			0,94

De gunstige verschillen voor een kortere ringleiding en nog gunstigere verschillen voor de directe aansluiting vertalen zich in verschillen in de hoogte van de **totaalscores**, zie Tabel 69. Hoe korter de verbinding tussen productie en gebruik, hoe hoger de score. Gemiddeld is het verschil tussen de baseline en een directe verbinding 3 procentpunten. De andere uitgangspunten veranderen niet de onderlinge verhoudingen van de productietechnieken.

Tabel 69: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscores voor scenario decentrale industrie bij variatie lengte ringleiding / directe aansluiting. Boven: baseline; midden en onder: gevoeligheidsanalyse.

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Ringleiding 5 km										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,35	0,54	0,54	0,53	0,52	0,44	0,59			0,57

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Directe verbinding										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Decentrale industrie	0,36	0,55	0,56	0,54	0,53	0,47	0,60			0,58

D6. IMPACT VAN HOGERE EN LAGERE ENERGIEPRIJZEN

Voor de gevoeligheidsanalyse naar energiekosten hebben we in overleg met de opdrachtgever de keuze gemaakt om de kosten van elektriciteit en gas/warmte tegengesteld te laten bewegen, zie Tabel 70. Overwegingen hierbij zijn:

- Het is een gevoeligheidsanalyse, dus willen we zoveel mogelijk verschil zien tussen productietechnieken die vooral gas/warmte gebruiken en productietechnieken die afhankelijk zijn van elektriciteitsgebruik.
- Op dit moment zijn de kosten van gas en elektriciteit gecorreleerd door het gebruik van gascentrales om elektriciteit te produceren. Dit gaat echter veranderen richting 2035. Ook is het huidige beleid erop gericht om de energiebelasting op gas te verhogen en op elektriciteit te verlagen.
- De geopolitieke ontwikkelingen kunnen ertoe leiden dat LNG en daarmee gas veel duurder wordt, terwijl de trendmatige groei van hernieuwbare elektriciteit de prijs kan verlagen.

Tabel 70: Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse energieprijzen

Percentage verhoging/verlaging t.o.v. baselineprijs (= 100%)	Gas/Warmte	Elektriciteit
Baseline	100%	100%
Gas- en warmteprijzen hoger	150%	50%
Elektriciteitsprijs hoger	50%	150%

De veranderende kosten hebben de meeste impact op de **scores** voor het publieke belang **Betaalbaar**, maar door de doorwerking van de kosten in **Rechtvaardig, Economisch krachtig**,

en **Toegankelijk** ook in mindere mate op de scores voor deze drie belangen. Hierdoor verandert de totaalscore. De resultaten van de twee alternatieve kostenscenario's en de baseline zijn te zien voor Betaalbaar in Tabel 71 en voor de totaalscore in Tabel 72.

Tabel 71: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Betaalbaar voor scenario's industrieclusters en de-centrale industrie bij variatie energieprijzen. Boven: baseline; midden gas- en warmteprijsen hoger; onder elektriciteitsprijs hoger

Productietechniek waterstof: Betaalbaar										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,40	0,50	0,64	0,82		0,51	0,81	0,91	0,80	0,78
Decentrale industrie	0,23	0,50	0,70	0,65	0,45	0,42	0,75			0,72

Productietechniek waterstof: Betaalbaar - Energieprijs - gas hoog										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,60	0,65	0,66	0,86		0,37	0,81	0,85	0,77	0,74
Decentrale industrie	0,42	0,65	0,73	0,69	0,54	0,27	0,74			0,68

Productietechniek waterstof: Betaalbaar - Energieprijs - elektriciteit hoog										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,21	0,36	0,61	0,77		0,66	0,81	0,97	0,82	0,81
Decentrale industrie	0,04	0,36	0,68	0,61	0,36	0,56	0,75			0,75

De resultaten bevestigen dat bij lagere elektriciteitsprijzen en hogere gas- en warmteprijsen, de productietechnieken die veel elektriciteit nodig hebben een hogere score krijgen. Elektrolyse met netstroom krijgt een 20 procentpunten hogere score. Het nadeel voor de productietechnieken die aardgas of warmte gebruiken is kleiner. Dit komt doordat het aandeel in de totale kosten van deze energie lager ligt dan voor elektriciteit bij elektrolyse en doordat de gasgebruikende technieken tegelijkertijd ook elektriciteit gebruiken, die goedkoper wordt. De relatieve positie van elektrolyse is meer dan andere technieken gevoelig voor de prijs van elektriciteit/energie. Bovendien hebben we hier alleen gekeken naar de impact van de variabele energietarieven. De kosten voor een netaansluiting kunnen ook sterk variëren maar zijn in de gevoeligheidsanalyse gelijk gehouden.

Bij lagere gasprijzen doen de gasgebruikende technieken het beter. Opvallend is dat SMR zonder CCS nu hoger uitkomt dan SMR en ATR met CCS. De reden hiervoor is dat voor de afvang van CO₂ elektriciteit nodig is. Hierdoor compenseren de hogere elektriciteitsprijzen een deel van het voordeel van de lagere gasprijzen.

De scores van methaanontleding zijn niet erg gevoelig voor de gekozen waarden. De reden is dat het effect van de veranderende energieprijzen voor aardgas en elektriciteit elkaar in evenwicht houden.

Tabel 72: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscore voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij variatie energieprijzen. Boven: baseline; midden elektriciteitsprijs hoger; onder gas- en warmteprijzen hoger

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Energieprijs - gas hoog										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,61	0,70	0,59	0,65		0,49	0,63	0,51	0,63	0,63
Decentrale industrie	0,44	0,57	0,52	0,51	0,55	0,36	0,57			0,54

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Energieprijs - elektriciteit hoog										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,40	0,53	0,58	0,64		0,63	0,64	0,52	0,64	0,64
Decentrale industrie	0,22	0,44	0,52	0,51	0,44	0,43	0,58			0,55

Hoewel de variatie van de veranderende energieprijzen niet leidt tot grote verandering in de productietechnieken met de hoogste scores voor Betaalbaar, zorgt het wel voor veranderingen in de technieken met de hoogste **totaalscores**. Bij een lage elektriciteitsprijs krijgt elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit de hoogste score, zowel in scenario 1 als 2. Bij een hogere elektriciteitsprijs is het verschil in scores lager en zijn ook de scores van de gasgebruikende productietechnieken lager. De reden hiervoor is dat het effect van de elektriciteitsprijs en gasprijs elkaar compenseren en dat de lagere gasprijzen ook zorgen voor een lagere score op Rechtvaardig. Er wordt immers minder betaald voor het gas in verhouding met de gelijkblijvende milieu- en broeikasgaseffecten. De verhouding tussen de *true price* en de betaalde prijs is groter, en dat is minder rechtvaardig.

D7. IMPACT VAN HOOGE AANDEEL TE VERMARKTEN BIJPRODUCTEN

In de baseline hebben we in overleg met de opdrachtgever aangenomen dat 50% van elk van de bijproducten vermarkt kan worden. Voor deze gevoeligheidsanalyse is aangenomen dat in een hoge of lage variant 50 procentpunten meer of minder bijproduct vermarkt kan worden, zie Tabel 73. Er zijn twee uitzonderingen hierop. In de hoge variant in het scenario industrieclusters bedraagt het maximum percentage 50%. De overweging hierbij is dat de volumes zo groot zijn dat het lastig zal zijn om alle bijproducten te verkopen. Digestaat, bijproduct van de verwerking van rioolslib, wordt ook in de baseline al 100% vermarkt, en dat blijft zo in de varianten.

Tabel 73: Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse aandeel te vermarkten bijproducten

Percentage dat vermarkt kan worden in de baseline en varianten	Scenario Industrieclusters – bijproducten m.u.v. digestaat	Scenario Decentrale industrie - bijproducten m.u.v. digestaat
Baseline	50%	50%
Lage variant	0%	0%
Hoge variant	50%	100%

Het veranderend percentage te verkopen bijproduct heeft impact op de scores voor het publieke belang **Economisch krachtig**, en op de totaalscore. We hebben de resultaten van de twee alternatieve kostenscenario's en de baseline voor Economisch krachtig getoond in Tabel 74 en voor de totaalscore in Tabel 75.

Tabel 74: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Economisch krachtig voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij variatie aandeel vermarkt bijproduct. Boven: baseline; midden: hoge variant; onder: lage variant.

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,16	0,30	0,08	0,14		0,21	0,14	0,10	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,15	0,29	0,15	0,13	0,58	0,18	0,14			0,11

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig - Bijproducten - laag										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,13	0,28	0,05	0,13		0,14	0,11	0,10	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,12	0,27	0,12	0,12	0,16	0,13	0,11			0,11

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig - Bijproducten - hoog										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,16	0,30	0,08	0,14		0,21	0,14	0,10	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,17	0,32	0,17	0,13	1,00	0,23	0,17			0,11

De resultaten laten zien dat in het hoge scenario met name rioolslibvergisting in decentrale industrie een hogere score krijgt. Dit komt door het grote aantal bijproducten van dit proces. In de industriecluster zijn de scores gelijk aan de baseline doordat de aannames gelijk zijn. Bij een lager aandeel te vermarkten bijproducten zakt de score van rioolslibvergisting. In dat geval heeft elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit de hoogste score. De veranderingen van de scores van SMR en SMR+CCS vallen binnen de afronding. Het gaat om een beperkte hoeveelheid te vermarkten industriële warmte. De scores van ATR zijn niet gevoelig voor de gekozen waarden. De reden is dat er geen waardevolle bijproducten zijn (de CO₂ wordt afgevoerd en opgeslagen).

Tabel 75: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscore voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij variatie aandeel vermarkt bijproduct. Boven: baseline; midden: hoge variant; onder: lage variant.

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Bijproducten - laag										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,48	0,42	0,56			0,55

Productietechniek waterstof: Totaalscore - Bijproducten - hoog										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,52	0,42	0,58			0,55

Het effect op de **totaalscores** van het aandeel te vermarkten bijproducten is beperkt. Met uitzondering van rioolslibvergisting is de verandering van de scores tussen de 0 en 1 procentpunt. Bij rioolslibvergisting is de variatie 2 procentpunten ten opzichte van de baseline.

De gewijzigde waarden veroorzaken nauwelijks verandering in de rangschikking. In scenario decentrale industrie bereikt rioolslibvergisting bij een hoog percentage te vermarkten bijproducten dezelfde score als elektrolyse met hernieuwbare elektrolyse en vergassing van houtresten. Bij een laag percentage te vermarkten bijproducten komt rioolslibvergisting op een lagere score uit. De productietechnieken met hoogste scores veranderen echter niet.

D8. IMPACT VAN VERGELIJKING MET NULALTERNATIEF AFVALSTROOM

Afvalvergassing en rioolslibvergisting gebruiken een te contracteren afvalstroom. Die afvalstroom wordt nu ook verwerkt: dit is het nulalternatief voor deze afvalstromen.

Op hoofdlijnen hebben we de impact van vergelijking met dit nulalternatief beoordeeld. Een volledige en gedetailleerde kwantitatieve vergelijking zoals die bijvoorbeeld in een milieueffectrapportage voor een concreet project wordt uitgevoerd was in het kader van deze studie niet mogelijk noch voorzien.

Betaalbaar

De vergelijking met de nulsituatie (afvalverbrandingsinstallatie, AVI respectievelijk rioolslibvergisting naar biogas en verbranding van restant) is niet relevant voor het publiek belang Betaalbaar. Vermeden CAPEX- en OPEX-kosten in de nulsituatie leiden niet tot een korting voor de klant van waterstof uit afvalvergassing of rioolslibvergisting.

Economisch krachtig

Vergelijking met de nulsituatie maakt wel verschil voor de score op Economisch krachtig. In de nulsituatie voor afvalvergassing is de toegevoegde waarde van waterstof gelijk aan de eerder berekende waarden, maar de neveninkomsten zorgen voor een verschil. In de nulsituatie wordt

elektriciteit en stoom verkocht. Als we deze misgelopen opbrengsten verwerken in de waarde van Economisch krachtig voor afvalvergassing leidt dit tot een lagere score dan als we de vergelijking met de nulsituatie niet maken, zie Tabel 76.

Tabel 76: Vergelijking Economisch krachtig bij gebruik van dezelfde hoeveelheid afval (productie is positief, gebruik/verlies is negatief)

Vermogen per 61 kton H ₂ (= productie FUREC)	Nulalternatief vermogen (MW)	Nulalternatief bij 8000 h productie (MWh)	Gemiste waarde bij 50% vermarkten bijproducten per 61 kton H ₂ industrieclusters	Gemiste waarde bij 50% vermarkten bijproducten per 1 kton H ₂
Elektriciteitsproductie	46,4	371200	€ 10.629.818	€ 174.259
Stoomproductie	60	480000	€ 8.640.000	€ 141.639
Subtotaal	106,4	851200	€ 11.296.485	€ 315.899

In de nulsituatie voor rioolslibvergisting ontstaat elektriciteit en warmte door verbranding van slibkoek en biogas. Maken we de vergelijking met de nulsituatie dan daalt de score op Economisch krachtig door het mislopen van de inkomsten of vermeden kosten van elektriciteit en warmte. De waarde van de niet verkochte stoom en elektriciteit bij de baseline uitgangspunten is dan bijna 0,2 euro per kilogram waterstof.

Broeikasgassen (deelindicator Duurzaam)

Afvalvergassing

Door afval te vergassen naar waterstof en zuiver CO₂ wordt het afval hoogwaardiger verwerkt dan in de huidige situatie (verbranding in een AVI met laag rendement, zonder CCS). We hebben op basis van de MER (2024) van FUREC bepaald wat het effect is als deze hoogwaardiger verwerking wordt meegerekend. De vergassingsketen met CCS bespaart dan 12,9 kton directe CO₂-emissies per kton H₂ bij 100% afvang en leidt tot 2,0 kton extra indirecte CO₂-emissies per kton waterstof voor de opwekking van elektriciteit en warmte. De totale CO₂-reductie ten opzichte van de referentie (AVI) is dus 11,0 kton CO₂/kton waterstof, zie Tabel 77.

Tabel 77: Vergelijking broeikasgassen bij gebruik van dezelfde hoeveelheid afval

Per 61 ktonH ₂ (= productie FUREC)	FUREC met CCS	Nulalternatief	Verskil per 61 ktonH ₂ (FUREC – nulalternatief)
Directe CO ₂ -uitstoot installatie	6% x 868.894 ton = 37.726 ton (6% niet afgevangen)	825.701 ton	-787.975 ton (= -12,918 kton per kton H ₂)
Indirecte CO ₂ -uitstoot energiegebruik	-22.337 ton	-141.632 ton	119.295 ton (= 1,956 kton per kton H ₂)
Saldo	15.389 ton	684.069 ton	-668.680 ton (= -10,962 kton per kton H ₂)

Rioolslibvergisting

Voor de vergelijking van rioolslibvergisting naar waterstof met rioolslibvergisting naar biogas en verbranding van resterende slibkoek (ontwaterd slib) hebben we geen complete data gevonden. Een ruwe benadering is dat rioolslibvergisting naar waterstof 109 kilogram slib per kilogram waterstof nodig heeft, en slibvergisting naar biogas 69,4 kilogram slib per kilogram

biogas.⁹⁸ Bij verbranding van biogas in een warmte-krachtkoppeling komt CO₂ vrij van het methaan en het CO₂ dat in het biogas zit. Per kilogram slib is dat aanmerkelijk minder CO₂ die vrijkomt dan de opbrengst van CO₂ uit rioolslibvergisting naar waterstof. Dit komt doordat bij vergisting naar biogas een grotere hoeveelheid zuiveringsslib overblijft dan digestaat bij vergisting naar waterstof. Grofweg halveert de droge stof in het slib. De slibkoek wordt daarna echter verbrand. De MER voor de uitbreiding van de slibverbrander in Delfzijl vermeldt dat hier maximaal 185 kton slib per jaar zal worden verbrand met een verwachte CO₂-uitstoot van 57 kton per jaar. Omdat met de verbranding stoom wordt opgewekt wordt ook 30 kton CO₂ minder uitgestoten voor de opwekking van stoom met aardgas.⁹⁹ Het eindresultaat is dat in het nulalternatief meer CO₂ vrijkomt dan via rioolslibvergisting naar waterstof waarbij de CO₂ afgevangen en als groen bijproduct wordt verkocht.

Vergelijking met het nulalternatief levert dus een CO₂-reductie op van 0,17 kilogram CO₂ per kilogram slib, zie Tabel 78. Het gaat om biogene CO₂-uitstoot die geen ETS-kosten oplevert of afvangen noodzakelijk maakt.

Tabel 78: Vergelijking broeikasgassen bij gebruik zelfde hoeveelheid slib

Slibvergisting naar waterstof		Slibvergisting naar biogas	
Slib input	109,1 kg per kg H ₂	Slib input	69,4 kg per kg biogas
Biogene CO ₂	17,5 kg per kg H ₂ 0,16 kgCO ₂ /kg slib	CO ₂ door verbranding biogas	1,94 kg per kg biogas 0,03 kgCO ₂ per kg slib
		Slibkoekverbranding	0,31 kgCO ₂ per kg ontwaterd slib, maal 2 per kg primair slib
		Vermeden CO ₂ door stoomopwekking	-0,16 kgCO ₂ per kg ontwaterd slib, maal 2 per kg primair slib
Totaal	0,16 kgCO ₂ /kg slib	Totaal	0,33 kgCO ₂ /kg slib

Energieverlies (deelindicator Duurzaam)

Afvalvergassing

Bij productie van waterstof via afvalvergassing neemt het energieverlies ten opzichte van het nulalternatief af. Per kton waterstof is het energieverlies 1,9 MW lager dan bij verbranding van eenzelfde hoeveelheid afval. Vergelijking met het nulalternatief veroorzaakt dus een hogere score.

Bij een productie van 61 kton waterstof (casus FUREC) is 64,1 MWe elektriciteit als input nodig, terwijl in een AVI (het nulalternatief) 46,4 MWe wordt geproduceerd. De stoomproductie ligt 15,8 MWth lager dan in het nulalternatief. Doordat echter waterstof wordt geproduceerd is het netto energieverlies lager. De AVI verliest 230,5 MWth aan warmte (koelwater, schoorsteen, diversen) van een energietoevoer van 336,9 MW (68%), bij afvalvergassing naar waterstof is het warmteverlies 113,1 MW ten opzichte van een energietoevoer van 433,2 MW (26%).

⁹⁸ Jaarlijks wordt 1,4 miljoen ton ontwaterd slib geproduceerd, waarmee 161 miljoen Nm³/jaar biogas kan worden gemaakt. (Tauw 2022) Het resulterende volume zuiveringsslib slinkt tot de helft van het volume slib dat wordt vergist. <https://www.suez.com/en/water/sustainable-practices/sewage-sludge/digestion>

⁹⁹ MER Arcadis (2020). Milieueffectrapportage Slibverbrandingsinstallatie EEW Energy from Waste Delfzijl B.V. 9 april 2020.

Netto gaat er bij eenzelfde hoeveelheid afval 117,4 MW minder energie verloren (1,9 MW per kton geproduceerde waterstof) bij afvalvergassing dan bij afvalverbranding doordat energierijk waterstof wordt gemaakt, zie Tabel 79.

Tabel 79: Vergelijking energieverlies bij gebruik zelfde hoeveelheid afval (productie is positief, gebruik/verlies is negatief)

Vermogen per 61 kton H ₂ (= productie FUREC)	FUREC	Nulalternatief	Delta (FUREC – nulalternatief)	Delta per kton H ₂ (FUREC – nulalternatief)/61 kton
Input aan energie				
Afval	-334,4 MW	-334,4 MW	-	-
Gas	-34,7 MW procesgas, aardgas	-2,5 MW aardgas	-32,2 MW	-0,5 MW
Elektriciteitsgebruik	-64,1 MWe		-64,1 MWe	-1,1 MWe
Subtotaal	-433,2 MW	-336,9 MW	-96,3 MW	-1,6 MW
Output (te gebruiken) energie				
Elektriciteitsproductie		46,4 MWe	-46,4 MWe	-0,8 MWe
Stoomproductie	44,2 MWth	60,0 MWth	-15,8 MWth	-0,3 MW
Waterstofproductie	275,9 MW		275,9 MW	4,5 MW
Subtotaal	320,1 MW	106,4 MW	213,7 MW	3,5 MW
Saldo				
Saldo = energieverlies (koelwater, schoorsteen, diversen)	-113,1 MW	-230,5 MW	117,4 MW	1,9 MW

Rioolslibvergisting

Het effect op Energieverlies van de overstap van de referentie biogasproductie met verbranding van het restant naar rioolslibvergisting voor de productie van waterstof hebben we niet gekwantificeerd.

Ruimte

In theorie leidt de vergelijking van afvalvergassing met het nulalternatief tot een lager ruimtebeslag, als daarmee een AVI (of zelfs twee) wordt verwijderd. Dat deze daadwerkelijk wordt verwijderd achten we echter niet reëel en we hebben het precieze ruimtebeslag van de AVI niet bepaald. Ook het effect op ruimtegebruik van de overstap van de referentie biogasproductie met verbranding van het restant naar rioolslibvergisting voor de productie van waterstof hebben we niet gekwantificeerd.

Milieu

Afvalvergassing

De afvalvergassingstechniek maakt het mogelijk om mineralen, metalen en zware metalen (zeer zorgwekkende stoffen), zwavel en zout voor of tijdens het proces af te scheiden zodat deze niet zoals bij verbranding vermengd in de bodemas, vliegashouders en slakken terechtkomen. Dit maakt terugwinning en hergebruik veel gemakkelijker.

We waarderen deze vermindering van de milieu-uitstoot via schaduw prijzen per uitgestoten stof¹⁰⁰. Voor een aantal stoffen zijn geen schaduw prijzen bekend. We kunnen dit positieve effect daarom niet volledig waarderen, zie Tabel 80.

Tabel 80: Vergelijking milieu-emissies bij gebruik van dezelfde hoeveelheid afval en bij productie van 1 kton waterstof (bron MER FUREC).

Uitstoot per 61 kton H ₂ (= productie FUREC)	FUREC	Nulalternatief	Delta (FUREC – nulalternatief)	Waardering o.b.v. milieuprijzen	Delta per kton H ₂ (FUREC – nulalternatief) / 61 kton
NO _x	10 ton	296 ton	-286 ton	€ 8.551.400	- € 140.187
CO	53 ton	121 ton	-68 ton	€-5.542	- € 91
SO ₂	46 ton	121 ton	-75 ton	€-4.312.500	- € 70.697
NH ₃	0 ton	20 ton	-20 ton	€-986.000	- € 16.164
VOS/VOC	1 ton	24 ton	-23 ton	€-62.790	- € 1.029
Stof	1 ton	12 ton	-11 ton	€ 762.300	-€-12.497
HCl	0 ton	24 ton	-24 ton	p.m.	p.m.
HF	0 ton	2 ton	-2 ton	p.m.	p.m.
Hg	0 ton	60 ton	-60 ton	€ 919.500	- € 15.074
Zware metalen	14 kg	603 kg	-589 kg	p.m.	p.m.
Dioxines	0 g	0,12 g	-0,12 g	€ -6.044	- € 99
Zoutlozing (NaCl/KCl)	0 ton	5760 ton	-5760 ton	p.m.	p.m.
Saldo per kton H ₂					- € 255.837 + p.m.

Per saldo betekent de vergelijking met het nulalternatief dat de score op Milieu hoger wordt doordat er een 'negatieve' milieu-uitstoot is van € 0,26 per kg waterstof.

Rioolslibvergisting

We hebben het effect op de emissies van de overstap van het nulalternatief - biogasproductie met verbranding van het restant - naar rioolslibvergisting ten behoeve van waterstof niet gekwantificeerd.

Effect op totaalscore nulalternatief afvalvergassing

Vergelijking met het nulalternatief voor afvalvergassing (zie Tabel 81 tot en met Tabel 84) levert een directe verbetering van de scores op de publieke belangen Milieu en Duurzaam (broeikasgassen en energieverlies) op en indirect een verbetering op Rechtvaardig. Voor het publieke belang Economisch krachtig vermindert de score enigszins.

¹⁰⁰ CE Delft (2023). Handboek Milieuprijzen 2023 vs. 1.1

Tabel 81: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Duurzaam (broeikasgassen en energieverlies) voor scenario's industriecusters en decentrale industrie bij analyse ten opzichte van nulalternatief. Boven: baseline; onder: nulalternatief.

Productietechniek waterstof: Duurzaam										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,80	0,97	0,93	0,87		0,66	0,80	0,32	0,64	0,75
Decentrale industrie	0,73	0,89	0,96	0,87	0,85	0,66	0,80			0,75

Productietechniek waterstof: Duurzaam - Nulalternatief afval										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,80	0,97	0,93	0,94		0,66	0,80	0,32	0,64	0,75
Decentrale industrie	0,73	0,89	0,96	0,94	0,85	0,66	0,80			0,75

Tabel 82: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Milieu voor scenario's industriecusters en decentrale industrie bij analyse ten opzichte van nulalternatief. Boven: baseline; onder: nulalternatief.

Productietechniek waterstof: Milieu										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,44	1,00	0,10	0,53		0,96	0,64	0,77	0,68	0,67
Decentrale industrie	0,44	0,98	0,00	0,43	0,43	0,94	0,65			0,56

Productietechniek waterstof: Milieu - Nulalternatief afval										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,44	1,00	0,10	1,00		0,96	0,64	0,77	0,68	0,67
Decentrale industrie	0,44	0,98	0,00	1,00	0,43	0,94	0,65			0,56

Tabel 83: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Rechtvaardig voor scenario's industriecusters en decentrale industrie bij analyse ten opzichte van nulalternatief. Boven: baseline; onder: nulalternatief.

Productietechniek waterstof: Rechtvaardig										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,97	1,00	0,95	0,96		1,00	0,82	0,58	0,75	0,78
Decentrale industrie	0,97	1,00	0,98	0,96	0,98	1,00	0,83			0,79

Productietechniek waterstof: Rechtvaardig - Nulalternatief afval										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrie-clusters	0,97	1,00	0,95	0,98		1,00	0,82	0,58	0,75	0,78
Decentrale industrie	0,97	1,00	0,98	0,98	0,98	1,00	0,83			0,79

Tabel 84: Vergelijking waterstofproductietechnieken op Economisch Krachtig voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij analyse ten opzichte van nulalternatief. Boven: baseline; onder: nulalternatief.

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,16	0,30	0,08	0,14		0,21	0,14	0,10	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,15	0,29	0,15	0,13	0,58	0,18	0,14			0,11

Productietechniek waterstof: Economisch krachtig - Nulalternatief afval										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,16	0,30	0,08	0,13		0,21	0,14	0,10	0,12	0,11
Decentrale industrie	0,15	0,29	0,15	0,12	0,58	0,18	0,14			0,11

Als de vergelijking met het nulalternatief wordt meegerekend verbetert de **totaalscore** aanzienlijk als een nieuwe afvalvergassingcentrale in de plaats komt van afvalverbranding van dezelfde hoeveelheid afval, zie Tabel 85. Afvalvergassing krijgt dan ook een hogere score dan de gasgebruikende productietechnieken in de industrieclusters en ook bij de decentrale industrie sluit afvalvergassing aan bij de productietechniek met de hoogste score, te weten methaanontleding.

Tabel 85: Vergelijking waterstofproductietechnieken op totaalscores voor scenario's industrieclusters en decentrale industrie bij analyse ten opzichte van nulalternatief. Boven: baseline; onder: nulalternatief.

Productietechniek waterstof: Totaalscore										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,64		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,51	0,50	0,42	0,57			0,55

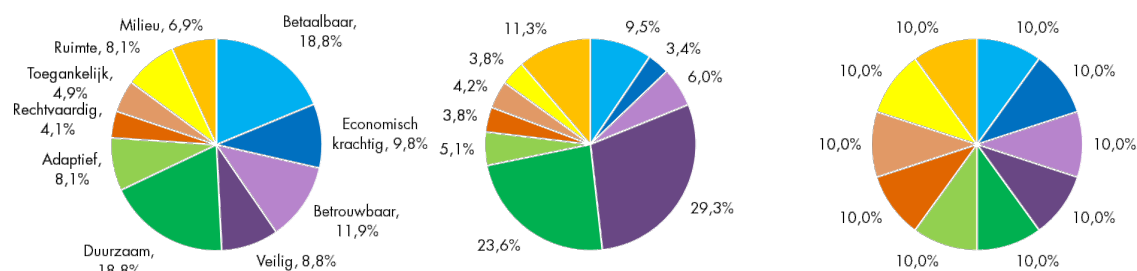
Productietechniek waterstof: Totaalscore - Nulalternatief afval										
	Elektrolyse		Vergassing		Vergisting	Ontleding		Reforming aardgas		
	mix	wind/zon	houtresten	afval	rioolslib	water	methaan	SMR	SMR+CCS	ATR+CCS
Industrieclusters	0,51	0,62	0,58	0,68		0,57	0,63	0,52	0,63	0,64
Decentrale industrie	0,33	0,52	0,52	0,56	0,50	0,42	0,57			0,55

Voor de vergelijking van rioolslibvergisting naar waterstof met rioolslibvergisting naar biogas en verbranding van resterende slibkoek konden we niet voldoende gegevens verzamelen om een zinvolle vergelijking van totaalscores te maken.

D9. GEVOELIGHEID VOOR VERSCHILLENDE SETS WEEGFACTOREN

De gevoeligheid van de baseline-resultaten laten we zien door de weegfactoren van deze analyse (links in Figuur 43) te vervangen door de weegfactoren gebruikt in de MCA waterstofdragers (midden) en door een gelijke weging van alle publieke belangen toe te passen (rechts).

In de MCA waterstofdragers zijn Veilig, Duurzaam en Milieu zwaarder gewogen dan in de baseline van deze MCA. Betaalbaar, Economisch krachtig, Betrouwbaar, Adaptief en Ruimte zijn minder zwaar meegeteld. Bij een neutrale weging worden Rechtvaardig, Toegankelijk en Milieu zwaarder gewogen dan in de baseline ten koste van Betaalbaar en Duurzaam.



Figuur 43: Verdeling weegfactoren baseline van deze studie [links], multicriteria-analyse waterstofdragers [midden] en gelijke weging [rechts]

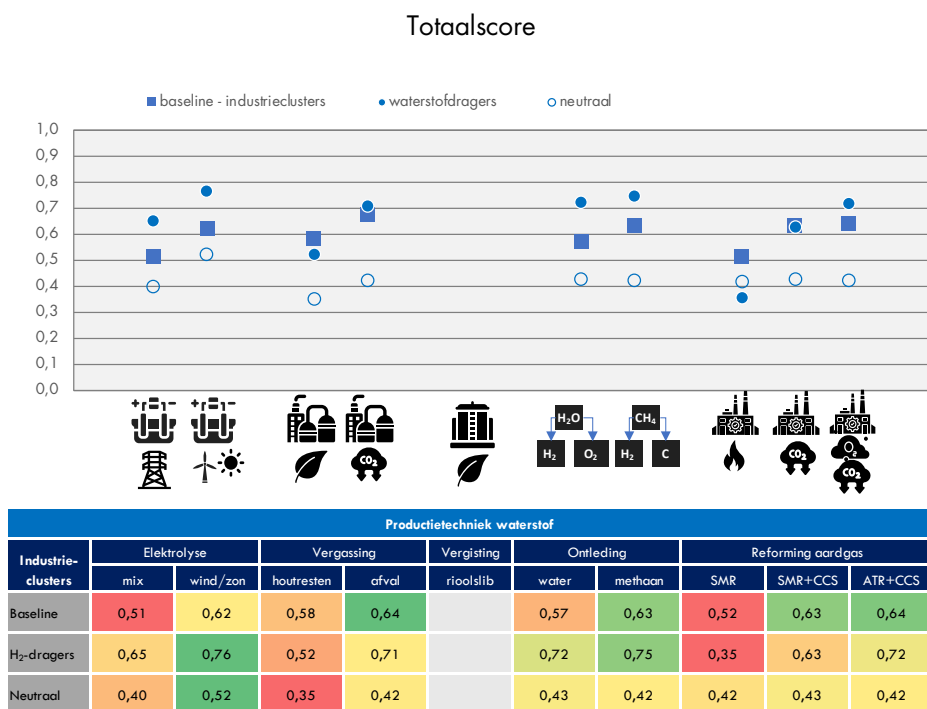
Weging multicriteria-analyse waterstofdragers

Hoewel deze studie gaat over de binnenlandse waterstofproductie en niet over de import van waterstofdragers, berekenen we de resultaten in deze gevoeligheidsanalyse ook met de set weegfactoren die voor de MCA waterstofdragers is bepaald. Dit is een relevante variant omdat in deze studie de weging met stakeholders en experts is bepaald en het over dezelfde publieke belangen en waterstof gaat.

Bij gebruik van de set weegfactoren uit de MCA waterstofdragers lopen de totaalscores meer uiteen:

- van 0,35 tot 0,76 voor scenario 1 (in plaats van 0,51 tot 0,64), zie Figuur 44.
- van 0,25 tot 0,56 voor scenario 2 (in plaats van 0,33 tot 0,57), zie Figuur 45.

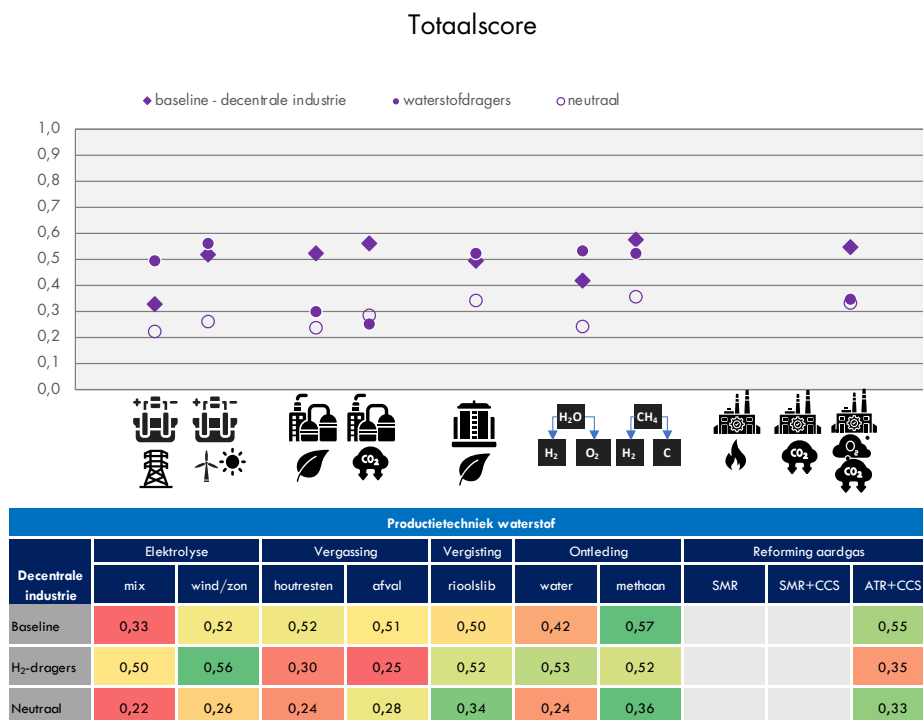
De verschillen tussen de productietechnieken zijn groter dan in de baseline.



Figuur 44: Gevoeligheidsanalyse weegfactoren industriecusters (scenario 1)

In de industrieclusters behaalt elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit de hoogste score in plaats van afvalvergassing met de baselineweging. Ook in scenario 2 behaalt elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit de hoogste score, maar hier in plaats van methaanontleding in de baseline. De hogere positie in de rangschikking is het gevolg van de zwaardere weging van Duurzaam (23,6% in plaats van 18,8%), Milieu (11,3% in plaats van 6,9%) en de lichtere weging van Betaalbaar (9,5% in plaats van 18,8%) in combinatie met de hoge score van elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit op Duurzaam (het effect van broeikasgasemissies) en Milieu en de lage score op Betaalbaar (2,82 euro per kilogram duurder dan afvalvergassing in scenario 1 en 2,17 euro per kilogram duurder dan methaanontleding in scenario 2).

Bij de decentrale industrie (Figuur 45) hebben beide vergassingstechnieken en ATR een lagere score dan bij de baseline weegfactoren. Dit wordt onder andere verklaard door de lagere weging van Betaalbaar (9,5% in plaats van 18,8%) en Ruimte (3,8% in plaats van 8,1%) en de hogere weging van Veilig (29,3% in plaats van 8,8%) in combinatie met de hoge score van deze technieken op Betaalbaar (3,77 tot 4,39 euro per kilogram goedkoper dan referentie) en Ruimte (20% tot 31% minder) en de lagere score op Veilig (onder andere door CO₂-afvoer en schaalnadeel).



Figuur 45: Gevoeligheidsanalyse weegfactoren decentrale industrie (scenario 2)

Neutrale weging

Bij gebruik van een neutrale weging (alle publieke belangen wegen even zwaar) liggen de totaalscores lager: tussen 0,35 en 0,52 voor scenario 1 (zie Figuur 44) en tussen 0,22 en 0,36 voor scenario 2 (zie Figuur 45). De verschillen in scores tussen de productietechnieken zijn dus iets groter voor scenario industrieclusters en kleiner voor scenario decentrale industrie.

In de industrieclusters behaalt elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit de hoogste score in plaats van afvalvergassing in de baseline. De overige productietechnieken hebben significant

lagere scores bij de gebruikte weging. De andere rangschikking wordt verklaard door vooral de lagere weging van Betaalbaar (10,0% in plaats van 18,8%) en de hogere weging van Rechtvaardig (10,0% in plaats van 4,1%) en Milieu (10,0% in plaats van 6,9%). Het nadeel op Betaalbaar (2,46 tot 2,76 euro per kilogram duurder) van elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit ten opzichte van SMR+CCS, ATR+CCS en methaanontleding vermindert hierdoor.

Bij de decentrale industrie (scenario 2) krijgt methaanontleding net als in de baseline de hoogste score, direct gevolgd door rioolslibvergisting. Rioolslibvergisting heeft relatief een hogere score dan met de baselineweging door de hogere weging van Rechtvaardig (10,0% in plaats van 4,1%) en Toegankelijk (10,0% in plaats van 4,9%) en de lagere weging van Betaalbaar (10,0% in plaats van 18,8%) in combinatie met 1) een hoge score op Rechtvaardig vanwege het kleine verschil tussen de true price en de kostprijs, 2) geen kostennadeel ten opzichte van de industrieclusters en 3) een lagere score op Betaalbaar (2,32 tot 2,77 euro per kilogram duurder dan koolstofarme aardgasgebruikende productietechnieken).

Vergelijking wegingen

De weging heeft invloed op de totaalscore zoals blijkt uit de vorige paragrafen. In elk scenario is er een aantal productietechnieken dat bij elk van de drie sets een (redelijk) hoge score heeft.

Concluderend heeft elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit in de industrieclusters bij alle drie sets weegfactoren een relatief hoge score (gemiddeld 0,63). Methaanontleding heeft in twee van de drie sets een hoge score (gemiddeld 0,60). Afvalvergassing en ATR+CCS hebben een hoge score bij de baseline set weegfactoren en een gemiddelde tot hoge score in de alternatieve sets (beide gemiddeld 0,59). De hoge score van deze technieken is dus relatief robuust. Over de hele linie heeft SMR lage scores (gemiddeld 0,43) en behaalt lagere scores dan de referentie, elektrolyse met netstroom (gemiddeld 0,52). De overige productietechnieken behalen gemiddeld een score van tussen 0,49 en 0,57.

Voor de decentrale industrie heeft methaanontleding bij alle wegingen een hoge score (gemiddeld 0,48). De scores van elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit en rioolslibvergisting zijn ook bij elke weging relatief hoog (gemiddeld 0,45). De referentie, elektrolyse met netstroom, heeft nooit de hoogste score en in twee van de drie wegingen de laagste van de onderzochte productietechnieken (gemiddeld 0,35). Vergassing van houtresten en afval hebben ook lagere scores in scenario 2 (gemiddeld 0,35). Waterontleding (gemiddeld 0,40) en ATR+CCS (gemiddeld 0,41) zitten hier tussenin.

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. Deze schaal is gelijk voor scenario's 1 en 2. 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. Bij de bepaling van de weegfactoren in de MCA waterstofdragers¹⁰¹ 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 onder de baseline condities, ongeveer de kosten van grijze waterstof. Vanwege de gevoeligheidsanalyse naar lagere aardgasprijzen is dit verlaagd maar 2,00 euro per kilogram zodat alle resultaten binnen de bandbreedte vallen.

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 deze MCA als laagste voorkomende score op dat belang.

Tabel 86 geeft een overzicht van de gebruikte normalisatieschaal.

¹⁰¹ In de MCA waterstofdragers heeft een brede groep stakeholders de weegfactoren bepaald door met een Modified Delphi-aanpak, gecombineerd met Analytical Hierarchy Programming, de rangschikking van twee alternatieven te bepalen die verschillende scores hebben op twee publieke belangen. Voor meer informatie wordt verwezen naar deze MCA.

Tabel 86: Gebruikte bandbreedte voor normalisatie

Publiek belang	Slechtste score (afgerond)	Beste score (afgerond)
Betaalbaar	Laagste score uit de gevoeligheidsanalyses hoge elektriciteitsprijs: € 11 per kg H ₂	Hoogste score bij gevoeligheidsanalyse naar lage gasprijs € 2 per kg H ₂
Economisch krachtig	€ 0 per kg H ₂	Hoogste score bij gevoeligheidsanalyse 100% vermarkten bijproducten: € 27,3 per kg H ₂
Betrouwbaar	Laagste score baseline: 12	Geen nadeel: 0 (benchmark)
Veilig – Omgevingsveiligheid	Laagste score baseline	Geen risico (theoretische score)
Veilig – Cyber & Terrorisme	Laagste score baseline	Geen risico (theoretische score)
Veilig – Transportveiligheid	Laagste score baseline: € 0,018 per kg H ₂	Geen risico (theoretische score)
Duurzaam – Broeikasgasemissies	Laagste score baseline: € 1,31 per kg H ₂	Geen uitstoot (theoretische score)
Duurzaam – Materiaalbeslag	Laagste score baseline: € 1,5 per ton H ₂	Geen kritisch materiaalbeslag (theoretische score)
Duurzaam - Energiegebruik	Laagste score baseline: 570%	100% (geen extra energie nodig boven 120 MJ/kg H ₂) (theoretische score)
Adaptief	Laagste score baseline: € 33 per kg H ₂	0 (theoretische score)
Rechtvaardig - producerende landen	100% (true price 2x zo hoog als kosten doorvoer) (theoretische keuze)	0% (true price gelijk aan kosten doorvoer) (theoretische score)
Rechtvaardig - doorvoer	100% (true price 2x zo hoog als kosten import) (theoretische keuze)	0% (true price gelijk aan kosten import) (theoretische score)
Toegankelijk – gelijk kostenniveau	Laagste score uit de gevoeligheidsanalyses hoge elektriciteitsprijs: 150%	100% geen meerkosten achterland (theoretische score)
Toegankelijk - nabijheid	0% (theoretische score)	100% bedrijven heeft toegang tot keten (theoretische score)
Ruimte	Laagste score baseline: 10 euro per kg H ₂	Geen ruimtebeslag (theoretische score)
Milieu	Laagste score baseline: € 0,18 per kg H ₂	Geen milieubelasting (theoretische score)

BIJLAGE F: TOELICHTING VIKOR-METHODIEK

De totaalscores van de verschillende alternatieven zijn een combinatie van wegingsfactoren en van de scores op individuele publieke belangen. De scores op de individuele publieke belangen zijn te vinden in Hoofdstuk 5. Achtergronden hierbij zijn toegelicht in bijlage C.

De scores hebben we gerangschikt volgens de methodiek genoemd VIKOR ('Multicriteria Optimization and Compromise Solution').¹⁰² Dit levert een genuanceerde uitkomst op: er wordt niet alleen gekeken naar de hoogste score op de combinatie van de weging en score van alternatieven op individuele publieke belangen, maar ook of een productietechniek op een of meer van de individuele publieke belangen een heel slechte score heeft. Voor diegenen die dit individuele publieke belang zwaar wegen is het alternatief 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 SMR op Betaalbaar en Broeikasgasemissies (Duurzaam) van elektrolyse met 100% hernieuwbare elektriciteit.

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 SMR op Broeikasgasemissies (Duurzaam) en die van waterontleding 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 totaalscore is bepaald door de standaard multicriteria-berekening ('Nuts'): weegfactoren x score per publiek belang ('wat willen we het liefst').
- 2) De helft van de totaalscore is bepaald door de 'regret'-methode: deze benadeelt alternatieven die in verhouding slecht scoren op een 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 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

¹⁰² In het Servisch: VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje.

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 87. 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 een van de drie alternatieven.

Tabel 87: 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-rangschikking en Regret-rangschikking 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 = Regretscores van keten i

R^+ = Beste regretscores van alle ketens

R^- = Slechtste regretscores van alle ketens

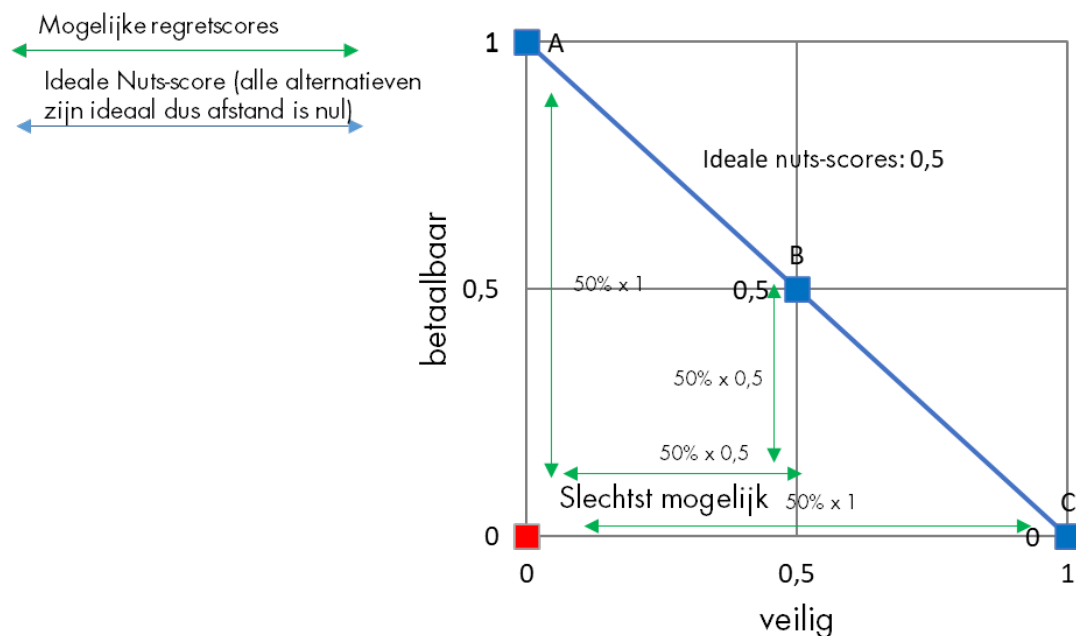
In dit voorbeeld is de laagste score de beste. In de presentatie van de totaalscores in de hoofdstuktekst hebben we om geen verwarring te scheppen de totaalscore volgens de VIKOR-methodiek omgedraaid: niet 0 maar 1 is de beste score, zie Tabel 88. Alternatief B presteert

beter dan A en C omdat het een meer 'gemiddelde' score heeft en op geen enkel belang de minste score.

Tabel 88: 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	$50\% \times 0 + 50\% \times 0,25/0,25 = 0,5$	0,5 (1 - 0,5)
B	0 (0,5 - 0,5)	0,5 x 50%	0,5 x 50%	0,25	$50\% \times 0 + 50\% \times 0/0,25 = 0$	1 (1 - 0)
C	0 (0,5 - 0,5)	1 x 50%	0 x 50%	0,5	$50\% \times 0 + 50\% \times 0,25/0,25 = 0,5$	0,5 (1 - 0,5)

De berekening is gevisualiseerd in Figuur 46. 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 46: Visualisatie van VIKOR-methodiek voor voorbeeld