



RAPPORT

De toekomst van duurzame koolstof-chemie in Nederland

Expertadvies

31 maart 2025

Sanne Akerboom, Gert Jan Kramer, Yvonne van der Meer, Arnold Stokking, Bart Strengers, Jacqueline Vaessen

RAPPORT

De toekomst van duurzame koolstofchemie in Nederland

Uitwerking van de visie van het expertteam op de toekomst van een duurzame koolstofchemie in Nederland

Sanne Akerboom
Gert Jan Kramer
Yvonne van der Meer
Arnold Stokking
Bart Strengers
Jacqueline Vaessen

31 maart 2025

COLOFON

Publicatiedatum
31 maart

Opdrachtgever
Dit rapport is opgesteld in opdracht van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

Werkgroep
Dit document is tot stand gekomen onder begeleiding van Berenschot-adviseurs Julia Koelega en Regine Wagenaar.

Berenschot

Inhoudsopgave

Inleiding.....	6
Hoofdstuk 1.....	8
Het belang van het behoud van de Nederlandse koolstofchemie	8
1.1 De waarde van de koolstofchemie voor Nederland is groot: nu, tijdens de transitie en in de toekomst	9
1.2 De koolstofchemie in Nederland kan niet los worden gezien van de positie in het ARRRRA-cluster	10
1.3 Het ARRRRA-cluster is goed gepositioneerd voor een succesvolle transitie van de koolstofchemie	11
1.4 Het belang van behoud van de industrie in Nederland	12
Hoofdstuk 2	14
De chemische industrie wordt complexer	14
2.1 Het eindbeeld: een duurzame koolstofchemie	16
2.2 Verduurzaming koolstofchemie verhoogt complexiteit	17
2.3 Drie typen duurzame koolstofbronnen	18
2.4 Transitiekenmerken met impact op kosten	23
Hoofdstuk 3.....	25
Drie hoofdroutes van duurzame koolstofchemie	25
3.1 Hoofdroute 1: De adaptatie van bestaande petrochemie voor duurzame koolstof (ombouw)	27
3.2 Hoofdroute 2: Synthesegas-gebaseerde chemie (om- en opbouw)	28
3.3 Hoofdroute 3: Nieuwe (bio)chemische omzettingen (opbouw)	30
Hoofdstuk 4.....	36
Succesvolle transitie vereist sturing.....	36
4.1 Het verloop van de transitie is nog niet uitgekristalliseerd	37
4.2 Legitimiteit en urgentie van overheidsingrijpen	38
4.3 Drie aangrijpingspunten bij het vormgeven van beleid	40
4.4 Een indicatorenkader als handvat om de maatschappelijke effecten in kaart te brengen	44
Synthese	47
Bijlage A.....	50
Leden van het expertteam.....	50
Bijlage B.....	52
Ketenplaat met voetnoten	52
Bijlage C.....	59
Indicatief indicatorenkader	59
Bijlage D.....	65
Relevante onderzoeken en rapporten	65

Inleiding

Het Rijk heeft behoefte aan input voor een visie op duurzaam koolstofgebruik

In het Nationaal Programma Verduurzaming Industrie (NPVI), het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) en het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) is de ambitie uitgesproken om tegen 2050 het gebruik van fossiele grondstoffen te minimaliseren. Voor de chemische industrie, die afhankelijk is van koolstof uit fossiele bronnen, houdt dit in dat er duurzame koolstofbronnen moeten worden ingezet als vervanging. Er zijn grote veranderingen nodig om deze doelstelling te realiseren. Het is op dit moment nog onduidelijk hoe het Nederlandse koolstofchemiesysteem eruit zal zien en welke stappen nodig zijn om dit te realiseren. Dit geldt ook voor het grondstoffengebruik in de chemie in het algemeen. Om hier een visie op te vormen is door de ministeries van IenW en KGG gevraagd om een onafhankelijk expertadvies.

Expertteam geeft visie op transitie van de koolstofchemieketen

In dit onafhankelijke expertadvies geven experts hun visie op de verduurzaming van de koolstofchemie van de toekomst en legt daarbij de focus op de belangrijkste uitdagingen en implicaties waarmee er op de route daarnaartoe de komende jaren rekening zou moeten worden gehouden. Het expertadvies biedt oplossingsrichtingen, schetst randvoorwaarden en duidt aandachtspunten. Het advies dient als input voor de te ontwikkelen visie van het Rijk op de verduurzaming van de koolstofchemie en de bijbehorende transitiepaden. Hierbij wordt benadrukt dat de verduurzaming, dat wil zeggen het terugbrengen van de broeikasgasemissies naar netto nul en de volledige vervanging van koolstofhoudende grondstoffen door duurzame alternatieven, zeer waarschijnlijk niet in 2050 zal zijn voltooid. De ambitie van dit expertrapport is om een duidelijk beeld te geven van de complexiteit en urgentie van de transitie en om handvatten en overwegingen te bieden voor dit transitievraagstuk.

Leeswijzer

Een succesvolle transitie naar een duurzame koolstofchemie vereist sturing van de overheid. Dit wordt van groot belang gezien voor het behoud van de economische en maatschappelijke baten van de koolstofchemie in Nederland.

In het eerste deel van dit rapport wordt de waarde van de koolstofchemie voor Nederland geschetst, zowel in het heden als in een (circulaire) toekomst. De internationale verwevenheid van de Nederlandse koolstofchemie binnen het Antwerp-Rotterdam-Rhine-Ruhr-Area-cluster (hierna: ARRRRA-cluster) wordt besproken, waarbij de potentie en het belang van een succesvolle transitie van dit cluster wordt benadrukt, evenals de negatieve gevolgen van het verlies ervan.

Het tweede deel van deze rapportage begint met een schets van de toekomst van de koolstofchemie op hoofdlijnen. Vanwege de vele onzekerheden en de verschillende perspectieven zal er géén eenduidig eindbeeld worden gegeven door het expertteam. Daarna wordt er dieper ingegaan op drie bepalende karakteristieken van de transitie. Het systeem zal sterker verweven en complexer worden. Er wordt inzicht geboden in de belangrijkste alternatieve koolstofbronnen uit recycling, biograndstoffen en CO₂, en het potentieel voor negatieve emissies. Daarnaast worden de transitiekenmerken met impact op kosten besproken. In het eindbeeld van de duurzame

koolstofchemie worden drie hoofdroutes onderscheiden, die in Hoofdstuk 3 in meer detail worden toegelicht.

In Hoofdstuk 4 wordt gepleit voor actieve overheidssturing. We duiden de legitimiteit en urgentie van overheidsingrijpen en hoe benadering vanuit een systeemperspectief kan bijdragen aan een succesvolle transitie. We schetsen drie aangrijpingspunten voor sturing. Tot slot wordt een denkwijze voor integrale benadering geïntroduceerd in de vorm van een set indicatoren. Deze kunnen helpen bij het doorgronden en duiden van de impact en consequenties van de verschillende routes naar een duurzame chemie.

Parallele trajecten geven ook input aan de visie van het Rijk

Parallel aan het werk van het expertteam, waarvan hieronder het verslag volgt, heeft de overheid een rapport over hetzelfde onderwerp gevraagd aan TNO, hebben de ministeries van KGG en IenW intern een werkgroep ingesteld, en is er een klankbordgroep opgericht rond dit onderwerp waarin een veelheid aan stakeholders zich vertegenwoordigd weten. Dit geeft aan dat het onderwerp gevoeld wordt als belangrijk, urgent en complex, en het is ook zeer waarschijnlijk dat de verschillende trajecten inzichten, ideeën en visies zullen opleveren die niet per se convergeren naar één eenduidig beeld. Dit advies in combinatie met de andere trajecten vormt een eerste belangrijke stap richting een hopelijk stabiel en doordacht beleid ten aanzien van de verduurzaming van de koolstofchemie in Nederland.



HOOFDSTUK 1

Het belang van het behoud van de Nederlandse koolstofchemie

In dit hoofdstuk bespreekt het expertteam de waarde van de (koolstof)chemie in Nederland en wordt het belang van het behoud en de verduurzaming van dit internationaal verweven cluster besproken.

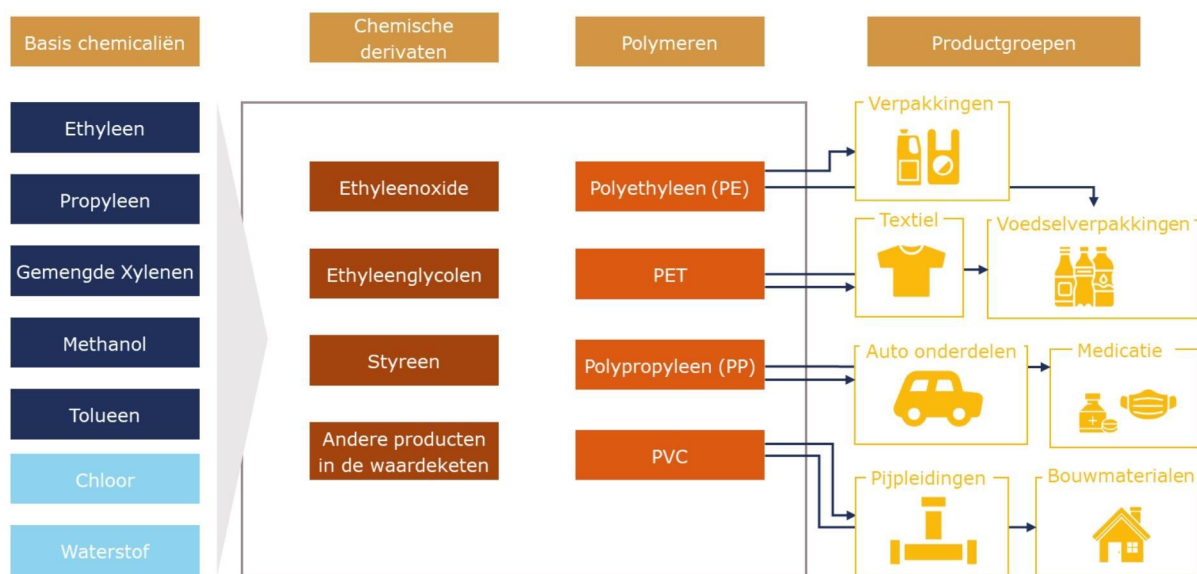
De koolstofchemie in Nederland, als onderdeel van het ARRA-cluster, is van grote waarde voor de Nederlandse en Europese economie, nu en in de toekomst. Verduurzaming van de koolstofchemie in Nederland is een integraal onderdeel van een transformatie van het gehele ARRA-cluster tot een duurzaam industrieel cluster, dat hier goed voor gepositioneerd is. Een beschouwing van de negatieve gevolgen van het verdwijnen van deze sector onderbouwt de urgentie om de industriepositie te behouden.

1.1 De waarde van de koolstofchemie voor Nederland is groot: nu, tijdens de transitie en in de toekomst

De chemiesector is een belangrijke economische pijler

De (koolstof)chemiesector is van oudsher een belangrijke pijler van de Nederlandse en Europese economie. De sector is een belangrijke schakel in vele waardeketens, zoals de automobiellindustrie, verpakkingen, bouw, landbouw en de maakindustrie, zie [Figuur 1](#).

De chemie in Nederland is qua omzet de vierde van Europa en de tiende wereldwijd. Deze, voor de Nederlandse economie essentiële basisindustrie, was met 45.000 werknemers en 67 miljard euro in 2023 goed voor 16% van de totale goederenexport.¹ Het gehele ARRRRA-cluster is het grootste industriële cluster van Europa en één van de grootste wereldwijd samen met Houston in de VS en Jubail in Saoedi-Arabië. Het ARRRRA cluster produceert ongeveer 40% van alle petrochemische producten in Europa.



Figuur 1. Hoe verschillende chemische producten in ons dagelijks leven worden gebruikt. Volgens Hermanns, Oliveira et al. (2024) bestaat op wereldschaal meer dan 90% van de basischemicaliën uit slechts negen moleculen die door de industrie worden geproduceerd.

Het belang van de koolstofchemie tijdens de duurzaamheidstransitie

Ook tijdens de transitie naar een duurzame samenleving blijft de koolstofchemie van belang voor de Nederlandse economie. Op dit moment maakt de koolstofchemie gebruik van fossiele grondstoffen. Die zullen in een duurzame toekomst vervangen moeten worden door duurzame koolstofbronnen, zoals gerecyclede plastics, biograndstoffen uit bosbouw en landbouw, of afgevangen CO₂. Een deel van die nieuwe grondstoffen kan ingezet worden in huidige installaties, maar er zullen ook nieuwe installaties voor duurzame productieroutes gebouwd moeten worden hiervoor. De komende decennia zal er in de chemiesector sprake zijn van ombouw (ten behoeve van toepassing van nieuwe grondstoffen), nieuwbouw (eveneens ten behoeve van toepassing van nieuwe grondstoffen, maar ook ten behoeve van nieuwe producten) en afbouw (als er minder monomeren en brandstoffen nodig zijn, is er ook minder raffinage- en kraakcapaciteit nodig). Hoe die drie zich zullen gaan verhouden is op dit moment nog moeilijk te voorspellen, maar behoud van de chemiesector kan bijdragen aan

¹ [VNCI – Chemie in Nederland](#).

de economische positie van Nederland en aan het waarmaken van duurzame ambities, zowel in Nederland als daarbuiten.

De (koolstof)chemie- en brandstofsector zal immers een belangrijke rol spelen in het ontwikkelen van innovatieve oplossingen voor de huidige uitdagingen, zoals de verduurzaming van grondstoffen, emissiereductie, grondstofefficiëntie en circulariteit. Door deze sector te behouden geeft Nederland invulling aan zijn verantwoordelijkheid voor de verduurzaming van zijn consumptie en export. Nederland heeft de beschikbare kennis, technologie en financiële middelen om te verduurzamen. Tegelijkertijd biedt het aangaan van deze uitdaging gelegenheid om grip te houden op de lokale grondstoffen (biograndstoffen, circulaire grondstof) en ook de lokale vervuiling en gezondheidsimplicaties van de industrie.

Ten slotte is de procesindustrie (waarin in koolstofchemie dominant is) belangrijk als onderdeel van een gediversifieerde en daarmee veerkrachtige Nederlandse economie. Door inzet van nieuwe technologieën kan Nederland niet alleen zijn afhankelijkheid van fossiele grondstoffen verkleinen, maar ook nieuwe marktkansen creëren, zowel in de chemische industrie als in aangrenzende sectoren. Te denken valt hierbij aan het ontwikkelen van routes op basis van alternatieve grondstoffen en circulaire ketens. Hierbij is het van belang te beseffen dat de huidige grote exportpositie waarschijnlijk niet op deze manier houdbaar is op de langere termijn.

De transitie richting een duurzame koolstofchemie kent echter grote uitdagingen en kan tussentijds leiden tot ongewenste (deel)uitkomsten. In deze transitie is het dan ook belangrijk om integraal belangen af te wegen, in bijlage C gaan we hier verder op in.

1.2 De koolstofchemie in Nederland kan niet los worden gezien van de positie in het ARRA-cluster

Koolstofchemie en petrochemie in Nederland

Nederland heeft, in vergelijking met de meeste andere landen in de wereld, een grote basisindustrie. Nederland kent vijf chemieclusters: Rijnmond, West-Brabant, Zeeuws-Vlaanderen en Vlissingen, Chemelot, en Noord-Nederland. Met uitzondering van Chemelot zijn de clusters strategisch gelegen aan havens, wat zorgt voor efficiënte aan- en afvoer van grondstoffen en producten.

Binnen de basisindustrie (staal, raffinage, chemie en kunstmest) zijn raffinage en chemie dominant in Nederland. Beide zijn in hoge mate fysiek geïntegreerd. De combinatie van koolstofchemie en petrochemie kan worden gezien als één groot-industrieel systeem dat ruwe olie omzet in een breed portfolio van brandstoffen, chemicaliën en koolstofgebaseerde materialen (onder andere plastics). Praktisch alle raffinage en chemie is in de huidige situatie olie- en gasgebaseerd. De transitie van de koolstofchemie kan dus niet los worden gezien van de brandstoffentransitie. Veranderingen of ingrepen in één van de ketens zullen effect hebben op de andere.

De chemische sector in Nederland is sterk verweven met gehele ARRA-cluster

Niet alleen binnen Nederland zijn raffinage en chemie geïntegreerd, maar ook over een gebied dat zich uitstrekt over de grens naar België (het Antwerpse havengebied) en naar het Ruhrgebied in Duitsland. Dit zogeheten ARRA-cluster is historisch gegroeid tot een van de grootste industrie clusters ter wereld en is daarbij significant gevormd door logistieke infrastructuur, met als belangrijke elementen de havens van Rotterdam en Antwerpen en een netwerk van pijpleidingen die onderlinge toelevering mogelijk maken (het product van de eerste stap in de keten is grondstof voor de volgende, etc.). Het cluster onderscheidt zich door zijn hoge mate van integratie (vele onderlinge toeleveringen), efficiënt transport (pijpleidingen en binnenvaart), en de focus op duurzaamheid. Hoewel het in omvang achterblijft bij Houston, heeft het ARRA-cluster een sterke positie door zijn strategische ligging en toegang tot de Europese markt.

1.3 Het ARRRA-cluster is goed gepositioneerd voor een succesvolle transitie van de koolstofchemie

Het ARRRA-cluster is goed gepositioneerd om een succesvolle en waardevolle transitie naar een duurzame koolstofchemie te realiseren. Het expertteam ziet hiervoor ten minste vier aanknopingspunten gedurende de komende decennia, die hieronder worden toegelicht.

Het ARRRA-cluster heeft al eerder succesvolle transities doorgemaakt

Het ARRRA-cluster heeft in het verleden al belangrijke transities doorgemaakt, zoals de overgang van kolen naar aardolie en aardgas en de opkomst van de productie van kunststoffen. Het ARRRA-cluster is niet in één keer als één geheel ontworpen en gebouwd, maar gegroeid over een lange periode van ongeveer honderd jaar. Daarbij waren ondernemerschap, maatschappelijke behoefte en publieke stimulans belangrijk, bijvoorbeeld door het aanleggen van een omvangrijke infrastructuur zoals pijpleidingen en havenfaciliteiten.

Hoewel het ARRRA-cluster een goede uitgangspositie voor de transitie heeft, zal er regie moeten worden genomen om het ontstane systeem te veranderen. Bijvoorbeeld door Europese overheden. Industrieclusters ontstaan niet alleen als een onvermijdelijk resultaat van een wereldwijd economisch optimalisatieproces, maar eerder door een constructieve samenwerking tussen private en publieke belanghebbenden. Dit was het geval bij de opkomst van de industrie in Europa, de Verenigde Staten en Japan, en is nu ook zichtbaar in Oost-Azië en het Midden-Oosten.

Het ARRRA-cluster heeft een strategische toegangspositie tot Europa

Dankzij de strategische ligging en directe toegang tot de Europese markt beschikt het cluster over een sterke concurrentiepositie. Dit uit zich in:

- de nauwe verbondenheid tussen Duitsland, België en Nederland, mogelijk gemaakt door eerdergenoemde infrastructuur en grensoverschrijdende toeleveringsketens, versterkt door de strategische positie van het cluster binnen Europa en de wereld;
- aanwezigheid van havens en daarmee toegang tot internationale toeleveringsketens;
- de toegang tot een groot potentieel onder de Noordzee voor de opslag van CO₂ (CCS).²

Beschikbaarheid van grondstoffen en energie in Europa

Centraal gelegen in Europa heeft het ARRRA-cluster een goede positie wat betreft de toegang tot infrastructuur en beschikbaarheid van duurzame grondstoffen en energie. Het cluster heeft:

- een hoge bevolkingsdichtheid in de regio die een grote beschikbaarheid van afvalstromen als grondstof biedt, wat kansen creëert voor een circulaire economie;
- toegang tot een biograndstoffenpotentieel door de goed ontwikkelde land- en bosbouwsectoren in de omliggende regio's, (dit wordt nader toegelicht in paragraaf 2.3);
- een strategische ligging aan de Noordzee met de benodigde haveninfrastructuur voor import van grondstoffen en export van producten;³
- de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit door de nabijheid van windparken op zee. Deze elektriciteit is onder andere nodig voor elektrificatie van industriële processen, om energie-intensieve CCU-routes mogelijk te maken én voor de productie van duurzame grond- en brandstoffen.

² Volgens TNO & EBN (2021) ongeveer 1700 Mt, zie [Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 - 2050 | Rapport | Rijksoverheid.nl](#).

³ Sustainable Industry Lab - Groene Keuzes voor de Nederlandse Basisindustrie.

Bestaande assets in ARRRRA-cluster hebben een rol in de transitie

Het expertteam ziet een belangrijke rol voor huidige installaties in de duurzame transformatie van de koolstofchemie, zoals ook te lezen in paragraaf 1.1. De ombouw van bestaande installaties zal een belangrijke rol spelen in de transitie. Pyrolyse-olie of lignine-olie op basis van houtige biograndstoffen kunnen bijvoorbeeld zonder grote veranderingen bijgemengd worden in bestaande processen. Bovendien kan er door bestaande assets in te zetten gebruik gemaakt worden van bestaande kennis en kunde, en het fijnmazig geïntegreerde netwerk in het ARRRRA-cluster. Tegelijkertijd zullen er ook nieuwe installaties nodig zijn waarvoor voortgebouwd zal worden op aanwezige kennis en kunde. In Hoofdstuk 4 gaan we nader in op de afwegingen tussen afbouw, ombouw en opbouw.

De rol van Nederland binnen ARRRRA

Nederland doet er verstandig aan uit te gaan van eigen kracht in een toekomstig ARRRRA-cluster en vandaaruit samenwerking te zoeken met Duitsland en België. Nederland kan bouwen op de sterkere energiepositie en de beschikbaarheid van afval, maar minder op de beschikbaarheid van biograndstoffen, wat wel nodig is voor de chemische industrie. Ook kan Nederland de positie van de havens exploiteren.

1.4 Het belang van behoud van de industrie in Nederland

Met het oog op de huidige ontwikkelingen is het allerm minst vanzelfsprekend dat de industrie inclusief de koolstofchemie in Nederland behouden blijft, terwijl de industrie voor de transitie wel een essentiële rol zal spelen.

Domino-effect op aanpalende ketens

Als (petro-)chemische bedrijven vertrekken uit Nederland, betekent dat uiteraard een snelle reductie van CO₂-emissies binnen Nederland.⁴ Dit zal echter niet alleen gevolgen hebben voor broeikasgasemissies, maar ook voor de productiecapaciteit en de rest van de Nederlandse economische activiteiten gerelateerd aan de chemieketen. De fysieke verwevenheid en de clustering van bedrijven zorgt nu voor een efficiënte aan- en afvoer van grondstoffen en producten.

Upstream betekent dit bijvoorbeeld dat de raffinaderijen nu erg belangrijk zijn, zoals die in Pernis, die grondstoffen (nafta) leveren aan fabrieken in Moerdijk, die op hun beurt andere bedrijven in de keten bedienen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een pijpleidingennetwerk in het ARRRRA-cluster. Door verduurzaming van mobiliteit (elektrificatie en waterstof) zal er minder vraag zijn naar fossiele brandstoffen, waardoor er minder ruwe olie in de raffinaderijen verwerkt wordt, leidend tot een lagere beschikbaarheid van nafta. Downstream is te zien dat bedrijven in ketens met hoge toegevoegde waarde, zoals de producenten van hoogwaardige polymeren, zich concentreren rondom de basischemie. Als deze basischemie wegvalt kan dit ervoor zorgen dat aanpalende waardeketens in Nederland verdwijnen.

Maatschappelijke belangen van het behoud van de industrie

Bij afbouw van fossiele industrie zou er naast economische effecten bovendien rekening moeten worden gehouden met (brede) maatschappelijke effecten.

⁴ NB. De afname in productie van koolstofhoudende producten in Nederland zal elders op de wereld worden ingevuld, aangezien de vraag naar producten blijft. De reductie van CO₂-emissies die dat in Nederland oplevert, betekent daarmee eigenlijk een verplaatsing van die emissies naar het buitenland.

Denk bijvoorbeeld aan de afbouw van de mijnbouw in Limburg die grote armoede tot gevolg had en waarvan de effecten nog steeds voelbaar zijn in de betreffende regio's. Vertrek van de industrie levert bovendien een groot risico op het weglekken van emissies naar het buitenland.

De opbouw van duurzame chemie kan, indien parallel aan afbouw van fossiele chemie, tot extra industriële activiteiten leiden. Niet alleen in nieuwe chemische bedrijvigheid die ontstaat naast de fossiele assets, maar ook in benodigde verwerkingsstappen tussen de alternatieve koolstofbron en de chemische toepassing.

Werknemers hebben eveneens belang bij het voortbestaan van de chemische industrie vanuit een het behoud van werkgelegenheid, maar specifiek ook bij het voortbestaan van een chemische industrie die verduurzaamd is. De kennis van de huidige werknemers kan namelijk van toegevoegde waarde zijn in een duurzame chemie. Zo kan langdurige en gezonde werkgelegenheid worden gegarandeerd. Consumenten hebben ook belang bij het behoud van productie van chemicaliën en kunststoffen die in zeer veel essentiële producten voorkomen (zie Figuur 1). Bovendien is het ook in maatschappelijk belang dat dit overgaat op duurzame productie en de negatieve effecten van het gebruik van fossiele grondstoffen geminimaliseerd worden.



HOOFDSTUK 2

De chemische industrie wordt complexer

In dit hoofdstuk schetst het expertteam een mogelijk eindbeeld van een duurzame koolstofchemie. In dit eindbeeld spelen drie hoofdroutes een belangrijke rol. Het eindbeeld wordt geduid aan de hand van drie kenmerken: de hogere complexiteit en verwevenheid, de alternatieve koolstofbronnen en de kostenimpact van de transformatie.

Verduurzaming en circulariteit vragen om ombouw van huidige processen, opbouw van nieuwe chemie en afbouw van bestaande installaties. De complexiteit van industriële ketens wordt groter, vanwege onder andere grotere variatie in grondstoffen en processen. Fossiele grondstoffen maken plaats voor duurzame koolstofbronnen zoals biograndstoffen en recycalaat. Deze

veranderingen hebben impact op de kosten van producten en processen in het systeem.

2.1 Het eindbeeld: een duurzame koolstofchemie

Het expertteam ziet het 'eindbeeld' van brandstof- en chemicaliënproductie als het resultaat van een decennialang transformatieproces waarin afbouw, ombouw en nieuwbouw op een complexe en niet in detail te voorspellen, maar zeker wel te beïnvloeden manier door elkaar lopen. Het eindbeeld van een duurzame koolstofchemie zal, mede afhankelijk van overheidsbeleid, uit meerdere verschillende technologieën en grondstoffen bestaan die bijdragen aan de productie van koolstofhoudende basischemicaliën en andere (deel)producten.

Het expertteam heeft drie hoofdroutes naar het eindbeeld van een duurzame koolstofchemie geïdentificeerd:

- De adaptatie van bestaande petrochemie voor duurzame koolstof.
- Synthesegas-gebaseerde chemie.
- Nieuwe chemie en biochemische omzettingen.

De drie hoofdroutes kunnen tezamen het kwalitatief zeer uiteenlopende toekomstige aanbod (op nationale en Europese schaal) aan niet-fossiele koolstof en energie optimaal benutten. Door niet in te zetten op één hoofdroute of technologie, maar alle drie de hoofdroutes en bijbehorende technologieën parallel te ontwikkelen, kan na verloop van tijd bovendien blijken welke van de opties zich het best lenen voor verdere doorgroei: zowel routes naast elkaar als geïntegreerde combinaties. De mate waarin er zal worden afgebouwd, en waarin de drie hoofdroutes zich tot elkaar verhouden is daarbij omringd met onzekerheden.

De drie hoofdroutes worden in Hoofdstuk 3 in meer detail toegelicht. In dit advies worden er geen uitspraken gedaan over de exacte volumeverhoudingen tussen de hoofdroutes, of welke hoofdroute de voorkeur zou moeten hebben, maar zeker is wel dat alle hoofdroutes en technologieën nodig zijn voor een transitie naar een duurzame koolstofchemie. In de volgende paragrafen wordt duiding aan het eindbeeld gegeven aan de hand van drie kenmerken: de hogere complexiteit en verwevenheid, de alternatieve koolstofbronnen en de kostenimpact van de transitie.

Het transitiepad, de stappen tussen de huidige situatie en het beoogde eindbeeld, is nog onzeker. Verschillende studies brengen interessante ideeën aan het licht^{5,6,7,8} maar er volgt nog geen coherent eindbeeld uit. Vanwege de vele onzekerheden en de verschillende perspectieven zal er geen eenduidig eindbeeld worden gegeven door het expertteam.

⁵ Harrandt et al. 2024, [Evaluation of Recent Reports on the Future of a Net-Zero Chemical Industry in 2050](#).

⁶ Plastics Europe 2023, [The Plastics Transition - Our industry's roadmap for plastics in Europe to be circular and have net-zero emissions by 2050](#).

⁷ Hermans et al. 2024, [Pathways for the global chemical industry to climate neutrality](#).

⁸ [Brightsite transition Outlook 2024](#).

De transitie is in 2050 nog niet afgerond, er is sprake van een transitiefase

Het geschetste eindbeeld van een fossielvrije koolstofchemie zal in 2050 nog niet zijn bereikt. Een net-zero of zelfs net-negatief emissieniveau is waarschijnlijk wél haalbaar. De focus ligt dan op het reduceren van koolstofemissies én de opslag van (biogene) koolstof. Fossiele koolstof zal dan hoofdzakelijk nog voor chemische producten worden ingezet en daar waar voor benodigde energie elektrificatie of groene waterstof lastig of kostbaar is.

De sector zal naar verwachting CO₂-neutraal kunnen opereren in scope 1 en 2, maar waarschijnlijk nog niet volledig in scope 3. Aangezien niet alle technologische routes volledig ontwikkeld zullen zijn, blijft CCS bij de chemie en brandstofproductie en -verbruik een noodzakelijk middel binnen het systeem totdat volledige defossilisering is bereikt. Maar ook daarna zal CCS een rol blijven spelen om netto-negatieve emissies te kunnen verwezenlijken. Bijvoorbeeld door het afvangen en opslaan van de CO₂-emissies die vrijkomt bij de productie van biobrandstoffen (BECCS).

2.2 Verduurzaming koolstofchemie verhoogt complexiteit

Schematische schets van de complexiteit

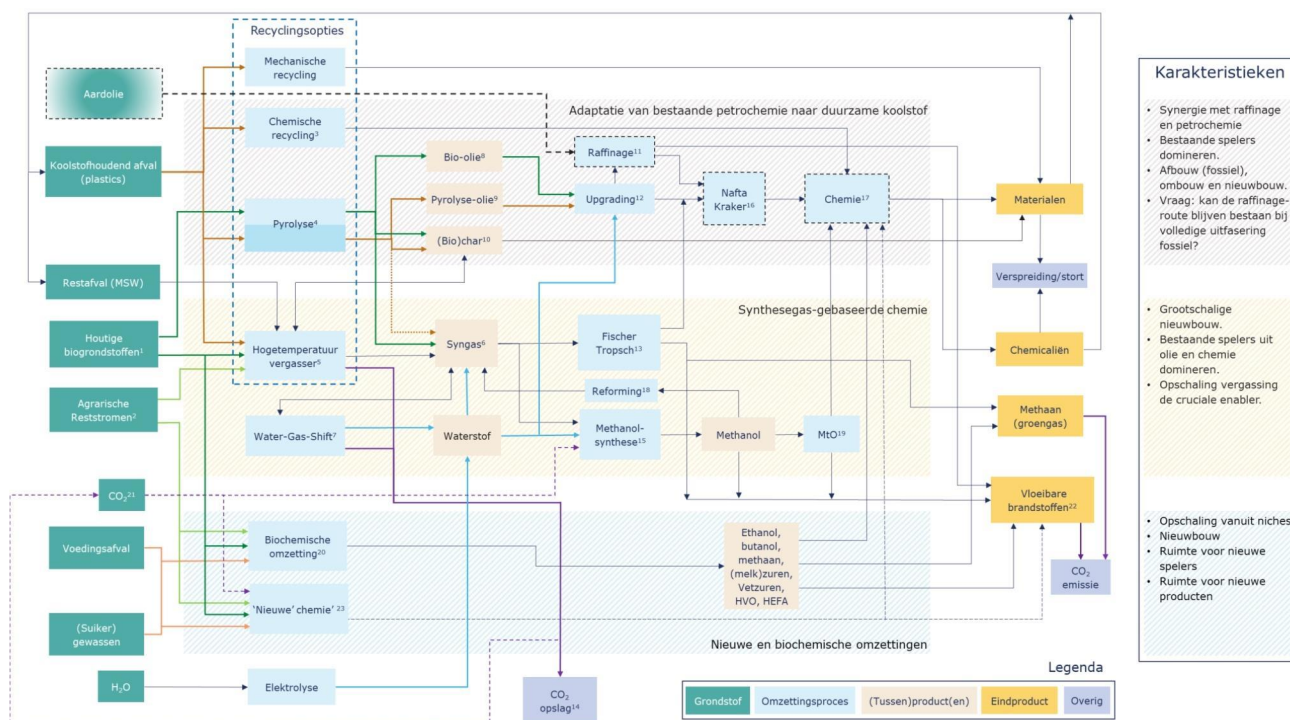
Het is nuttig om een schets te geven van de toekomstige brandstoffenproductie en de chemische industrie waarin de nadruk ligt op het 'nieuwe' en het 'oude'. **Figuur 2** geeft een indicatief beeld van de belangrijkste componenten in het systeem van een duurzame koolstofchemie. We zien de toekomst van de sector gekenmerkt worden door drie verschillende hoofdroutes zoals in de vorige paragraaf geïntroduceerd. Deze hoofdroutes onderscheiden zich onderling door de mate waarin ze bestaan uit ombouw van huidige installaties, nieuwbouw door bestaande spelers, of een radicaal nieuwe aanpak.

Daarbij hoort de disclaimer dat dit schema een verregaande simplificatie is, en dat het onmogelijk is om ieder denkbaar toekomstig proces een plaats te geven of de complexiteit van de onderlinge verwevenheid recht te doen. De afbeelding is in bijlage A (uitvergroet) opgenomen en voorzien van een set voetnoten die nadere uitleg en duiding geven. In dit hoofdstuk beperken we ons tot de hoofdlijnen.

Een groeiende complexiteit en onderlinge verwevenheid van de koolstofchemie

Voor alle drie de hoofdroutes, en met name gezien het feit dat alle drie de hoofdroutes gecombineerd deel uit zullen maken van het eindbeeld, zal de duurzame koolstofchemie aanzienlijk complexer zijn dan de huidige fossiel-gebaseerde situatie. Zowel tijdens de transitie als in het eindbeeld spelen meerdere typen grondstoffen een belangrijke rol en zullen meerdere grondstofketens nodig zijn om aan de vraag naar koolstofhoudende producten te voldoen. Deze diversiteit vraagt om uiteenlopende technologieën om de grondstoffen op een geschikte manier te verwerken. Bovendien neemt de verwevenheid tussen verschillende technologieën en grondstofstromen toe, met een grotere uitwisseling van volumestromen en deelproducten tussen installaties.

Onderlinge nabijheid van installaties is vaak gewenst vanwege moeilijke transporteerbaarheid van halffabricaten waarbij er ook in sommige gevallen een hogere efficiëntie in gekoppelde processen bereikt kan worden. Er zijn ook voorbeelden, zoals pyrolyse-olie en methanol, waarvoor nabijheid minder belangrijk is. Ketens kunnen worden ontkoppeld daar waar halffabricaten goed vervoerd kunnen worden.



Figuur 2. Drie hoofdroutes in een duurzame koolstofchemie, inclusief de productie van duurzame brandstoffen. De voetnoten in Bijlage A bevatten nadere informatie.

2.3 Drie typen duurzame koolstofbronnen

Een belangrijk element van de transitie naar een duurzame koolstofchemie is de vervanging van fossiele koolstofbronnen zoals aardolie en aardgas door duurzame alternatieven. De duurzame chemie gaat hoofdzakelijk uit van drie typen koolstofbronnen: uit recycling, uit biograndstoffen en uit CO₂.

Hieronder worden ze kort toegelicht, inclusief de overwegingen per grondstoftype. Een goed begrip van de verschillen tussen duurzame koolstofbronnen onderling en het verschil met fossiele bronnen is belangrijk voor het duiden van de complexiteit en verwevenheid, uitdagingen in ontwikkeling en randvoorwaarden voor succes.

Recycling: behoud van koolstof in de keten

Koolstof in de vorm van simpele of complexe koolstofverbindingen kan worden teruggewonnen. Door middel van recyclingtechnieken kunnen (chemische) afvalproducten opgewerkt worden tot bruikbare grondstoffen voor de chemische industrie. We onderscheiden verschillende opties van recycling: mechanische recycling, pyrolyse, (hoge temperatuur)vergassing en andere vormen van chemische recycling.

- Mechanische recycling is de minst energie-intensieve recycling-methode waarbij de koolstofverbindingen als geheel worden teruggewonnen en vanuit dat gezichtspunt dus aantrekkelijk wordt geacht. Koolstofhoudende materialen worden mechanisch verpulverd of versnipperd. Het materiaal wordt niet aangetast op molecuulniveau. Met deze technologie verliest het materiaal een deel van zijn kwaliteit ('downcycling'). Zo verliezen kunststoffen vaak hun sterkte, flexibiliteit of kleur, waardoor ze minder geschikt worden voor hoogwaardige toepassingen.
- Pyrolyse is een energie-intensief thermochemisch proces waarbij koolstofhoudende materialen worden verhit in afwezigheid van zuurstof om waardevolle koolwaterstoffen en chemische bouwstenen terug te winnen. Bij pyrolyse van kunststoffen zoals polyethyleen (PE),

polypropyleen (PP) en polystyreen (PS) worden de polymeren afgebroken tot kleinere moleculen. Dit levert olieachtige vloeistoffen, gasen (zoals methaan, ethaan) en koolwaterstoffen op die opnieuw als grondstof kunnen worden gebruikt.

- Hogetemperatuurvergassing is een energie-intensief proces dat koolstofhoudende materialen onder hoge temperaturen en beperkte zuurstoftoevoer afbreekt tot de meest elementaire bouwstenen in de vorm van synthesesgas (syngas). Dit gas bestaat voor meer dan de helft uit waterstof en koolmonoxide, waaruit weer alle mogelijke chemische verbindingen kunnen worden opgebouwd (de syntheseroute in Figuur 2).
- Onder de overige chemische recyclingsopties (naast pyrolyse en vergassing) vallen technologieën of processen met een specifieke vorm van depolymerisatie zoals solvolyse, hydrolyse en enzymatische depolymerisatie. Deze technologieën leveren basischemicaliën en complexere stoffen die direct in de chemie ingezet kunnen worden, afhankelijk van het proces en de grondstof (zie bijlage A). Dit is een vorm van recycling met behoud van chemische kwaliteit waarbij op basis van de geproduceerde grondstoffen weer hoogwaardige producten kunnen worden gemaakt.

Een nadeel van mechanische recycling en de overige chemische recyclingroutes is dat ze een innamescope hebben. Slechts een beperkt deel van de beschikbare 'end-of-life' koolstof kan langs deze routes circulair worden verwerkt. Pyrolyse en vergassing zijn meer 'omnivore' opties, die potentieel geschikt zijn om vrijwel alle koolstofhoudende stromen, (inclusief biomassastromen), voor industriële verwerking geschikt te maken. Het nadeel is dat de oorspronkelijke molecuulstructuur (vooral bij vergassing en in mindere mate bij pyrolyse) verloren gaat, waardoor vanuit pyrolyse-olie of syngas de gewenste molecuulstructuren weer opgebouwd moeten worden. Dit is daarmee een energie-intensiever proces.

In een duurzaam koolstofchemie-systeem is er geen belangrijke plaats voor verbranding of *waste-to-energy*, behalve voor werkelijke probleemstromen (bijvoorbeeld onverwerkbaar chemisch afval). Dit komt doordat de waarde van recycling- en biomassastromen vooral ligt in hun koolstofgehalte en niet of veel minder in directe energie-toepassingen zoals de verbranding voor warmteopwekking of elektriciteitsproductie. Aan dit laatste zal zonne- en windenergie in de toekomst de grootste bijdrage leveren.⁹

Beschikbaarheid

Plastic afvalstromen zijn beschikbaar vanuit allerlei bronnen in allerlei samenstellingen. Momenteel wordt maar een klein deel van het afval gerecycled tot grondstoffen.¹⁰ Dit percentage kan fors omhoog, maar dit vereist dat afval niet of veel minder verbrand wordt in AVI's, en (na inzamelen, sorteren en voorbereiden) wordt ingezet afhankelijk van de kwaliteit.

Daarbij blijkt het op dit moment moeilijk om gerecycled afval op een gestandaardiseerde, uniforme manier beschikbaar te maken als handelsproduct (oftewel *commodity*) dat voldoet aan de kwaliteitseisen voor hoogwaardige toepassingen. Afvalstromen zijn vaak divers van samenstelling of vervuild. Daardoor is er een hogere kans op schade aan installaties en is nabehandeling complex, waardoor ze minder bruikbaar zijn voor specifieke hoogwaardige chemische of industriële processen. Hiertoe is het van belang dat de toeleveringsketen van gerecycled afval verder wordt ontwikkeld door overheid, bedrijfsleven en consumenten. Een gebrek aan commodificering maakt het lastig om een schaalbare en betrouwbare grondstofstroom te creëren, wat de ontwikkeling en toepassing van

⁹ Zie: [Nationaal Plan Energiesysteem \(2023\) | Ministerie Economische Zaken en Klimaat \(rijksoverheid.nl\)](#) en [Trajectverkenning klimaatneutraal 2050 | Planbureau voor de Leefomgeving \(pbl.nl\)](#).

¹⁰ Plastics Europe 2023. The Plastics Transition - Our industry's roadmap for plastics in Europe to be circular and have net-zero emissions by 2050, <https://plasticseurope.org/changingplasticsforgood/the-plastics-transition/>.

hoogwaardige producten uit recycalaat belemmert. De vergassingstechnologie ondervangt dit in belangrijke mate, waarbij een grotere verscheidenheid aan afval kan worden ingezet.

Daarnaast is er sprake van grootschalig aanbod van virgin plastic op de markt (voornamelijk uit China), waarmee recycalaat als grondstof vanuit kosten oogpunt niet kan concurreren. Dit heeft in 2024 geleid tot het faillissement van zeven recyclingbedrijven.¹¹

Verder zorgen bureaucratische procedures rond de 'einde afval-status' ervoor dat het gebruik van afval als grondstof wordt bemoeilijkt. Van oudsher heeft afval niet het doel gehad om gerecycled te worden om daardoor een grondstof te worden. Er is veel regelgeving rond afval om de maatschappij te beschermen tegen risico's waaronder toxiciteit. Afval kan hierdoor niet zomaar tot grondstof worden verklaard.

Recyclebaarheid

Additieven (toxische stoffen) in plastic maken ze lastiger mechanisch te recycelen. Additieven accumuleren namelijk als plastics worden gerecycled met behoud van materiaalwaarde. Te hoge accumulatie maakt recycalaat ongeschikt voor bepaalde toepassingen, zoals voedselverpakkingen. Dit kan worden verhinderd door chemisch te recycelen, maar dit kost zoals beschreven meer energie en is complexer. Daarom is het van belang dat er al bij productontwerp rekening gehouden wordt met de geschiktheid voor een circulaire levensloop. Dit sluit aan bij het EU-beleid van het 'safe and sustainable by design framework' (SSbD). Het SSbD-kader is een vrijwillige aanpak om het innovatieproces voor chemische stoffen en materialen te kunnen sturen.¹²

Biograndstoffen voor chemische producten

Biograndstoffen zijn hernieuwbare grondstoffen die zonlicht als energiebron en CO₂ als koolstofbron gebruikt.

Typen biograndstoffen op basis van herkomst

Op basis van herkomst kunnen er drie typen biograndstoffen als grondstof in een duurzame koolstofchemie worden onderscheiden:¹³

- Stromen uit de landbouw waaruit nuttige fracties ingezet kunnen worden zoals suikers, oliën, en lignocellulosehoudende componenten.
- Stromen uit de bosbouw en de houtsector, waarbij vooral houtige reststromen vrijkomen bij beheerwerkzaamheden in het landschap of in de houtverwerkingsindustrie.
- Tertiaire stromen, zoals biotische en biologische afvalstromen.

De technologieën en waardeketens die ontwikkeld worden voor de productie van biogebaseerde chemicaliën en materialen stellen ons in staat om een breed scala aan biograndstoffen om te zetten in diverse hoogwaardige chemische producten. Op dit transitiepad zal de inzet van biograndstoffen flexibel moeten verlopen tussen de hoofdroutes; naar verwachting zal deze in eerste instantie sterker zijn gericht op hoofdroute 1, maar verschuift dit richting 2 en 3. Voor alle inzet van biograndstoffen is het essentieel om de duurzaamheid daarvan te waarborgen.

Beschikbaarheid in Nederland en de EU

De beschikbaarheid van duurzame biograndstoffen in Nederland kan weliswaar worden vergroot, maar dit zal niet voldoende zijn voor het verduurzamen van de chemie inclusief de verduurzaming

¹¹ NRC (december 2024), [Zevende faillissement in rampjaar plasticrecycling, maar sector is \(nog\) niet weg](#).

¹² European Commission, research en innovation, [Safe and sustainable by design](#) (SSbD framework).

¹³ [Beschikbaarheid biograndstoffen in Nederland en de Europese Unie](#) (PBL, 2024)

van de in Nederland getankte bunkerbrandstoffen (luchtvaart en scheepvaart). Er zijn verschillende kansen om het biograndstoffenpotentieel in Nederland te verhogen.¹⁴

De eiwittransitie (de verschuiving van dierlijke eiwitconsumptie naar plantaardige eiwitconsumptie) kan een positieve uitwerking hebben op de beschikbaarheid van biograndstoffen omdat daardoor meer landoppervlak beschikbaar kan komen dat nu voor de teelt van veevoer wordt gebruikt.

Ook heeft bio-ethanol potentie. Wereldwijd produceert bijvoorbeeld de energiesector al op grote schaal bio-ethanol als brandstof door fermentatie van biomassa-suikers met behulp van micro-organismen om de klimaatimpact van transportbrandstof omlaag te brengen. Deze bio-ethanol kan ook gebruikt worden voor de chemie of kan ingezet worden om bouwstenen te maken voor de productie van vezels en plastics.¹⁵ De productie in Nederland hiervan is nog beperkt.

Hoogstwaarschijnlijk moet Nederland biograndstoffen importeren om aan zijn behoeften te voldoen.¹⁶ Zoals uiteengezet in de studie *Beschikbaarheid biograndstoffen in Nederland en de Europese Unie* van het Planbureau voor de Leefomgeving¹⁷ is het de verwachting dat de benodigde import met name vanuit andere Europese landen zal komen. Onderzoek van de Europese Commissie stelt dat meer dan 93% van de biograndstoffen in 2050 uit de EU zelf zal komen.¹⁸ Dit sluit ook aan bij de constatering dat er belangrijke geopolitieke, socio-economische en regelgevende barrières zijn die import van buiten de EU compliceren.¹⁹ Bovendien zullen die regio's buiten de EU zelf ook veel biograndstoffen nodig hebben voor hun eigen ontwikkeling en verduurzaming; uitgaande van studies waarin schattingen worden gegeven van de mondiale beschikbaarheid zou men op basis van een 'fair share'-benadering (die we in dit advies overigens niet aanhouden) zelfs kunnen betogen dat Europa netto zou moeten exporteren. Dit gaat over netto export en sluit import vanuit buiten Europa niet uit.

Ontwikkeling van supply-chains

Gezien de grote hoeveelheden biograndstoffen die nodig zijn voor de verduurzaming van de koolstofchemie (incl. de bunkerbrandstoffen) zal Nederland op EU-niveau moeten inzetten op het tot stand brengen van stabiele supply-chains om het Europees biograndstoffenpotentieel te ontsluiten. Een aandachtspunt hierbij is de efficiëntie van het vervoer van biograndstoffen in verschillende vormen. Het transport zal hierdoor grotendeels plaatsvinden in voorbereide vorm zoals houtpellets, pyrolyse-olie of getorreficeerd materiaal. Houtsnippers of agrarische (secundaire) stromen laten zich immers niet eenvoudig vervoeren over grote afstanden en is daarmee minder efficiënt. Bovendien leidt voorbereiding tot meer toegevoegde waarde van de biomassa in exporterende landen.

Vertraging door maatschappelijke weerstand

Veranderingen in de omgeving, zeker wanneer deze ook een milieu-impact kunnen hebben. Deze ruimtelijke impact en aanverwante landschapsvervuiling kunnen tot zorgen en weerstand leiden onder de lokale bevolking. Ook is er nog steeds, al dan niet terecht, veel discussie en twijfel over de

¹⁴ [Trajectverkenning klimaatneutraal 2050 | Planbureau voor de Leefomgeving \(pbl.nl\)](#)

¹⁵ [Nationaal Plan Energiesysteem \(2023\) | Ministerie Economische Zaken en Klimaat \(rijksoverheid.nl\)](#) en [Trajectverkenning klimaatneutraal 2050 | Planbureau voor de Leefomgeving \(pbl.nl\)](#)

¹⁶ [Trajectverkenning klimaatneutraal 2050 | Planbureau voor de Leefomgeving \(pbl.nl\)](#)

¹⁷ [Beschikbaarheid biograndstoffen in Nederland en de Europese Unie van Planbureau voor de Leefomgeving \(pbl.nl\)](#).

¹⁸ 'Impact Assessments' van de Europese Commissie over de EU-klimaatdoelen en paden naar klimaatneutraliteit ([EC, 2020b](#), [2024b](#)).

¹⁹ Mandley et al., 2022, [The implications of geopolitical, socioeconomic, and regulatory constraints on European bioenergy imports and associated greenhouse gas emissions to 2050](#). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(5), 1058-1076.

duurzaamheid van het gebruik van biomassa of biograndstoffen (landgebruik, ontbossing en CO₂-neutraliteit).²⁰ In de energietransitie leidt dit alles tot afschaffing of vertraging van plannen.

CO₂ als grondstof

CO₂ kan worden toegepast als koolstofbron binnen de chemische industrie.

Herkomst van CO₂-stromen

Wanneer CO₂ wordt afgevangen én vervolgens toegepast als grondstof dan noemen we dat Carbon Capture and Utilization (CCU). Daarnaast kan afgevangen CO₂ ondergronds worden opgeslagen: Carbon Capture and Storage (CCS). Als de CO₂ van biogene oorsprong is, resulteert die opslag in negatieve emissies. CCS en CCU zullen beide nodig zijn in de transitie naar een duurzame koolstofchemie.

CCS

Het afvangen van CO₂ en het ondergronds opslaan leidt tot een vermindering van CO₂-emissies uit de industrie en is cruciaal voor het bereiken van de klimaatdoelstelling voor 2030. In 2026 zal middels het Porthos project de eerste CO₂ onder de zeebodem opgeslagen gaan worden.²¹ De CCS-route biedt de mogelijkheid om bestaande technologieën en infrastructuren te gebruiken, zonder de noodzaak van een volledige hervorming van de chemische industrie, en om CO₂ permanent uit de atmosfeer te verwijderen, waardoor dit een sleutelement is in de netto-nul-CO₂-uitstoot,²² waarbij de benodigde energie voor CCS, de kosten, en de eindigheid van opslagcapaciteit belangrijke aandachtspunten zijn. Daarnaast moet bij de toepassing van CCS rekening worden gehouden met de impact op de uitrol van CO₂ arme technieken. Wanneer er CCS doelstellingen worden gesteld, kan dit mogelijk juist leiden tot het blijven inzetten van huidige installaties van CO₂ bij vrij komt.

Er kunnen twee brontechnologieën voor het afvangen (Capture) van CO₂ worden onderscheiden:

- CO₂-afvang uit industriële rook- of restgassen (in eerste instantie uit fossiel gebaseerde processen, op termijn ook bij processen met biogene grondstoffen zoals de productie van biobrandstoffen).
- CO₂-afvang rechtstreeks uit de atmosfeer, zogeheten Direct Air Capture (DAC).

Op korte termijn kan CO₂ worden verkregen uit verschillende industriële bronnen en elektriciteitscentrales die op fossiele brandstoffen werken. Met het uitfasen van fossiele grondstoffen en om echt hernieuwbaar en netto CO₂-neutraal te zijn, zal echter steeds vaker gebruik moeten worden gemaakt van CO₂ uit biogene CO₂-bronnen of CO₂ uit de atmosfeer. Omdat de CO₂-concentratie in de atmosfeer honderd keer kleiner is dan in rook- en restgassen en de (energie)kosten daardoor (veel) hoger zijn, ligt het voor de hand dat DAC pas later ingezet gaat worden. Omdat koolwaterstoffen steeds minder voor stationaire energie-opwek gebruikt worden, is CO₂ uit restgassen van de procesindustrie een belangrijke toekomstige bron.

Inzet van CO₂ als grondstof (CCU)

Wat betreft de toepassing van afgevangen CO₂, oftewel CCU, zijn de ontwikkelingen en de wenselijkheid voor de twee brontechnologieën verschillend. Het gebruik van CO₂ afgevangen uit

²⁰ PBL (2024) [On the science of carbon debt](#) en PBL (2020) [Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa](#)

²¹ Bekijk voor meer informatie de website van <https://www.porthosCO2.nl/>.

²² Gabrielli et al., 2020, [The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO2 Emissions Chemical Industry](#), Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59, 7033-7045.

industriële verbrandingsgassen of omzettingsprocessen is verder in ontwikkeling. Opgemerkt dient wel te worden dat CO₂ als molecuul een zeer lage energie-inhoud heeft en dat het omzetten van CO₂ in bruikbare bouwstenen alleen rendabel zal zijn als er veel hernieuwbare energie beschikbaar is.

In hoofdroute 2 kan door de toevoeging van H₂ de CO₂ die anders vrij zou komen, bij onder andere Fischer-Tropsch, worden omgezet in koolwaterstoffen of in methanol. Dit kan worden gezien als een vorm van CCU. Ook in de derde hoofdroute liggen kansen: de ontwikkeling van 'nieuwe chemie' waarin CO₂ met groene waterstof wordt omgezet in koolwaterstofproducten. Recente studies^{23,24} veronderstellen dat CO₂ een belangrijke rol kan gaan spelen als koolstofbron voor de chemische industrie. In paragraaf 3.3 lichten we de mogelijkheden van en perspectieven op CCU nader toe.

2.4 Transitiekenmerken met impact op kosten

Hoewel het eindbeeld niet met zekerheid kan worden vastgesteld, ziet het expertteam vier kenmerken van de transitie die impact zullen hebben op de kosten en in meer of mindere mate van toepassing zullen zijn op alle drie de hoofdroutes in de verduurzaming van de koolstofchemie ten opzichte van de huidige situatie.

1. Een lagere volumedoorzet van koolstofhoudende (deel)producten.
2. Een hoger energiegebruik en hogere kosten per producteenheid door een langere keten.
3. Een groter ruimtebeslag.
4. Hogere kosten van duurzame koolstofbronnen

a. Een lagere volumedoorzet van koolstofhoudende (deel)producten

Het expertteam acht het zeer waarschijnlijk dat de totale vraag naar koolstofhoudende producten in Europa afneemt. De volumevraag naar koolstofhoudende grondstoffen wordt voor het grootste deel bepaald door de vraag vanuit de chemie en de vraag naar brandstoffen. De verandering van het gevraagde volume heeft verschillende redenen. De vraag naar (vloeibare) brandstoffen zal steeds verder afnemen door elektrificatie en de inzet van koolstofarme waterstof. Dit gaat met name om de vraag naar benzine en diesel voor wegtransport en voor het energieverbruik in de chemie zelf. Dit staat los van de vraag naar chemische koolstofhoudende producten.

De vraag naar chemische producten zal op wereldschaal sterk toenemen, maar zal in Europa waarschijnlijk constant blijven.²⁵ De inzet op een circulaire economie op basis van circulariteitsprincipes (zoals de 7 R's²⁶) zorgen voor een afname van vraag naar nieuwe productie in Europa. Zo zal een hoger recycling percentage en een langer verblijf van koolstof in de keten leiden tot minder vraag naar nieuwe grondstoffen en producten. Daarnaast heeft het ARRRRA-cluster op dit moment een grote exportpositie voor beleving van andere continenten. De verwachting is dat die exportpositie in de toekomst kleiner zal worden.

Kosten worden in de procesindustrie in hoge mate bepaald door '*economies of scale*'. Installaties zullen voldoende volume moeten kunnen verwerken om concurrerend te worden of te blijven. De economische omvang van installaties rond recycling en biograndstoffen zal van specifieke

²³ Harrandt et al. 2024, [Evaluation of Recent Reports on the Future of a Net-Zero Chemical Industry in 2050](#).

²⁴ Kähler, F. and Carus, M. et al. 2022, [CO₂ Reduction Potential of the Chemical Industry Through CCU](#). Editor: [Renewable Carbon Initiative \(RCI\)](#), April 2022.

²⁵ Plastics Europe (2023).

²⁶ Rethink, reduce, redesign, re-use, repair, recycle, recover.

omstandigheden afhangen, waaronder de afstand tot de bron van de grondstoffen en de benodigde zuiverheid van de grondstof en daarmee de schaarste van de grondstof.

b. Een hoger energiegebruik en hogere kosten per producteenheid door een langere keten

Wanneer de industrie zich gedurende de komende decennia transformeert als gevolg van de drijvende krachten van klimaat- en circulariteitsbeleid, zullen olie en aardgas geleidelijk vervangen worden door alternatieve koolstofbronnen (zoals beschreven in paragraaf 2.3). Deze grondstoffen hebben meestal een lagere energie-intensiteit dan fossiele grondstoffen. Daarnaast gaat het om minder homogene grondstoffen, die vaak nog opwerking nodig hebben. Dat betekent dat er meer energie en verwerkingsstappen nodig zijn om deze grondstoffen tot hetzelfde (of vergelijkbaar) eindproduct te brengen in vergelijking met fossiele grondstoffen. Door deze extra verwerkingstappen wordt de keten verlengd. Er is daardoor sprake van hogere verwerkingskosten en energiekosten.

c. Kosten van duurzame koolstofbronnen liggen hoger dan fossiel

Fossiele grondstoffen hebben weinig tot geen voorbewerking nodig voor commodificering. Aardgas kan zelfs vrijwel direct worden ingezet. Dit in tegenstelling tot de duurzame alternatieven, die, zoals hierboven beschreven, vaak extra opwerking nodig hebben voordat deze toegepast kunnen worden. Deze extra verwerkingsstappen zorgen ervoor dat de (productie)kosten van deze grondstoffen hoger liggen. In dit geval kijken we alleen naar de kostprijs en worden de maatschappelijke kosten vanwege klimaatverandering niet meegenomen.

d. Een groter ruimtebeslag

Een duurzame koolstofchemie, en het daarbijbehorende complexe industriële systeem, vereist meer ruimte dan de huidige fossiele chemie, door de diversiteit aan grondstoffen, extra technologieën voor verwerking en opslag, en de benodigde infrastructuur voor nieuwe of langere ketens. Daarnaast is de verwachting dat niet alleen het eindbeeld meer ruimte kost, maar dat er ook tijdens de transitie een grotere ruimtevraag zal optreden, omdat 'het oude' nog een bepaalde tijd naast 'het nieuwe' zal moeten bestaan. We zien om deze reden nu al 'satellietsites' opkomen: locaties waar in de voorbewerking van grondstoffen wordt voorzien. Een voorbeeld daarvan is het industrie terrein Zevenellen in Roermond voor toelevering aan Chemelot.

Omdat ruimte een schaars goed is, zal een hoger ruimtebeslag tot extra kosten leiden. Als die ruimte voor activiteiten wordt ingezet die tot een relatief lage toegevoegde waarde leiden (zoals zuiveren en sorteren), dan zal dat remmend werken voor terreinbeheerders om deze ruimte toe te kennen aan circulaire initiatieven.



HOOFDSTUK 3

Drie hoofdroutes van duurzame koolstofchemie

In dit hoofdstuk worden de drie hoofdroutes die volgens het expertteam kunnen worden onderscheiden in een duurzame koolstofchemie in meer detail toegelicht.

De drie hoofdroutes in de duurzame koolstofchemie onderscheiden zich op type grondstoffen en toepassing van verschillende bestaande of nieuwe technologieën. Bovendien is er een duidelijk verschil tussen de routes wat betreft mate van

volwassenheid en de opschaalbaarheid. Ook wordt er inzicht geboden in relevante ontwikkelende partijen.

3.1 Hoofdroute 1: De adaptatie van bestaande petrochemie voor duurzame koolstof (ombouw)

De eerste van drie hoofdroutes gaat uit van de adaptatie van de bestaande petrochemie. In plaats van de fossiele grondstof, nafta uit aardolie, wordt gebruik gemaakt van een duurzaam alternatief. Voor de bereiding van deze duurzame nafta kunnen duurzame koolstofbronnen worden gebruikt, zoals houtige biograndstoffen, agrarische gewassen, diverse biogene reststromen en koolstofhoudend afval. Hiermee kunnen bestaande chemische assets zoveel mogelijk in gebruik blijven. We behandelen twee technologieën ter illustratie van de mogelijkheden in hoofdroute 1, maar dit is geen sluitende opsomming van de mogelijkheden op deze route.

Pyrolyse als belangrijke pijler

Een belangrijke pijler in deze hoofdroute en een vorm van synergie tussen de oude technologie en nieuwe grondstoffen is het gebruik van pyrolyse-olie in krakers. Hierbij kunnen plasticafval en houtige biograndstoffen en gewassen allemaal een rol spelen. Toegepast op plasticafval levert pyrolyse na bewerking of upgrading vooral voeding als synthetische nafta voor de naftakraker. Echter, afhankelijk van zowel de aard van de inname, als van de procescondities kan pyrolyse een wisselend spectrum aan gasvormige, vloeibare en vaste koolstofproducten leveren voor verdere verwerking op andere manieren. Aan deze complexiteit wordt in **Figuur 2** geen recht gedaan (zie toelichting in bijlage A voor meer details).

De toepassing van pyrolyse is nog in de beginfase en kleinschalig.²⁷ Toch wordt er verwacht dat er de komende tien jaar aanzienlijke groei zal plaatsvinden. Marktanalyses²⁸ wekken de verwachting dat de wereldwijde capaciteit voor pyrolyse-olie aanzienlijk zal toenemen tot 2030, mede dankzij verbeterde zuiveringstechnologieën en het toenemende belang van circulariteit. Er zijn al verschillende initiatieven gestart van omzetting van pyrolyse-olie naar feedstock voor stoomkrakers in de VS, Europa en Azië.²⁹ Daarbij bestaan (technische) uitdagingen en beperkingen zoals de noodzaak om de chemische zuiverheid en stabiliteit van pyrolyse-olie te verbeteren. Daarnaast speelt de afhankelijkheid van overheidsbeleid en economische prikkels om een bredere acceptatie te bevorderen.

Potentieel van lignineolie

Daarnaast zijn er andere ontwikkelingen die een bijdrage zouden kunnen leveren. Zo heeft lignineolie mogelijk een toepasbaarheidspotentieel in huidige installaties, hoewel veel kleiner dan pyrolyse-olie. Door het koken van lignocellulosehoudende biograndstoffen in ethanol (of andere oplosmiddelen) wordt een olie geproduceerd die bijgemengd kan worden in de fossiele inputstroom van 'Fluid Catalytic Crackers' (FCC), die al in Nederland aanwezig zijn.³⁰ Deze nieuwe technologie is niet specifiek opgenomen in Figuur 2. Onderzoek en pilotinstallaties zijn gaande,³¹ maar grootschalige implementatie vereist verdere technologische en economische ontwikkeling.

²⁷ Digital Refining (november 2024), [Upgrading pyrolysis oil for greater plastic circularity](#).

²⁸ Market Research.com (februari 2024), [Pyrolysis Oil Market Size, Trends, Analysis, and Outlook to 2030- Uncover Country and Company Growth Opportunities in 2024 and Beyond](#).

²⁹ Eén van de grootste recyclingfabrieken ter wereld op basis van pyrolyse-olie, met een capaciteit van 192 kton plasticafval per jaar, wordt op dit moment gebouwd in de VS ([License Agreement Reached for Massive Gulf Coast Pyrolysis Facility | Plastics Technology](#)).

³⁰ Schröder, T., 2020, [Petrochemische industrie duurzamer door bio-olie uit restproduct lignine | Change Inc.](#)

³¹ Vertoro 2024, In september 2021 heeft Vertoro de Deense reder Maersk als investeerder binnengehaald. De middelen zijn aangewend om een kton-schaal flagship plant in Geleen te realiseren, die in maart 2024 in gebruik is genomen. In augustus 2024, heeft Vertoro een strategische samenwerking aangekondigd met 's werelds grootste (zwavelvrije) lignineproducent, Raízen (Brazilië). Hierover is meer te lezen op de website van Vertoro.

Bestaande spelers in de Nederlandse koolstofchemie hebben een belangrijke rol

Grootschalige pyrolyse kan dus aantrekkelijk zijn voor een grootschalig en divers industrieel cluster. Installaties die plastic verwerken kunnen op de site zelf staan, maar wellicht kunnen ruwe bio- en pyrolyse-olie ook gemaakt worden op kleinschaligere sites en daarvandaan geïmporteerd worden om centraal opgewerkt te worden voor gebruik in de chemie. Dit onderbouwt de karakteristieken die aan deze hoofdroute zijn gegeven, rechts in **Figuur 2**: ombouw/adaptatie, vaak door en bij bestaande spelers en synergie met bestaande operaties. Bijkomend voordeel kan zijn dat voor technologie die gebruik maakt van huidige installaties, mogelijk beperktere financiering en ruimte voor nieuwbouw benodigd is dan in de andere routes.

3.2 Hoofdroute 2: Synthesegas-gebaseerde chemie (om- en opbouw)

De tweede hoofdroute ligt dicht tegen de huidige activiteiten aan van koolstofchemie-spelers downstream van de huidige stoomkrakers. Verdere ontwikkeling en opschaling vergt innovatie op het gebied van nieuwe grondstoffen.

Vergassing als sleuteltechnologie

Vergassing is een proces van partiële verbranding met een ondermaat van zuurstof, waarbij de gebruikte grondstof wordt afgebroken tot synthesegas (of kortweg syngas). Dit is een mengsel van met name koolmonoxide en waterstof en daarnaast methaan, CO₂ en een aantal andere gassen. Grondstoffen voor dit proces zijn onder andere afval, houtige biogrondstoffen en agrarische reststromen. Deze hoofdroute leent zich bij uitstek voor inzet van meer laagwaardig afval dat zich niet kwalificeert voor bijvoorbeeld pyrolyse. De belangrijkste technieken voor de verwerking van syngas zijn methanol- en Fischer-Tropsch (FT)-synthese. De eerste ontsluit de chemie via Methanol-to-olefines (MtO) en de tweede is gericht op nafta en brandstoffen (duurzame kerosine en diesel, met name voor lucht- en scheepvaart). De nafta kan vervolgens een naftakraker voeden en de olefinen uit MtO kunnen worden gebruikt in de huidige chemie. Hiermee ontstaat er een grote verwevenheid tussen hoofdroute 1 en hoofdroute 2.

De toevoeging van waterstof is in deze hoofdroute essentieel. Door toevoeging van waterstof aan syngas, al dan niet via de Water-Gas-Shift-reactie (zie **Figuur 2** en bijlage A), wordt de verhouding tussen waterstof en koolmonoxide geoptimaliseerd en zal in het FT-proces of de methanolsynthese meer koolstof uit de biogrondstoffen worden omgezet in koolwaterstoffen of methanol dan wanneer er geen waterstof wordt toegevoegd. Er is dan sprake van een hogere koolstofopbrengst waarbij minder CO₂ wordt gevormd. Aangezien de energie in dat geval uit de toegevoegde waterstof komt, kan dit deel van de output van het FT-proces worden gezien als synthetische brandstof.

Ontwikkeling en opschaling van vergassing is een cruciale *enabler*

Waar de verwerking van syngas een bekende technologie is, die alleen commercieel rendabel kan zijn bij voldoende grootschaligheid, is vergassing van biogrondstoffen en (plastic) afval iets wat nog verder ontwikkeld moet worden. De meeste plastic-afvalvergassingsprojecten bevinden zich in Technology Readiness Level (TRL) 5-6 (validatie en demonstratie). Sommige projecten bevinden zich in TRL 7-8 en worden getest in commerciële demonstratiefaciliteiten. Voor (houtige) biomassa is het TRL hoger, typisch 7 tot 8. Er zijn ook volledig operationele installaties (TRL 9) in Finland, Duitsland en Zweden, maar die leveren syngas van onvoldoende kwaliteit om verder te verwerken in een FT-

proces. Hoogwaardig syngas vereist complexe zuiveringsstappen (verwijdering van teer, zwavel, CO₂, en alkaliën), die technisch uitdagend zijn.

Technische uitdagingen hangen samen met de zuiverheid van het syngas, maar ook met de variabiliteit van de feedstock, de stabiliteit of continuïteit van het vergassingsproces en de energie-efficiëntie. Biograndstoffen hebben vaak een variabel vocht- en energiegehalte, wat leidt tot variaties in procesprestaties. Door biograndstoffen eerst te torreficeren tot 'biokolen' alvorens te vergassen kan een meer homogene feedstock worden geproduceerd die het vergassingsproces kan vereenvoudigen³². Plastic afval heeft een heterogene samenstelling en bevat vaak verontreinigingen die schadelijke emissies of reactorproblemen kunnen veroorzaken. Daarnaast zijn vergassingsreactoren gevoelig voor processtorings, zoals slakvorming in hogetemperatuurvergassing of bedstabiliteitsproblemen in fluidiserende reactoren. Hierdoor kunnen de reactoren niet volcontinu draaien. Tot slot moet de energie-efficiëntie van vergassingsprocessen vaak worden verbeterd om concurrerend te kunnen zijn met alternatieven.

Nieuwe en bestaande spelers aan de slag met nieuwbouw voor vergassingstechnologie

Nieuwe partijen melden zich in deze markt. Opkomende partijen in de vergassingstechnologie zijn onder andere Maersk, en mogelijk RWE en Uniper, gevestigde bedrijven vanuit andere (verwante) sectoren. Daarnaast maken op dit moment ook gevestigde Europese partijen uit aanpalende domeinen kenbaar deze hoofdroute verder te verkennen of ontwikkelen.

De productie van methanol als belangrijk platformmolecuul

Methanol (CH₃OH) is een belangrijk platformmolecuul in de huidige en de toekomstige chemische industrie. Het kan bijvoorbeeld direct worden gebruikt als (scheeps)brandstof of, zoals hiervoor aangegeven, worden omgezet in olefinen voor chemische toepassingen.

In de synthesesegas-gebaseerde chemie kan methanol worden geproduceerd uit synthesesegas dat bestaat uit een variabel mengsel van waterstof, koolmonoxide en CO₂. Het produceren van methanol uit syngas in een synthesesereactor is een katalytisch proces (op basis van koper, zinkoxide en aluminiumoxide) dat plaatsvindt bij 200 tot 300 °C en een druk van 50 tot 100 bar. De reactiestappen zijn: $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ en $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$.

Zoals blijkt uit de reactiestappen kan methanol ook worden geproduceerd uit uitsluitend een mengsel van CO₂ en waterstof, dus zonder dat er koolmonoxide aanwezig is. Het is belangrijk om dit apart te benoemen omdat in dat geval de vergassingsstap voor de productie van synthesesegas (bijvoorbeeld uit biograndstoffen) niet nodig is en CO₂ samen met waterstof wordt gesynthetiseerd tot methanol ($\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$). Hierbij kan gebruik worden gemaakt van CO₂ die is afgevangen bij industriële processen, CO₂ uit rookgassen van bijvoorbeeld biomassacentrales of CO₂ uit Direct Air Capture (DAC). De technisch en commercieel bewezen technologieën die worden gebruikt om methanol te maken uit fossiele brandstoffen kunnen ook worden gebruikt voor de productie van methanol zoals hierboven beschreven en het is daarmee goed mogelijk om een duurzame methanolfabriek te bouwen van dezelfde omvang als een conventionele methanolfabriek van 1.000 tot 5.000 ton per dag.³³

Ten slotte is het ook mogelijk methanol te produceren via directe elektrochemische omzetting uit CO₂ en water zonder het gebruik van waterstof, maar die route valt onder hoofdroute 3 en wordt in de volgende paragraaf behandeld. Daar gaan we ook dieper in op de mogelijke rol van CO₂ als

³² Een voorbeeld hiervan is de technologie zoals ontwikkeld door [TorrGreen](#) waarmee gewasresten op locatie getorreficeerd kunnen worden om vervolgens vergast te kunnen worden tot biochar en syngas (zie [TorrGas](#)).

³³ IRENA en Methanol institute (2021) [Innovation Outlook: Renewable Methanol, International Renewable Energy](#)

koolstofbron in de verduurzaming van de chemie (CCU) en op het verschil van mening binnen het expertteam rond de toekomstige omvang van CCU en het tempo waarin dit zal zich zal ontwikkelen.

3.3 Hoofdroute 3: Nieuwe (bio)chemische omzettingen (opbouw)

In hoofdroute 3 staat de chemische en biochemische omzetting van biograndstoffen, afval en CO₂ centraal. Deze hoofdroute is op dit moment sterk in ontwikkeling en het is nog onzeker welke processen precies een rol gaan spelen op industriële schaal. In deze paragraaf gaan we nader in op omzettingsprocessen voor twee belangrijke grondstofgroepen en een innovatieve technologie.

Omzetting van biograndstoffen

Nieuwe chemie op basis van biograndstoffen heeft als voordeel dat deze in principe energie-efficiëntere routes naar kunststoffen zou kunnen opleveren op basis van alternatieve processen die functionaliteiten of molecuulstructuren in de grondstof beter benutten. Dit in tegenstelling tot de hierboven beschreven hoofdroutes 1 en 2, waarbij de biograndstoffen worden afgebroken tot kleinere moleculen die in bestaande chemie kunnen worden gebruikt. Dat is energetisch ongunstiger, want molecuulstructuren vanuit de grondstof die worden afgebroken moeten opnieuw opgebouwd worden.

Hoofdroute 3 is vooral interessant voor polyesters en polyamiden, omdat dit type polymeren een chemische structuur heeft met functionele groepen (esters of amiden) die aan het einde van hun levensduur door middel van chemische recycling makkelijker te splitsen zijn tot kleinere molecuulstructuren die weer opgebouwd kunnen worden tot nieuwe chemische producten. Naast broeikasgasemissiereductie dragen zij op deze manier ook bij aan een circulaire economie. Anderzijds hebben polyolefinen (zoals PE en PP) nauwelijks reactieve groepen omdat ze bijna uitsluitend uit koolstof- en waterstofatomen bestaan en een zeer homogene structuur hebben. Dat maakt het energetisch onaantrekkelijker om ze uit biograndstoffen te maken, omdat de zuurstof- en stikstofatomen eruit gehaald moeten worden om hieruit een polyolefine te produceren. Dat neemt niet weg dat bio-polyethyleen al op industriële schaal wordt geproduceerd uit bio-ethanol.

Er zijn op dit moment al veel verschillende (bio)chemische processen in ontwikkeling om deze biogebaseerde chemie vorm te geven, zoals binnen het Biobased Circular Groeifonds.³⁴ Er is daarbij een verschil in TRL te zien. Biopolymeren met een groot potentieel die door het Groeifonds worden gestimuleerd zijn onder andere:

- polymelkzuur (PLA) als vervanging van PET of polypropyleen;
- polyhydroxyalkanoaten (PHA) bijvoorbeeld bruikbaar voor composteerbare folies, bekertjes of zakken;
- polyethyleenfuranoaat (PEF) als vervanging van PET;
- biogebaseerde harsen en coatings.

³⁴ Nationaal Grondfonds [BioBased Circular \(BBC\) - de natuurlijke materialenkringloop | Overzicht lopende projecten](#)

In onderstaand kader staan enkele voorbeelden van partijen die nu al bezig zijn met de productie van dit soort innovatieve materialen.

Voorbeelden van innovatieve nieuwe chemie op basis van biograndstoffen

We zien dat er in Nederland veel onderzoek wordt gedaan naar innovatieve verwerking en toepassing van biograndstoffen. Enkele voorbeelden:

- Relement (Bergen op Zoom): productie van bio-MPA voor biobased coatings.
- Avantium (Delfzijl): productie van FCDA, een belangrijke bouwsteen voor PEF-verpakkingen, uit suikers.
- Braskem (wereldwijd): productie van bio-polyethyleen voor verpakkingen en bio MEG als precursor voor polyester.
- Roquette in samenwerking met DSM: productie van biobarnsteen zuur als bouwsteen voor polyester plastics.

Uitdagingen op het gebied van biograndstoffen op hoofdroute 3

- Over het algemeen zijn deze technologieën gericht op het gebruik van natuurlijk voorkomende chemische structuren, en kennen ze daarom relatief specifieke (niche)toepassingen, waardoor de volumestromen kleiner zijn vergeleken met fossiele alternatieven.
- Tegelijkertijd moeten deze nieuwe applicaties concurreren met bestaande applicaties (zoals bio-PET ten aanzien van PET). Dit is over het algemeen (nog) niet mogelijk zonder financiële ondersteuning, tenzij het bio-alternatief een betere functionaliteit heeft. Een voorbeeld hiervan is de zuurstofbarrière-eigenschap van PEF, waardoor dit aantrekkelijk is voor toepassing in voedselverpakkingen, omdat drank of voedsel hierdoor langer houdbaar is ten opzichte van voedselverpakking met PET.

Gebruik van CO₂ als grondstof (CCU)

Een belangrijke toepassing van CO₂ ligt in de productie van methanol, zoals beschreven in de vorige paragraaf. Maar het is ook mogelijk methanol te produceren via elektrochemische omzetting uit CO₂ en water. Hierbij wordt aan de elektrode methanol gevormd op basis van een waterige carbonaatoplossing. Bovendien biedt dit proces de mogelijkheid voor elektrische energieopslag want het kan ook de omgekeerde reactie faciliteren waarbij elektriciteit uit methanol wordt geproduceerd. De TRL is echter laag en de technologie heeft voorsnog een lage efficiëntie en kent technische barrières zoals degradatie van katalysatoren. Het is daarom de verwachting dat het productieproces kan worden geoptimaliseerd door de katalysatoren te verbeteren.

Daarnaast zijn er ontwikkelingen richting andere moleculen die zich eveneens nog op een laag TRL-niveau bevinden. Bijvoorbeeld:

- De productie van ethyleen door elektrochemische reductie van CO₂ en de productie van formiaat of oxalaat (die vele toepassingen kennen in de chemie en de industrie) uit elektrochemische omzetting van carbonaat.
- De foto-elektrochemische omzetting van CO₂ in synthesesgas door het combineren van licht- en elektrochemische stappen.³⁵
- Het gebruik van CO₂ voor de productie van polycarbonaten en andere polymeren en dit te combineren met de productie van andere chemicaliën. Voor dit gebruik is geen waterstof of reductiemiddel nodig. CO₂-copolymerisatie met epoxiden produceert bijvoorbeeld polycarbonaatpolyolen die worden gebruikt om isolatieschuim, coatings, afdichtingsmiddelen en elastomeren te maken.

³⁵ Bhattacharjee S et al., 2023, [Photoelectrochemical CO₂-to-fuel conversion with simultaneous plastic reforming](#). Nature Synthesis. 2. 182-192.

Vershil van mening ten aanzien van de rol van CCU

Alle beschreven hoofdroutes in dit rapport leiden tot impacts die niet alleen gaan over CO₂-emissiereductie en het verminderen van het gebruik van fossiele feedstocks, maar ook over energiegebruik, koolstofefficiëntie, de bredere milieu-impact (water- en luchtkwaliteit, stikstofuitstoot, biodiversiteit), ruimtegebruik, maatschappelijke kosten en baten, etc. In paragraaf 4.4 en bijlage C wordt hier dieper op ingegaan. Mede daarom zijn de leden van het expertteam het erover eens dat alle hoofdroutes een rol hebben in een toekomstige fossielvrije koolstofchemie en dus ook de daarbij behorende koolstofbronnen, te weten biograndstoffen, gerecycled plastic en, al dan niet biogene, CO₂ (zie figuur 2 en de uitgebreide uitleg in bijlage B). Daarin speelt ook mee dat de beschikbaarheid van land, water, duurzame biograndstoffen en duurzame elektriciteit onzeker is en verschillen per regio, waardoor er regionale voorkeuren voor routes zullen ontstaan.³⁶

CCU als *onderdeel* van hoofdroute 2 voor de productie van methanol is gebaseerd op bestaande technologie en de experts zijn het erover eens dat dit hoe dan ook een significante rol zal spelen in de koolstofchemie van de toekomst³⁷ (zie paragraaf 2.3 en 3.2).

Het expertteam is het echter niet eens over de mate waarin CO₂ als koolstofbron gebruikt zal worden en het tempo waarin nieuwe CCU-technologie zich kan ontwikkelen tot industriële schaal en in hoeverre dat wenselijk is. Kort gezegd denken Jacqueline Vaessen en Yvonne van der Meer dat de rol van CCU (zeer) groot zal zijn; Gert Jan Kramer, Arnold Stokking en Bart Strengers dichten CCU een (veel) kleinere rol toe, zeker op de termijn tot 2050.

De hoofdargumenten van de experts die een grote rol van CCU voor zich zien, laten zich als volgt samenvatten:

1. Dit rapport gaat over het terugbrengen van de klimaatimpact naar nul. Voor bijvoorbeeld de methanolproductie scoort de synthesesegas-route op basis van biograndstoffen (met eventuele toevoeging waterstof goed), maar de productie op basis van CO₂, hernieuwbare energie en groene waterstof gaat samen met vrijwel nul CO₂-emissies.^{38,39}
2. Met CCU benut je CO₂ en houd je de koolstof ook in de keten.⁴⁰ Volgens DECHEMA⁴¹ (2017) zal de chemische industrie zich ontwikkelen tot netto-importeur van CO₂ om aan de vraag naar CO₂ als grondstof te voldoen en wordt CCS als technologisch pad als contraproductief beschouwd. CCS, of BECCS als het biogene CO₂ betreft, is vooral nuttig in een overgangssituatie, ook al omdat de opslagcapaciteit eindig is. Als nu te veel wordt ingezet op (BE)CCS vertraagt dat de ontwikkeling van CCU-alternatieven die we sowieso nodig gaan hebben.
3. Ook in de literatuur zijn de meningen verdeeld over de snelheid van implementatie en de omvang van CCU. Zo zien Lopez, Keiner, et al (2023)⁴² een grote rol voor CO₂ als grondstof voor de methanolproductie. En in Harrandt (2023)⁴³ wordt een overzicht gegeven van 24 scenario's uit 15 studies die een grote spreiding laten zien van de mate waarin CO₂ als koolstofbron in een fossiel-vrije chemie in 2050 wordt gebruikt (van 0 tot 90%).

De belangrijkste argumenten van de experts die een beperktere rol van CCU voor zich zien, in elk geval op de termijn tot 2050, zijn:

1. CO₂ bevat geen bruikbare chemische energie, terwijl de producten uit de koolstofchemie juist veel energie bevatten. Hieruit volgt dat bij productie op basis van CO₂ (en waterstof), ongeacht de productieroute, de toevoer van veel energie nodig is, meestal in de vorm van elektriciteit. Bij grootschalige productie uit CCU gaat het dan al gauw om meer duurzame elektriciteit^{44, 45}, dan te verwezenlijken is, zeker als de CO₂ ook nog afkomstig is uit Direct Air Capture (DAC) en/of een hoog productievolume al vóór 2050 gerealiseerd zou moeten zijn. Daarom ligt het voor de hand om eerst gebruik te maken van koolstofbronnen die zelf al veel energie bevatten (met name biograndstoffen en gerecycled plastic) en pas als die niet meer toereikend zijn, CO₂ als koolstofbron daaraan toe te voegen.^{46,47} Inzet van schaarse elektriciteit voor CCU gaat immers ook ten koste van andere toepassingen zoals warmtepompen, elektrische boilers en elektrische auto's, die met dezelfde hoeveelheid elektriciteit veelal tot meer CO₂-emissiereductie leiden.
2. Zoals hiervoor ook aangegeven hebben de CCU-routes binnen hoofdroute 3 nog een (zeer) lage TRL en lijkt het onwaarschijnlijk dat deze in de komende decennia op significante schaal geïmplementeerd kunnen worden. Daar komt bij dat het ook vaker gaat om specifieke producten waarvan de vraag en dus het productievolume relatief laag zal zijn. Niettemin wordt het stimuleren van innovaties voor CCU-routes door het hele expertteam als belangrijk gezien.
3. Negatieve emissies (door opslag van biogene CO₂) zijn in elk geval tot 2050 noodzakelijk voor compensatie van restemissies en na 2050 om op netto negatieve emissies uit te komen. Uiteindelijk is de ruimte voor ondergrondse CO₂-opslag eindig en dus moet er verstandig mee worden omgegaan, maar zoals o.a. de rapporten van het IPCC⁴⁸ laten zien, zijn omvangrijke netto negatieve emissies in vrijwel alle scenario's noodzakelijk tot in elk geval het jaar 2100, en waarschijnlijk nog decennia daarna.

Plasmachemie

Naast toepassing in elektrolyse kan elektriciteit ook worden gebruikt om een plasma op te wekken. In plasma's kunnen zich chemische processen afspelen die uniek zijn ten opzichte van de andere toepassingen. Dit biedt perspectief op nieuwe chemie met gebruik van hernieuwbare energie. Het

³⁶ Gabrielli, Rosa, et al., 2023. [Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources](#).

³⁷ PBL, 2024. [Trajectverkenning klimaatneutraal 2050. Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050](#).

³⁸ Methanol Institute, 2022. [Carbon footprint of Methanol](#).

³⁹ TNO, 2023. [Green Maritime Methanol – A call to action](#).

⁴⁰ [CO₂ value Europe](#)

⁴¹ DECHEMA, 2017. [Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry](#), punt 6 op pagina 27.

⁴² Lopez, Keiner, et al., 2023. [From fossil to green chemicals: sustainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry](#).

⁴³ Harrandt et al., 2024. [Evaluation of Recent Reports on the Future of a Net-Zero Chemical Industry in 2050](#)

⁴⁴ DECHEMA, 2017. [Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry](#), het 'Maximum' scenario in de figuur op pagina 5.

⁴⁵ Royal Society, 2024. [Catalysing change: Defossilising the chemical industry](#), zie bijv. tabel 1 op pagina 44.

⁴⁶ PBL, 2024. [Trajectverkenning klimaatneutraal 2050. Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050](#).

⁴⁷ J.P. Lange, 2021. [Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals](#).

⁴⁸ IPCC, 2022. [Mitigation Pathways Compatible with Long-term Goals](#), hoofdstuk 3 van [AR6, WGIII](#).

doel is dat moleculen gecontroleerd worden omgezet tot reactieve fragmenten van atomen of moleculen, die vervolgens gecontroleerd worden gerecombineerd tot gewenste nieuwe moleculen. Enkele varianten brachten het wegens dit unieke karakter al tot TRL 9, bijvoorbeeld de synthese van waterstof of acetyleen. Ruim een halve eeuw geleden was plasma-synthese van waterstof uit aardgas al op TRL 9. De plasmatechnologie legde het af tegen goedkopere waterstof uit aardgas. De synthese van acetyleen met plasma uit methaan is nog steeds commercieel rendabel. Deze voorbeelden inspireren een herevaluatie van de waarde van plasmachemie voor de koolstofchemie van de toekomst.

Uitdagingen van plasmachemie

Deze processen zijn momenteel alleen economisch rendabel bij een lage elektriciteitsprijs. Barrières zijn de technische vormgeving van fysische plasmaconcepten, stabiele performance en het energierendement (in samenhang met procesintegratie op een site); dit varieert sterk per soort plasma. Verdere ontwikkeling vereist diepgaand begrip van plasma's, reactiekinetiek en technische vormgeving. Voorbeelden waaraan wordt gewerkt zijn de synthese van de basismoleculen ethyleen, blauwzuur, NO, en flash pyrolyse van feedstock tot syngas-moleculen.

Uitdagingen en ontwikkeling van het potentieel van nieuwe technologieën

De hierboven genoemde technologieën kunnen veelbelovend zijn. Het is echter voor bedrijven moeilijk om te concurreren met de lage kosten van fossiele grondstoffen, waardoor de economische haalbaarheid van nieuwe chemische processen lastig is als er geen andere voordelen zijn. Door onvoldoende opschaling is de efficiëntie nog laag en zijn toepassingen op de schaalgrootte van de petrochemie lastig te realiseren. Nieuwe chemische processen moeten worden opgeschaald vanuit nichetoepassingen naar grootschalige industriële productie. Er is behoefte aan zowel nieuwe faciliteiten als het benutten van bestaande infrastructuur om de overgang naar nieuwe chemie te ondersteunen.

Naast nieuwe technologieën, is er ook nog chemie die wél doorontwikkeld is tot op productieniveau of daar dichtbij, maar die tot nu toe nog niet commercieel interessant is. Twee varianten kunnen worden onderscheiden:

- Chemie die (veel) vroeger al bekend was, maar die het heeft afgelegd tegen een concurrerend proces dat goedkoper bleek.
- Chemie die nu in ontwikkeling verkeert of die nu of zeer recent nieuw in het commerciële landschap komt of is gekomen (TRL 8 of 9), maar die qua potentieel nog niet uitontwikkeld is.

Met veranderende marktomstandigheden zouden deze technologieën commercieel wel interessant kunnen worden. Een specifiek voorbeeld hiervan in plasmachemie.

Innovatiesamenwerking is van groot belang bij opschaling

Specifiek in hoofdroute 3 is een grote rol weggelegd voor startups, universiteiten en andere kennisinstellingen, al dan niet in samenwerkingen met industriële kennispartners die beschikken over opschalingskennis. Veelbelovende concepten (TRL > 3) vragen nog veel ontwikkeling om de route op commerciële schaal te krijgen. De rol van universiteiten, kennisinstellingen neemt af naarmate opschalingskennis een rol gaat spelen. Startups en scaleups zijn dan gebaat bij de kennis die vooral bij grote private entiteiten is te vinden. Gebrek aan deze expertise leidt gemakkelijk tot ontwikkelingsstagnatie.

Deze ontwikkelstagnatie geldt met name voor chemie die nog niet eerder is vertoond of wellicht op laboratorium-, of bench- of pilotschaal bekend is, maar waar opschaling niet of nog niet heeft plaatsgevonden. Het gaat hierbij expliciet niet om de financiële barrières van opschaling. Deze ontwikkelingen verkeren meestal op TRL 1 of 2 en worden onder andere door Nederlandse universiteiten en vroege startups aangeboden als resultaat van 'valorisatie'.



HOOFDSTUK 4

Succesvolle transitie vereist sturing

In dit hoofdstuk roept het expertteam op om sturing te geven aan de transitie richting een duurzame koolstofchemie. Dit hoofdstuk schetst de urgentie van sturing, duidt de legitimiteit van overheidsingrijpen en geeft aangrijpingspunten voor die sturing.

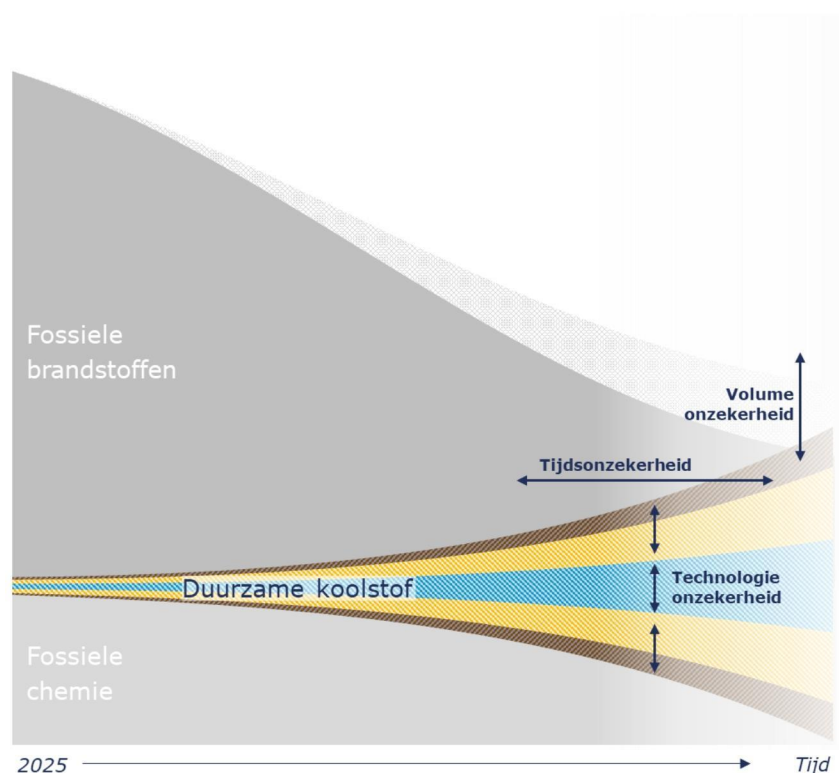
Het verloop van de transitie kent vele onzekerheden die vragen om keuzes. We zien op dit moment dat de transitie, die een verregaande systeemverandering vereist en maatschappelijke effecten teweegbrengt, niet snel genoeg op gang komt vanuit de markt. Dit vraagt om sturing vanuit de overheid. Sturing kan worden gegeven op drie aangrijpingspunten: in de markt, op het gebied van grondstoffen, en bij de ontwikkeling van technologie.

4.1 Het verloop van de transitie is nog niet uitgekristalliseerd

De transitie naar een duurzame koolstofchemie wordt gekenmerkt door diverse onzekerheden die de snelheid en richting ervan beïnvloeden. Samen bepalen deze factoren de voortgang van de transitie en verdeling van volumes over de hoofdroutes.

Figuur 3 geeft een visualisatie van het verloop van de volumeontwikkeling en de technologische invulling van de transitie. Deze figuur toont drie onzekerheden waarmee de sector en beleidsmakers in de transitie naar een duurzame koolstofchemie geconfronteerd zullen worden:

- Een belangrijke onzekerheid is de volumeontwikkeling in Nederland. Hoewel er een duidelijke verwachting bestaat dat de brandstofproductie zal afnemen als gevolg van het wegvallen van de vraag naar wegtransportbrandstoffen in Europa en elders in de wereld, is het onduidelijk hoe de productievolumes van de chemie in Nederland zich zullen ontwikkelen. Daarnaast is het onduidelijk hoe snel en in welke mate de alternatieve grondstoffen en de technologieën in de drie hoofdroutes op basis van duurzame koolstofbronnen de huidige vraag naar fossiele koolstof kunnen vervangen.
- Daarnaast speelt de voortgang van technologische ontwikkelingen een rol, zowel op het gebied van nieuwe productieprocessen als in de diversiteit van productgroepen die met duurzame koolstof kunnen worden vervaardigd.
- Ten slotte ligt de tijdshorizon op verschillende elementen nu nog niet vast, en dit hoeft ook niet. De snelheid waarmee de diverse technologieën zoals pyrolyse, bionafta-productie, toepassing van CCU en nieuwe chemieroutes economisch en technisch schaalbaar worden, is slecht voorspelbaar. Ook de termijn waarop grondstoffen voldoende beschikbaar en betaalbaar zijn, is momenteel onduidelijk.



Figuur 3. Een schets van het verloop van de volumeontwikkeling van de Nederlandse koolstofchemie gedurende de overgang van de productie van fossiele brandstoffen en chemie naar een productiesysteem op basis van duurzame koolstof. Hier zijn drie onzekerheden: volume onzekerheid, technologieonzekerheid en tijdsonzekerheid.

4.2 Legitimiteit en urgentie van overheidsingrijpen

De transitie naar een duurzame koolstofchemie is een zeer complexe transitie die vraagt om sturing. Het risico op onaanvaardbaar grote schade aan het functioneren en verdienvermogen van de maatschappij legitimeert overheidsingrijpen. In deze paragraaf worden de drie belangrijkste redenen voor overheidsingrijpen nader uiteengezet.

De transitie komt niet op gang vanuit de markt

Het expertteam constateert dat de transitie op dit moment niet snel genoeg op gang komt vanuit de markt. De verwachting is dat het economische systeem, nationaal en in internationale context, deze complexe transitie richting een duurzame koolstofchemie niet uit zichzelf zal faciliteren. De chemie, en daarmee de bedrijven die daarin actief zijn, is een private sector waar investeringsbeslissingen en de inzet op de ontwikkeling van technologieën primair worden genomen op basis van businesscases en winstgevendheid; vanuit dat perspectief spelen er op dit moment verschillende belemmeringen.

Marktfalen belemmert de ontwikkeling van duurzame alternatieven

Er is op dit moment sprake van marktfalen. Dat betekent dat de markt niet in evenwicht is en er geen eerlijke concurrentie optreedt, waardoor duurzame alternatieven geen vanzelfsprekende plek in de markt hebben, terwijl dat vanuit maatschappelijk oogpunt wel wenselijk is. In het kader van de klimaattransitie is er sprake van marktfalen omdat er in de beprijzing van fossiele grondstoffen onvoldoende rekening wordt gehouden met maatschappelijke kosten als gevolg van schade door klimaatverandering en luchtvervuiling. Van duurzame alternatieve grondstoffen is de klimaatimpact over het algemeen lager, maar deze hebben een hogere kostprijs (zoals toegelicht in paragraaf 2.4). Omdat de maatschappelijke kosten niet zijn doorgerekend in de kostprijs van fossiele grondstoffen, zijn de duurzame alternatieve grondstoffen niet concurrerend. De overheid kan optreden als marktmeester om dit evenwicht te herstellen door bijvoorbeeld maatregelen in te stellen die een prijs verbinden aan milieuschade.

Nederlandse industrie heeft last van een ongelijk speelveld

Op dit moment kampt de Europese industrie met een ongelijk internationaal speelveld. Deze ongelijkheden bemoeilijken de hogere kosteninvesteringen in noodzakelijke verduurzaming. In Europa wordt het ongelijke speelveld voornamelijk veroorzaakt door verschillen in energiekosten. In Nederland speelt dit in sterke mate, hier zijn de elektriciteitskosten vanwege onder andere hoge nettarieven voor industriële grootverbruikers aanzienlijk hoger dan in Duitsland, Frankrijk en België. Op mondiale schaal is er ook sprake van een ongelijk speelveld, zo worden goedkope, fossiele plastics uit China aangeboden op dezelfde markt.

Het ongelijke speelveld bedreigt de concurrentiepositie en continuïteit van de Nederlandse industrie: goedkoper investeren, zelfs direct over de grens, kan interessanter zijn. Dit brengt het risico op vroegtijdige afbouw (oftewel vertrek) met zich mee.

Langetermijninvesteringen vragen om richting en toekomstperspectief

Ondanks de onzekerheden zoals geschetst in 4.1 moet de industrie nu, anno 2025, investeringsbeslissingen nemen om de (inter)nationale klimaatdoelstellingen te halen, door bijvoorbeeld te voldoen aan de volledige afbouw van emissierechten in 2040, vanuit de ETS-regels voor de industrie. De (om)bouw van installaties en fabrieken die nodig zijn voor de transitie betreft meerjarige projecten en hoge investeringen. De tijd die dat kost zit enerzijds in interne projectontwikkeling bij de bedrijven, zoals uitgebreid voorbereidend onderzoek, processen rondom financierings-beslissingen, en termijnen voor complexe bouwwerkzaamheden. Anderzijds wordt deze ontwikkeltermijn ook bepaald door externe factoren vanuit de overheid zoals subsidie- en vergunningstrajecten.

Om bedrijven te helpen om nu belangrijke investeringsbeslissingen te nemen, is er nu behoefte aan duidelijkheid over hun toekomstperspectief. Hiervoor is stimulerend, betrouwbaar en stabiel beleid nodig. Toekomstperspectief betekent voor een bedrijf dat er zicht is op een businesscase, dat er een afzetmarkt is, dat de concurrentiepositie goed is, dat grondstoffen voorhanden zijn, dat de benodigde technologieën ontwikkeld zijn en dat er voldoende duurzame energie beschikbaar is, inclusief goede infrastructuur voor grondstoffen en energie.

De behoefte aan toekomstperspectief geldt overigens niet alleen voor commerciële bedrijven, maar is ook aan de orde voor andere stakeholders met voor de transitie relevante langetermijninvesteringen.

De transitie behelst een verregaande systeemverandering waarop regie gewenst is

Voor de transitie naar een duurzame koolstofchemie zijn verregaande structurele veranderingen noodzakelijk in de maatschappij. Niet alleen als het gaat om nieuwe infrastructuur, maar ook om de ontwikkeling van geheel nieuwe waardeketens, nieuwe producten, nieuwe installaties, nieuwe competenties, nieuwe samenwerkingsverbanden, etc. Deze grootschalige veranderingen vragen om regie en coördinatie. Bovendien vindt de transitie plaats in een bestaande technologische, economische en beleidscontext.

Vanwege de breedte van het stakeholderveld en de noodzaak tot nieuwe samenwerkingsrelaties zal de overheid een (grotere) rol moeten hebben in het op gang brengen en houden van de om- en opbouw van nieuwe chemie. Dit moet bovendien sneller gaan dan het tempo van afbouw, om eventuele volumediscrepancies op te vangen.

Voorkomen van vroegtijdige afbouw

In de transitie zullen afbouw van fossiele capaciteit en om- en opbouw van alternatieven naast elkaar bestaan. Met het oog op het behoud van het productievolume is het wenselijk dat de oude koolstofchemie niet te snel wordt afgebroken/vertrekt voordat de nieuwe is opgebouwd. De gevolgen van (vroegtijdige) afbouw van fossiele capaciteit zijn beschreven in paragraaf 1.4. Het is daarom van belang om, naast het stimuleren van om- en opbouw, een gecontroleerde afbouw na te streven. Bedrijven zullen echter hoofdzakelijk redeneren vanuit winstgevendheid. Hierdoor vindt afbouw plaats wanneer het gebruik van de installatie niet meer winstgevend blijkt te zijn, bijvoorbeeld door buitenlandse concurrentie, een afnemende vraag naar producten, of hogere operationele kosten. Dit proces kan worden beïnvloed door beleidsmaatregelen.

Voorbeeld: nafta

Rondom de productie van nafta zijn er twee trends te zien, waaruit blijkt dat gecontroleerde op-, om- en afbouw nodig gaat zijn:

1. De dalende vraag naar fossiele brandstoffen door elektrificatie, waterstof en biobrandstoffen zal een grote impact hebben op de olieraffinage. Raffinaderijen kunnen financieel gezien niet blijven draaien om alleen nafta te leveren voor de chemische industrie, wat sluiting van capaciteit onvermijdelijk maakt.
2. De verwachting is dat vanuit olierijke staten Crude-Oil-to-Chemicals (COTC) grootschalig zal worden bedreven dat verder concurrentienadeel in Nederland teweeg zal brengen.

De productie van nafta in Europa zal afnemen en het volume gat voor basischemicaliën zal naar verwachting buiten Europa opgepakt worden. Om dit op te vangen zal er snel ingezet moeten worden op alternatieve duurzame routes zoals pyrolyse, bionafta en andere biobased routes, in combinatie met de bijbehorende beleidsinstrumentarium voor vraagcreatie en marktbescherming, zodat deze duurzame routes het niet afleggen tegen de COTC.

De overheid dient de maatschappelijke effecten van transitie te bewaken

Zoals beschreven voorzien we in de verduurzaming van de koolstofchemie een systeemtransitie met verregaande gevolgen. De chemie neemt als private sector beslissingen omtrent investeringen en technologieontwikkelingen op basis van businesscases en winstgevendheid. De markt heeft over het algemeen minder oog voor de maatschappelijke gevolgen van de transitie.

Voorkomen van transitiefalen

De transitie naar een duurzame koolstofchemie is ingegeven vanuit zorgen om klimaatverandering en bijbehorende klimaatdoelstellingen. De klimaatproblematiek is urgent en gaat gepaard met toenemende maatschappelijke schade en herstelkosten. De schade aan de maatschappij ten gevolge van de opwarming van de aarde wordt steeds zichtbaarder en is van grote omvang.⁴⁹ Nederland is bovendien zeer kwetsbaar voor de gevolgen van klimaatverandering.^{50,51}

Langdurig marktfalen brengt het risico op transitiefalen met zich mee. Er is sprake van transitiefalen als de overheid niets doet of door middel van ingrijpen op marktfalen er niet in slaagt om een economisch bestel te bereiken dat een gewenst nieuw welvaartsniveau bewerkstelligt, wat in dit geval betekent geen broeikasgasemissies en geen gebruik van fossiele grondstoffen.⁵² Anders dan bij marktfalen zal de overheid in deze transitie een consistente, sturende, op maatschappelijke coherentie gerichte rol moeten spelen, vanuit een consistente langetermijnfocus. Dit gaat veel verder dan alleen een marktmeesterrol die bij marktfalen van toepassing is.

Oog voor maatschappelijke effecten

Het Rijk heeft de rol om te sturen op maatschappelijk wenselijke uitkomsten. Dat betekent dat er een goed begrip moet zijn van de impact en effecten op verschillende maatschappelijke thema's, zoals ruimtegebruik, inzet van publieke middelen en de verdeling van de impact hiervan op verschillende groepen of lokale milieu-impact. Door mogelijke negatieve effecten te identificeren kunnen deze expliciet worden meegenomen in de afwegingen en kan er worden gehandeld om deze effecten zoveel mogelijk te voorkomen of te beperken. Hierbij moet aandacht zijn voor de verschillende groepen en wijzen waarop deze negatieve effecten zich kunnen voordoen. In de bijlage C worden meerdere indicatoren geïntroduceerd waarlangs verschillende typen afwegingen in de context van de koolstofchemietransitie kunnen worden bepaald.

4.3 Drie aangrijpingspunten bij het vormgeven van beleid

Er kunnen drie aangrijpingspunten worden onderscheiden voor sturing vanuit de overheid om ervoor kunnen zorgen dat de markt voor een duurzame koolstofchemie op gang gaat komen. Een integraal beleidspakket dient zo opgesteld worden, dat bedrijven in Nederland (naar) duurzame activiteiten *willen* en *kunnen* op- en ombouwen. Hiervoor zal een beleidspakket zich in elk geval moeten richten op de drie volgende aspecten:

1. Marktkansen en -bescherming: de vraag naar duurzame producten stimuleren en de concurrentiepositie beschermen.
2. De input: beschikbaarheid van niet-fossiele grondstoffen en duurzame energie.
3. De realisatie: de ontwikkeling van technologieën en de bouw van productiefaciliteiten en installaties.

⁴⁹ IPCC, 2023 – [Sixth Assessment Report](#).

⁵⁰ PBL, 2024 – [Klimaatrisico's in Nederland](#).

⁵¹ KNMI, 2023 – [Klimaatscenario's voor Nederland](#).

⁵² Bolhuis, W. D. (2024). [Beleidsconomen moeten weten wat transitiefalen is](#). *Economisch Statistische Berichten*, 109 (4831), 136-139.

Het belang van een geharmoniseerde, EU-brede aanpak voor een *'level playing field'*

Voor alle drie de aangrijpingspunten geldt bovenal dat een geharmoniseerde aanpak binnen de Europese Unie van groot belang is. Vanwege de schaal en het internationale karakter van de chemische industrie is dit zelfs *een voorwaarde* voor een succesvolle transitie. Daarbij is afstemming van beleid belangrijk: nationale ingrepen leiden immers tot internationale concurrentieverschillen en de effecten daarvan zijn complex.

Er is bijvoorbeeld op dit moment op zowel Europees als Nederlands niveau een pakket aan regelgeving voor hernieuwbare koolstof aangekondigd, waarbij de Nederlandse maatregelen eerder van kracht zouden gaan. Nederland loopt voorop met wetgeving, met als gevolg risico's voor het vestigingsklimaat.⁵³ Howel he volledig voorkomen van beleidsverschillen tussen landen niet te vermijden is, door onder andere de nationale doorvertaling van Europese richtlijnen, is afstemming zeer gewenst.

Een joint statement van vier EU lidstaten voor een EU breed beleidspakket rondom stimulering van duurzame koolstof ⁵⁴

Op 16 april 2024 hebben een viertal lidstaten van de EU – Nederland, Frankrijk, Ierland en Tsjechië – het Joint Statement on a European Sustainable Carbon Policy Package for the Chemical Industry aangeboden aan de Europese Commissie. Het statement roept de Commissie op om het gebruik van duurzame koolstof in de chemische sector effectief te stimuleren om zo een klimaatneutrale en circulaire economie te realiseren. Het statement roept op om een beleidspakket te introduceren dat focust op marktcreatie, grondstoffenbeschikbaarheid en het waarborgen van de concurrentiepositie van de Europese chemische industrie. Het initiatief voor dit Joint Statement lag in Nederland bij de ministeries van IenW en EZK. De ministeries blijven in gesprek met de Europese Commissie over het belang van Europees beleid voor duurzame koolstof, bijvoorbeeld in het kader van de verwachte Clean Industrial Deal.

Sturen op marktkansen en marktbescherming

Voor bedrijven is het van groot belang dat er vraag is naar hun product en dat zij op de afzetmarkt te maken hebben met eerlijke concurrentie.

Vraagcreatie

Alleen met voldoende afzetmarkt zullen bedrijven kunnen overleven. Het ontbreken van afnemers geeft voor bedrijven een te hoog risico om in de markt te stappen en een investeringsbeslissing te nemen. Rond het thema vraagcreatie zijn de volgende overwegingen relevant:^{55,56}

- Het stimuleren van de vraag naar circulaire grondstoffen door bijvoorbeeld bijmengverplichtingen of circulaire productvereisten.
- Het stimuleren van circulaire aanbesteding door overheden die daarmee ook een voorbeeldrol spelen.
- Het evenredig stimuleren van het gebruik van biograndstoffen in de chemie én biobrandstoffen in een grotere maatschappelijke context, zodat de chemie niet benadeeld wordt door een snel toenemende vraag naar biobrandstoffen.

⁵³ CE Delft, 2024 – [Balanced policy support for biobased and recycled plastics](#).

⁵⁴ Rijksoverheid, 2024 [Joint Statement on a European Sustainable Carbon Policy Package | Publication | Government.nl](#).

⁵⁵ CE Delft, 2024 – [Balanced policy support for biobased and recycled plastics](#).

⁵⁶ [Call for Demand Creation to Drive Industry Investments](#) (brief aan de Europese Commissie vanuit 90 verschillende (branche)organisaties).

- Bij hernieuwbare grondstoffen geen onderscheid maken tussen het stimuleren van recycalaat versus biograndstoffen.

Ook de consument speelt hier een belangrijke rol. Wat is een consument bereid te betalen voor een product en waar kan de consument uit kiezen? Ook dit kan door ingrijpen van de Nederlandse overheid worden beïnvloed, bijvoorbeeld door een vervuilend product duurder te maken ten opzichte van het duurzame alternatief, door belastingen op aanwezige grondstoffen in producten, subsidies op duurzame alternatieven, en een doeltreffende informatievoorziening aan consumenten.

Marktbescherming en level playing field

Bedrijven zullen onderling moeten concurreren, en in de transitieperiode bovendien moeten concurreren met fossiele routes. Ook wordt het (on)gelijke speelveld internationaal beïnvloed. Niet overal in de wereld wordt, zoals in Europa en in Nederland, een actief prijsmechanisme ingezet voor fossiele CO₂ emissies. In Europa en Nederland gebeurt dat met respectievelijk het hiervoor genoemde Europese ETS voor de industrie en de nationale CO₂-heffing. Hierdoor, maar ook door andere factoren, wordt de Europese markt overspoeld door goedkoop plastic uit de VS en Azië, waardoor plasticproducenten en recyclingbedrijven in Nederland en de EU geen gelijke concurrentiepositie hebben.

Een voorbeeld van een mogelijkheid tot marktbescherming voor een duurzame koolstofchemie betreft de mogelijke uitbreiding van het Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) naar organische chemicaliën, (virgin) plastics, waterstof en ammoniak. Hierdoor wordt de eerlijke concurrentiepositie voor de Europese markt bevorderd, waardoor de verplaatsing van productie naar elders minder aantrekkelijk wordt. Deze uitbreiding wordt opnieuw beoordeeld tijdens de CBAM-herziening in 2025.

Sturen op de input

Om een transitie van de koolstofchemie van de grond te laten komen, is het belangrijk dat duurzame energie en duurzame grondstoffen beschikbaar én betaalbaar zijn.

Beschikbaarheid van duurzame grondstoffen

De beschikbaarheid van grondstoffen is belangrijk om ervoor te zorgen dat marktpartijen kunnen opschalen. De markt voor hernieuwbare grondstoffen zal zich de komende decennia kenmerken door schaarste en dat brengt uitdagingen met zich mee, zoals beschreven in paragraaf 2.3. Beleid omtrent de verdeling van duurzame koolstofbronnen en duurzame energie is daarom gewenst.

Enkele overwegingen rondom beleid ter bevordering van de beschikbaarheid en betaalbaarheid van grondstoffen en energie voor de transitie naar een duurzame koolstofchemie:

- Stimuleren van internationale handel in recycalaat en biograndstoffen om beschikbaarheid te vergroten.
- Bevorderen van de ontwikkeling van Nederlandse, nationale bronnen.
- Materialen die voorheen slechts als afval beschouwd werden niet meer beschouwen als afval, maar behandelen als grondstof. Bijvoorbeeld door knellende wetgeving (zoals de einde-afvalstatus) te vervangen door wetgeving die meer recht doet aan deze ontwikkeling

Beschikbaarheid van duurzame energie

Naast de beschikbaarheid van grondstoffen bestaat er in een duurzame koolstofchemie ook een grote behoefte aan duurzame energie voor bijvoorbeeld de elektrificatie van industriële processen of nieuwe chemie op basis van elektrochemische processen of elektrische energie.

Concurrentie op de inzet van duurzame grondstoffen

Er is sprake van vraag vanuit diverse andere sectoren en toepassingen naar dezelfde duurzame grondstoffen.

- Inzet van biograndstoffen voor brandstoffen is inmiddels al verregaand in ontwikkeling, met bijvoorbeeld de E10-benzine. Dergelijke bijmengverplichtingen werken prijsopdrijvend voor bedrijven die dezelfde biograndstoffen voor materialen in willen zetten en moeten concurreren met fossiele stromen.
- Afvalstoffen worden veelal verbrand in AVI's, wat warmte oplevert aan de gebouwde omgeving.
- De bouw vertoont enige overlap in de vraag naar bepaalde biomassa'stromen, maar zorgt ook voor synergie. De bouw doet namelijk vooral een beroep op de hoogwaardige stromen (zaaghout en plaatmateriaal). Meer houtbouw betekent meer productie(plantages) en dus ook meer bijkomende stromen die als feedstock ingezet kunnen worden in de chemische industrie.

De transitie naar een duurzame koolstofchemie gaat hand in hand met de energietransitie: dit bewustzijn is essentieel. Enkele overwegingen rondom de beschikbaarheid van energie zijn:

- De huidige problematiek rondom de beschikbaarheid van hernieuwbare energie; zoals het tempo van opschaling van opwek en de benodigde infrastructuur, waarbij netcongestie één van de meest actuele uitdagingen vormt.
- De beschikbaarheid van voldoende betaalbare (duurzame) energie, hoge nettarieven werken ten nadelen van de business case.
- De concurrentie op beschikbare, betaalbare duurzame energie. Vele andere toepassingen beogen ook gebruik te maken van elektriciteit, de toekenning van elektriciteit aan chemische clusters is daarom niet vanzelfsprekend.

Sturing op realisatie

Om de transitie van de grond te laten komen moeten producten daadwerkelijk gemaakt worden. De sturing op de realisatie van een hoofdroute vindt enerzijds plaats bij de technologieontwikkeling en anderzijds bij de bouw van nieuwe installaties en fabrieken.

Technologieontwikkeling

De uitdaging voor de nieuwe chemie ligt in het commercieel bewijzen van nieuwe processen die voor de chemie ook op grote schaal beschikbaar moeten zijn. In Nederland is kennis aanwezig vanuit de universiteiten, van bijvoorbeeld Utrecht, Twente, Delft, Eindhoven, Amsterdam, WUR en Maastricht die bijdragen aan het ontwikkelen van nieuwe technologieën. Ook zien we meerdere startups en scale-ups ontstaan die op kleine schaal bewezen duurzame processen naar rendabele volumes pogen op te schalen. In Nederland is de Nationale Technologiestrategie⁵⁷ opgesteld die bouwstenen levert voor strategisch technologiebeleid. Deze strategie is in lijn met de uitdaging voor de nieuwe chemie en het commercieel bewijzen van nieuwe processen.

Hoewel technologieontwikkeling in Nederland plaatsvindt, zal innovatieve technologie in grote mate ook ontwikkeld worden in de internationale context. Hier is geen sturing op vanuit Nederland, maar

⁵⁷ EZK - [De Nationale Technologiestrategie](#).

dit is wel van belang voor de transitie. Op de hoogte zijn van de ontwikkelingen die er buiten Nederland opkomen kan bijdragen aan de ontwikkelingen van technologieën binnen Nederland.

Opschaling faciliteren

Het toepassen van duurzame koolstof vraagt in veel gevallen nog om ontwikkelingen van technologieën en het bewijzen van opschalingsmogelijkheden. Daarnaast vraagt opschaling ook om nieuwe installaties en fabrieken die alleen via de juiste procedures en onder de gepaste voorwaarden gebouwd kunnen worden. Opschaling van nieuwe technologie kenmerkt zich door onrendabele periodes alvorens winstgevend te worden. Hier moet een financieel instrumentarium voor beschikbaar komen zoals voor *First of a Kind* (FOAK) demonstratie-fabrieken.

First of a Kind

Nieuwe, duurzame technologie zou idealiter vanuit de markt moeten opkomen, maar startups en scale-ups hebben ondersteuning nodig. Het is gebleken dat veel van de jonge initiatieven grote moeite hebben om de 'First of a Kind'-fase gefinancierd te krijgen waar bedragen tussen de 20 en 50 miljoen euro benodigd zijn. Het gaat hier bijvoorbeeld om het opschalen van vergassingsfabrieken (hoofdroute 2) en pyrolysemogelijkheden (hoofdroute 1), maar zeker ook om nieuwe chemie (hoofdroute 3).

Het beschikbaar maken van 'geduldig' kapitaal met een goede toegankelijkheid voor ondernemers is belangrijk. Het huidige overheidsinstrumentarium richt zich veelal op vroegere financieringsfasen, met instrumenten vanuit NWO en RVO. In een latere fase zijn commerciële financieringen beschikbaar. De 'valley of death' is met name lastig bij demonstratiefabrieken die juist voor het bewijzen van opschalingspotentieel essentieel zijn.

4.4 Een indicatorenkader als handvat om de maatschappelijke effecten in kaart te brengen

Het expertteam roept de overheid op tot sturing; enerzijds op drie aangrijpingspunten in de markt, zoals beschreven in 4.3. Anderzijds ligt er ook een belangrijke verantwoordelijkheid in het borgen van de integrale maatschappelijke belangen ook in afstemming met andere belangrijke thema's.

Beperkte maakbaarheid tegenover een grote verantwoordelijkheid van de overheid

De effecten van deze complexe transitie naar een duurzame koolstofchemie op de maatschappij zijn op dit moment nog niet volledig inzichtelijk. Het expertteam verwacht dat we in Nederland tot een duurzaam koolstofsysteem gaan komen waar we alle hoofdroutes in meer of mindere mate nodig hebben. Er wordt van de overheid dus ook geen afweging tussen hoofdroutes gevraagd. De markt zal, vanuit haar rol, de ontwikkelingen binnen de verschillende routes moeten gaan oppakken en verder uitkristalliseren; dit kan de overheid niet. Een realistisch beeld over de maakbaarheid van een duurzame koolstofchemie in Nederland en de verschillende rollen voor de overheid en de markt draagt bij aan het begrip over de sturingsmogelijkheden. Hierbij stuurt de overheid nadrukkelijk niet op een bepaalde technologie, maar wel op doelstellingen zoals beschikbaarheid van duurzame grondstoffen.

We zien dat er meerdere technologieën ontwikkeld worden voor het verkrijgen van alternatieve grondstoffen en het verwerken van deze grondstoffen naar basischemicaliën. Kennisinstituten, zoals universiteiten, dragen hier voor een groot deel aan bij, soms ook met financiële ondersteuning van het Rijk. Welke technologieën uiteindelijk op commerciële schaal beschikbaar worden, is voor een groot deel afhankelijk en ook de verantwoordelijkheid van de markt. Daarnaast heeft de overheid in het vroege stadium van ontwikkeling van nature een aanjagende rol.

Spanning op belangen

In 4.2 is uiteengezet dat de legitimiteit van overheidsingrijpen volgt uit de verantwoordelijkheid van de overheid voor maatschappelijke effecten van de klimaat- en koolstoftransitie. Daartoe is het van belang om de impact en de gevolgen van de transitie integraal en vanuit meerdere perspectieven te beschouwen. Door mogelijke positieve en negatieve impact te identificeren, kunnen deze bewust worden meegenomen in afwegingen en kan er, aan de voorkant, worden gehandeld om negatieve effecten zoveel mogelijk te voorkomen of te beperken en lasten en baten – zo veel mogelijk – rechtvaardig te verdelen.

De transitie naar een duurzame koolstofchemie houdt nauw verband met andere belangrijke maatschappelijke thema's, zoals de energietransitie en schaarse fysieke- en milieuruimte. Deze thema's staan allemaal ook in relatie tot elkaar. Hoewel belangenrelaties tussen verschillende thema's elkaar kunnen versterken, zullen er per definitie ook spanningen bestaan vanuit belangen op deze thema's. In de transitie naar een duurzame koolstofchemie zal gezocht moeten worden naar de juiste balans en/of compromis waarbij niet voor alle thema's de optimale uitkomst mogelijk zal zijn, hierbij zijn politieke keuzes leidend.

Indicatoren om maatschappelijke impact en gevolgen te doorgronden

Het expertteam vraagt om sturing van de overheid in de transitie naar een duurzame koolstofchemie. Tegelijkertijd benoemt zij de spanning die er vanuit belangen van verschillende belangrijke maatschappelijke thema's bestaat. Deze spanning vraagt om politieke keuzes. Om politieke keuzes goed te onderbouwen acht het expertteam het van groot belang om de impact en de gevolgen van de ontwikkelingen en interventies in de transitie integraal te beoordelen. Daarom doet het expertteam een suggestie voor een indicatorenkader. Het indicatorenkader biedt een aanzet tot een manier van denken die handvatten biedt om impact en gevolgen te analyseren, te begrijpen en er naar te kunnen handelen.

Het indicatorenkader bestaat uit verschillende indicatoren en is te vinden in Bijlage C. Met een indicator bedoelen we in deze context een thema waarop beschouwing en/of beoordeling van gevolgen en impact relevant is voor een integrale benadering. De beschouwing en/of beoordeling van een indicator volgt uit een reeks overwegingen vanuit verschillende perspectieven op dit thema. Met behulp van verschillende indicatoren kunnen effecten integraal in beeld worden gebracht en komen de (negatieve of positieve) impact en gevolgen van een bepaalde keuze naar boven, wat helpt bij het onderbouwen van politiek-maatschappelijke keuzes. Enkele overwegingen bij dit indicatorenkader:

- De indicatoren zijn bedoeld als hulpmiddel om de effecten en gevolgen in kaart te brengen van keuzes en helpt daarmee de overwegingen bij keuzes te onderbouwen, maar zorgt er ook voor dat negatieve maatschappelijke effecten zo veel mogelijk in beeld worden gebracht. Het indicatorenkader biedt dus houvast bij het maken van keuzes voor individuele opties. Het is nadrukkelijk geen afwegingskader tussen hoofdroutes.
- Voor zover indicatoren kunnen worden gekwantificeerd, en dat geldt niet voor alle hieronder genoemde indicatoren, kan het nuttig zijn om een bandbreedte te definiëren van welke waarden acceptabel of wenselijk worden geacht. Wat acceptabel of wenselijk is, is voor een groot deel aan de politiek. Het voorgestelde indicatorenkader wordt door de experts bewust niet gekoppeld aan een vaste weging of prioritering van de indicatoren.
- Duiding van de hoofdroutes op verschillende indicatoren vereist, zoals gepresenteerd in Bijlage C, nadrukkelijk nader diepgaand onderzoek. Een eerste duiding van kenmerken van de drie hoofdroutes op de drie indicatoren komt terug in Hoofdstuk 2 en Hoofdstuk 3.

Synthese

Het expertteam roept de overheid op om de toekomst van de koolstofchemie in eigen hand te nemen en nu sturing te geven aan de verduurzaming van de koolstofchemie, om deze aan te jagen, te versnellen en te zorgen dat transitiefalen wordt voorkomen. Dat betekent het creëren van de juiste randvoorwaarden voor ombouw van bestaande chemie, opbouw en opschaling van innovatieve technologie de nieuwe chemie en gecontroleerde afbouw. Hiervoor is nauwe samenwerking met de Europese Unie essentieel.

De basis van dit advies ligt in het blijvende belang van de koolstofchemie voor Nederland. Enerzijds vanuit het potentieel van verdienvermogen in deze sector, anderzijds vanuit het belang van de aanwezigheid van chemische processen voor de circulaire economie. We hebben de koolstofchemie nodig om klimaat- en circulariteitsdoelstellingen te behalen zonder grootschalig welvaartsverlies. Ongecontroleerde afbouw van huidige koolstofchemische bedrijvigheid, zonder ombouw en opbouw van nieuwe activiteiten is wat betreft het expertteam onwenselijk.

De Nederlandse koolstofchemie heeft een geschikte uitgangspositie voor een succesvolle transitie. Als onderdeel van ARRRA cluster is de nauwe samenwerking met gelijkgezinde overheden reeds aanwezig. Bovendien is de infrastructuur, zoals buisleidingen en havens in het cluster voorhanden. Er ligt een waardevol potentieel voor CCS en windenergie op de Noordzee die beide hard nodig zullen zijn tijdens de transitie en daarna. Ook de benodigde grondstoffen zijn in theorie aanwezig of beschikbaar voor onze regio. De hoge bevolkingsdichtheid in Noordwest Europa zorgt voor voldoende afval als grondstof en een goed ontwikkelde land- en bosbouw sector in Europa bieden een groot volume potentieel. Met de sterk ontwikkelde kennis en kunde over grondstoffen en de (innovatie)keten kan volop op deze transitie worden ingezet.

Er zijn door het expertteam drie hoofdroutes in een duurzame koolstofchemie geïdentificeerd, welke alle drie ontwikkeld moeten worden en alle drie op een manier onderdeel van het eindbeeld zullen zijn. Het expertteam verwacht dat voor alle belangrijke stakeholders perspectief wordt geboden met deze drie hoofdroutes. Zowel aan de gevestigde bedrijven die processen moeten aanpassen op basis van duurzame grondstoffen, als aan nieuwkomers die nieuwe technologie willen opbouwen en opschalen en zich inzetten om onderdeel te worden van het toekomstig systeem. Hoewel de onderlinge volumeverdeling tussen de routes over de tijd zal fluctueren en in het eindbeeld nog onduidelijk is, zijn alle drie de hoofdroutes reëel en relevant voor een duurzame koolstofchemie. Het gaat dus niet om een transitiepad via route 1 naar route 3, maar om een gelijktijdige inzet op alle drie de hoofdroutes. Op het transitiepad liggen onderdelen waar op dit moment verschillende perspectieven en verwachtingen over bestaan. Bijvoorbeeld de mate waarin en technologie waarmee CO₂ als grondstof zal worden toegepast in het eindbeeld, de mogelijkheden zijn toegelicht in hoofdstuk 3. De komende jaren zal nader onderzoek en ontwikkeling van technologie en markt hier meer duidelijkheid over gaan geven maar het is van belang dat de overheid de verschillende perspectieven kent en begrijpt.

De gelijktijdige ontwikkeling op alle drie de hoofdroutes betekent dat er volop moet worden ingezet op het benutten kansen voor alle drie de hoofdroutes. Dat vraagt het scheppen van de juiste randvoorwaarden voor een gecontroleerde afbouw, voldoende perspectief voor ombouw naar en

opbouw van nieuwe technologie en het benutten van kansen tot innovatie. Het expertteam ziet hierin een belangrijke rol voor zowel de markt als de overheid.

Op dit moment is duidelijk dat de transitie vanuit de markt nog niet op gang komt. Dat heeft te maken met goedkope fossiele grondstoffen die de goede concurrentiepositie van duurzame alternatieven in de weg staan. Tegelijkertijd heeft de Nederlandse industrie last van een ongelijk speelveld, zowel binnen Europa als mondiaal. Dat is met name te wijten aan hoge energieprijzen. Het gebrek aan toekomstperspectief in Nederland is een belangrijk obstakel voor zeer urgente en benodigde langetermijninvesteringen. Het expertteam ziet vanuit deze urgentie en het bewaken van maatschappelijke effecten en risico's een belangrijke rol voor de overheid op dit moment in de transitie. De overheid moet sturing geven aan de transitie om deze aan te jagen, te versnellen en te zorgen dat transitiefalen wordt voorkomen.

Dat betekent dat er vanuit het rijk moet worden ingezet op het scheppen van de juiste randvoorwaarden voor de markt om de transitie in Nederland door te maken. Dat begint bij stabiel en coherent beleid zodat marktpartijen weten waar ze de komende jaren aan toe zijn. Verder onderscheidt het expertteam drie aangrijpingspunten in de markt waar op randvoorwaarden gestuurd kan worden. Ten eerste de markt: stimuleren van de vraag, bescherming van de Europese markt en op Nederlands niveau een gelijk speelveld met buurlanden en met fossiele applicaties. Daarnaast sturing op de beschikbaarheid van duurzame grondstoffen. Dat betekent bijvoorbeeld circulariteit bevorderen en afvalstromen als grondstof beschouwen. Ten slotte kan de overheid sturen op realisatie, bijvoorbeeld door stimuleren van opschaling van innovatieve technologie, op alle drie de hoofdroutes.

De transitie naar een duurzame koolstofchemie houdt nauw verband met andere belangrijke maatschappelijke thema's, zoals de energietransitie en schaarse fysieke- en milieuruimte, er bestaat spanning tussen belangen vanuit verschillende thema's. In de transitie naar een duurzame koolstofchemie zal gezocht moeten worden naar de juiste balans en/of compromis waarbij niet voor alle thema's de optimale uitkomst mogelijk zal zijn; hierbij zijn politieke keuzes nodig. Dit vraagt om een denkwijze die uitgaat van integraal begrip van de impact en consequenties, zodat afwegingen beter onderbouwd worden gedaan.

Bovenal geldt voor sturing vanuit het Rijk dat Europese wetgeving en afstemming essentieel is. Vanwege de schaal en het internationale karakter van de sector is dit randvoorwaardelijk voor een succesvolle transitie. Nederlandse wetgeving loopt op dit moment voorop. Het is belangrijk om de risico's hiervan voor het eigen vestigingsklimaat te onderkennen. Deze koploperspositie vraagt om een proactieve houding in Europa; het mede vormgeven van, en anticiperen op, Europese methodiek en het vermijden van marktverstoring binnen de EU.

APPENDIX

Bijlagen

Leden van het expertteam



Dr. Sanne Akerboom

Universitair docent Regulering en Governance van de Energietransitie aan het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling aan de Universiteit Utrecht

Sanne Akerboom is universitair docent Regulering en Governance van de Energietransitie aan het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling. Ze is jurist en politicoloog en houdt zich bezig met juridische en sociaal-wetenschappelijke vraagstukken van de energietransitie.



Prof. dr. Gert Jan Kramer

Hoogleraar Duurzame energievoorziening aan het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkelingen aan de Universiteit Utrecht en

Gert Jan Kramer is bij hoogleraar Duurzame Energievoorziening aan het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling aan de Universiteit Utrecht. Daarnaast is hij hoofd van de Energy & Resources groep binnen dit instituut. Zijn interessegebied is de energietransitie als technisch en socio-technisch fenomeen.



Prof. dr. Yvonne van der Meer

Hoogleraar Sustainability of Chemicals and Materials bij de faculteit Science and Engineering van de Universiteit Maastricht

Yvonne van der Meer is wetenschappelijk vice-directeur van het Aachen-Maastricht Institute for Biobased Materials, gevestigd op de Brightlands Chemelot Campus en coördinator van het Europese Industrial Doctorate-programma Biobased Value Circle. Zij is lid van het wetenschappelijk comité van de Circular Biobased Europe Joint Undertaking en tevens voorzitter van de Koninklijke Nederlandse Chemische Vereniging (KNCV). Zij heeft 28 jaar ervaring in duurzame chemie.



Arnold Stokking

Managing Director van Brightsite en Voorzitter Groene chemie, Nieuwe Economie

Arnold Stokking, innovatie professional, is directeur van het kenniscentrum Brightsite op Chemelot dat zich richt op de verduurzaming van de chemische industrie door het ontwerpen van transitie paden, het introduceren van nieuwe technologieën met de bijbehorende opleidingsbehoeften. Ook is hij voorzitter van het platform Groene Chemie Nieuwe Economie dat zich richt op het verbeteren van randvoorwaarden voor disruptieve start-up en scale-upbedrijven gericht op duurzame chemie. Ook is Arnold mede-initiatiefnemer en co-voorzitter van het Nationaal Groeifonds Programma BioBased Circular dat zich richt op het opzetten van een nieuwe bedrijfstak in Nederland gebaseerd op koolhydraten als grondstof.



Ir. Bart Strengers

Senior wetenschappelijk onderzoeker Energietransitie en Biograndstoffen bij het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)

Bart Strengers is ruim 25 jaar werkzaam bij het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), waar hij werkt aan onderzoeken naar de energietransitie, klimaatverandering en biograndstoffen. Hij heeft een achtergrond in informatica en milieukunde. Bij het PBL was hij onder andere hoofdauteur en projectleider van de Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Daarnaast is hij lid van de Nederlandse delegatie van het IPCC.

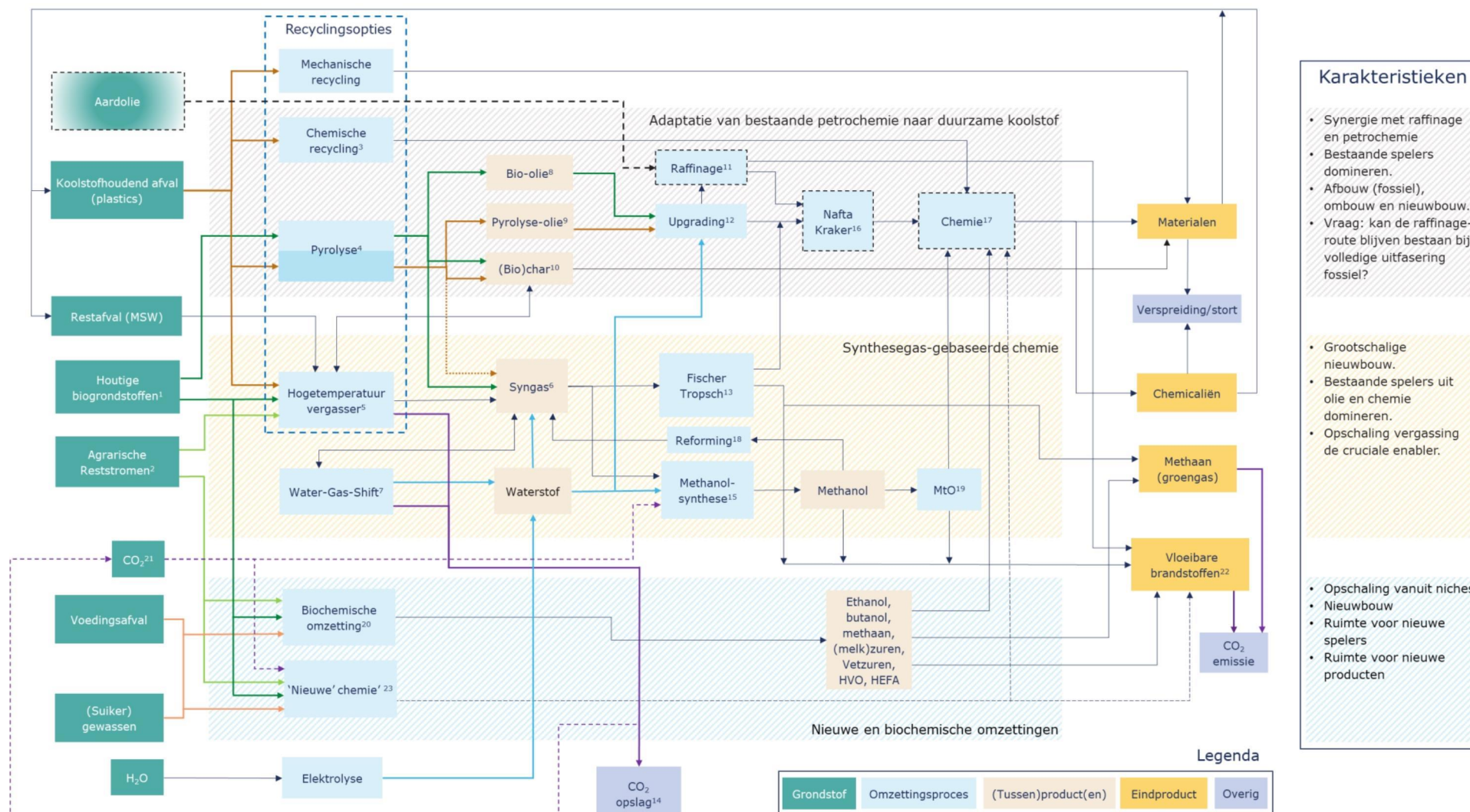


Ir. Jacqueline Vaessen

Boegbeeld Topsector Chemie, directeur a.i. NLHydrogen.

Jacqueline Vaessen is sinds 1 september 2021 het boegbeeld van de Topsector Chemie. Naast haar rol bij de Topsector Chemie is Jacqueline Vaessen ook interim-directeur bij NLHydrogen, de branchevereniging voor de waterstofketen in Nederland. Vaessen heeft een achtergrond in chemische technologie en een bachelors in psychologie en begon haar carrière als technoloog bij Shell in Moerdijk. Ze heeft uitgebreide ervaring in de energietransitie en verduurzaming van de industrie, en heeft diverse initiatieven geleid, zoals de eerste offshore waterstofpilot op een bestaand platform en innovatiemissies op biobased chemistry en circulariteit geleid naar Brazilië en China.

Ketenplaat met voetnoten



1. Het gaat hierbij zowel om houtige biograndstoffen uit de bosbouw – voor zover niet geschikt voor zaaghout – als om houtige biograndstoffen uit de landbouw (miscanthus, olifantsgras of snelgroeïende boomsoorten zoals wilg). Deze grondstoffen kunnen worden voorbereid door pelletisering of torrefactie waardoor een grondstof ontstaat met een meer constante kwaliteit. Dit is bevorderlijk voor bijvoorbeeld het vergassingsproces (voetnoot 5).
2. Waaronder suikerbietenpulp, bagasse (restproduct van suikerriet), etc.
3. Chemische recycling is hoogspecifieke depolymerisatie die basischemicaliën levert en complexere stoffen die direct in de chemie ingezet kunnen worden, afhankelijk van het proces en de grondstof. Dit kan op basis van bijvoorbeeld: i) Hydrolyse van PET dat kan worden afgebroken door water of een alkalische oplossing bij hoge temperatuur en druk, wat resulteert in monomeren zoals tereftaalzuur (TPA) en ethyleenglycol (EG) die opnieuw kunnen worden gebruikt om PET te maken. ii) Glycolyse van PET door een reactie met een glycol, zoals ethyleenglycol, bij hoge temperatuur en in aanwezigheid van een katalysator. Dit breekt de polymeren af tot oligomeren die als grondstof kunnen dienen voor nieuwe polymeren. iii) Solvolyse van composietmaterialen en harsen (zoals epoxy- of thermohardende kunststoffen) met een oplosmiddel (bijv. alcohol, aceton, water onder superkritische omstandigheden) om polymeren selectief af te breken. iv) Hydrogenolyse van polyolefinen (bijvoorbeeld polyethyleen en polypropyleen) met behulp van waterstof en een katalysator, vaak onder hoge temperatuur en druk, tot lichte koolwaterstoffen, zoals propaan of butaan, die als brandstoffen of grondstoffen kunnen worden gebruikt. v) Pyrolyse (zie voetnoot 4) vi) Depolymerisatie van polyamiden (bijv. Nylon-6 en Nylon-6,6) door chemische processen zoals hydrolyse of alcoholyse om de polyamideketens af te breken tot caprolactam of hexamethyleendiamine, bouwstenen voor de productie van nieuw nylon. vii) Enzymatische depolymerisatie van biobased plastics zoals PLA (polymelkzuur) waarbij specifieke enzymen worden gebruikt om polymeren selectief af te breken tot hun monomeren zoals tot melkzuur, dat opnieuw kan worden gepolymeriseerd tot PLA.
4. Pyrolyse is thermische afbraak bij 300 tot 700 °C zonder zuurstof en leidt bij houtige biograndstoffen tot de volgende producten: 25 tot 35% bio-olie (zie voetnoot 8), 10 tot 25% biochar (zie voetnoot 10), en 35 tot 50% pyrolysegas. Dit gas is een mengsel van CO (15-25%), H₂ (10-15%), CH₄ (10-20%), CO₂ (10-15%), lichte koolwaterstoffen (C₂-C₄, 5-10%), water (5-10%) en andere organische verbindingen (5-10%). Dit gas kan via reforming worden omgezet in syngas (zie voetnoot 6). Bij pyrolyse van kunststoffen zoals polyethyleen (PE), polypropyleen (PP) en polystyreen (PS) worden de polymeren afgebroken tot kleinere moleculen. Dit levert olieachtige vloeistoffen, gassen (zoals methaan, ethaan) en koolwaterstoffen die opnieuw als grondstof kunnen worden gebruikt. Ook syngas (zie voetnoot 6) kan door pyrolyse uit kunststoffen worden gevormd, maar dit is meestal *niet* het primaire doel (aangegeven door de stippellijn in het schema). Daarvoor is de vergassingsroute logischer, die vooral wordt ingezet bij afvalstromen die moeilijk zijn om te zetten in vloeibare producten (zoals sterk vervuilde of gemengde plastics).
5. Een hogetemperatuurvergasser (typisch tussen 800-1300 °C) kan houtige biograndstoffen (na voorbereiding zoals torrefactie) of plastic afval met toevoeging van beperkte hoeveelheid stoom of zuurstof, omzetten in syngas. Vaste koolstofresiduen blijven achter als biochar, zie voetnoot 10. Deze technologie is nog in ontwikkeling maar er zijn wel een aantal pilotprojecten actief. Het meest gebruikte vergassingsproces van houtige biograndstoffen werkt met beperkt zuurstof en *inclusief* watergasconversie (voetnoot 7). Hierbij wordt een significant deel van de koolstof (tot meer dan 40%) in de biograndstoffen omgezet in CO₂ die als onderdeel van het proces in tamelijk pure vorm wordt afgevangen. Deze CO₂ kan worden gebruikt als koolstofbron (CCU, zie voetnoot 21) of om negatieve emissies te realiseren (voetnoot 14). De efficiëntie van een vergasser en de hoeveelheid (biogene) CO₂

die vrijkomt wordt beïnvloed door een combinatie van technische, chemische en operationele factoren, zoals:

Kwaliteit van de grondstof: het gehalte aan koolstof, waterstof, zuurstof, en onzuiverheden zoals as of vocht (in het geval van biograndstoffen) in de invoer bepaalt de opbrengst en kwaliteit van het syngas. Een hoger vochtgehalte verlaagt de vergassingstemperatuur en kost extra energie om water te verdampen, wat de efficiëntie vermindert. Materialen met een hoge energiedichtheid leveren meer syngas per eenheid massa.

Het type oxidatiemiddel: Vergassen met lucht zorgt voor een lagere syngaskwaliteit door stikstofverdunding. Zuurstof verhoogt de energiewaarde van syngas maar is duurder vanwege de noodzaak van een zuurstofgenerator. Stoom bevordert watergasreacties en verhoogt het waterstofgehalte, wat nuttig is voor waterstofrijke toepassingen. CO₂ kan worden gebruikt voor koolstofhergebruik en heeft een milder effect op syngaskwaliteit dan lucht.

Temperatuur: Hoge temperaturen (700-1200°C) bevorderen volledige omzetting van vaste koolstof en vluchtige stoffen, verminderen teervorming, en verbeteren de syngaskwaliteit. Lagetemperatuurvergassing (300-700°C) kan efficiënter zijn voor sommige toepassingen maar leidt vaak tot meer bijproducten zoals teer.

Reactorontwerp: Vastbedvergassers zijn eenvoudig van ontwerp, geschikt voor kleine toepassingen, maar hebben een lagere efficiëntie en meer teervorming. Draaibedvergassers mengen de biomassa en de vergassingsmiddelen, met een betere opbrengst van syngas en minder teer tot gevolg. Bubbelbedvergassers zijn geschikt voor fijne biomassa, met een hoge doorvoer en verbeterde warmteoverdracht.

Procescondities: Een goede balans tussen oxidatie en reductie is cruciaal. Te veel lucht leidt tot volledige verbranding en energieverlies; te weinig lucht resulteert in onvolledige vergassing. Langere verblijftijden verbeteren de omzetting van vaste koolstof naar gas. Hogedrukvergassing verhoogt de energiedichtheid van syngas maar vereist duurzamere apparatuur.

As- en slakvorming: Biomassa met lage assmelpunten kan slakken veroorzaken bij hoge temperaturen, wat de werking van de vergasser verstoort. Een hoog asgehalte verlaagt de efficiëntie, omdat meer residu moet worden afgevoerd.

Syngasreiniging: Teervorming kan de efficiëntie van de vergasser verminderen en vereist extra reinigungsstappen. Zwavel, stikstof, en andere contaminanten moeten worden verwijderd om het syngas bruikbaar te maken, wat invloed heeft op de netto efficiëntie.

Warmteterugwinning: Het hergebruiken van afvalwarmte in het systeem (bijvoorbeeld voor droging of stoomproductie) kan de totale efficiëntie verbeteren. Isolatie minimaliseert warmteverlies naar de omgeving.

6. Syngas (synthetisch gas) bevat, afhankelijk van de herkomst zowel qua proces (pyrolyse of vergassing) als type feedstock, 20 tot 30% waterstof (H₂), 20 tot 30% koolmonoxide (CO), 5 tot 10% methaan (CH₄) en 10 tot 15% CO₂ en daarnaast kleine hoeveelheden stikstof en andere koolwaterstoffen. Indien afkomstig van plastic afval is het syngas van lagere kwaliteit door verontreiniging zoals chloor, zwavel, dioxines, furanen of zware metalen (lood, cadmium) waardoor er een hogere kans is op schade aan installaties en nabehandeling complex is. Door pure waterstof aan het syngas toe te voegen kan de verhouding H₂/CO worden verbeterd ten behoeve van het FT-proces (voetnoot 13) of de methanolsynthese (voetnoot 15). Deze verhouding kan ook worden verbeterd door de watergasconversie (voetnoot 7).

7. Het doel van de watergasconversie of de 'water-gasshift-reactie' is om de verhouding H_2/CO van het syngas (zie voetnoot 6) te verhogen door toevoeging van water in de vorm van stoom. Idealiter is die verhouding waterstof:koolmonoxide gelijk aan 2:1 (zie voetnoot 6). Watergasconversie is een omkeerbare reactie die plaatsvindt bij temperaturen tussen 190-450°C. De reactievergelijking is: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$. Katalysatoren zoals koper of ijzer worden vaak gebruikt om de verhouding waterstof/koolmonoxide te verbeteren.

Er zijn twee hoofdvarianten: hoge-temperatuur watergasconversie (HT) bij 350 tot 450°C op basis van een ijzer-chroom katalysator en een lage-temperatuur watergasconversie (LT) bij 190 tot 250°C gebruik makend van een koper-zink katalysator. De eerste variant heeft een hogere reactiesnelheid en de tweede een hogere waterstofopbrengst. Uit de watergasconversie kan ook pure waterstof worden onttrokken door nabewerking, bijvoorbeeld met Pressure Swing Adsorption (PSA) of membraanscheiding. De CO_2 die wordt gevormd kan worden afgevangen en opgeslagen (zie voetnoot 14) of als grondstof worden ingezet, zie voetnoot 21 (CCU).

8. Bio-olie is pyrolyse-olie afkomstig van houtige biograndstoffen of landbouwresiduen. Het bevat 15-30% water, zuren (zoals azijnzuur en mierenzuur) die verantwoordelijk zijn voor de lage pH (2-3) en corrosie en chemische instabiliteit veroorzaken, fenolen en lignine-afgeleiden die gebruikt kunnen worden voor harsen en andere biobased chemicaliën, suikers en anhydrosuikers afkomstig van cellulose en hemicellulose die onstabiel en vatbaar voor polymerisatie zijn, diverse vluchtige organische verbindingen (ketonen, aldehyden, en alcoholen) met toepassingen in de chemische industrie en tot slot olieachtige fracties (5-10%) bestaande uit polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) en andere koolwaterstoffen met lange ketens.
9. Pyrolyse-olie afkomstig van plastic afval bevat lichte koolwaterstoffen (C_5-C_{10}), aromaten (BTX) en olefine-afgeleiden zoals styreen en andere monomeerachtige verbindingen. In vergelijking met pyrolyse-olie uit biograndstoffen bevat deze olie weinig zuurstof (minder dan 5% vs tot 40%), wat gunstig is voor chemische toepassingen.
10. (Bio)char is een stabiele, poreuze, koolstofrijke zwarte of bruine vaste stof dat moeilijk afbreekt en een groot oppervlak en hoge adsorptiecapaciteit heeft. Indien niet verontreinigd (zoals het geval kan zijn bij vergassing van plastic afval) kan het worden toegepast in de landbouw ter verbetering van de bodemkwaliteit, het verhogen van het water- en nutriëntenvasthoudend vermogen, het stimuleren van bodemleven en het verminderen van de kunstmestbehoefte. Ook legt het CO_2 vast. Het kan ook gebruikt worden voor (grond)waterzuivering (verwijdering van zware metalen en absorptie van verontreinigingen) of als toevoeging aan veevoer ter verbeteren van diergezondheid en vermindering van methaanemissies. Tot slot kan het als materiaal voor filterprocessen worden gebruikt, als grondstof voor composieten en heeft mogelijkheden voor energieopslag (o.a. door de hoge warmtecapaciteit).
11. In bestaande raffinaderijen kan zowel bio-olie (zie voetnoot 8) als pyrolyse-olie (zie voetnoot 9) na upgradering (zie voetnoot 12) worden bijgemengd. Het bijmengpercentage hangt af van verschillende factoren, waaronder de kwaliteit van de olie, de configuratie van de raffinaderij, en de eisen die gesteld worden aan de eindproducten. Over het algemeen varieert het percentage tussen 5% en 30%, maar dit kan hoger zijn met verdere verwerking of aanpassing van de raffinaderijprocessen. Hier zijn enkele belangrijke punten om rekening mee te houden: i) De kwaliteit van de olie. Pyrolyse-olie uit plastic afval (zie voetnoot 9) bevat vaak onzuiverheden zoals chloor, zwavel, of metalen (bijvoorbeeld van additieven of verontreinigingen in het plastic). Deze onzuiverheden kunnen corrosie of katalysatorvergiftiging in raffinaderijen veroorzaken. ii) Het type raffinaderij. Raffinaderijen met flexibele installaties (zoals hydrokrakers en cokers) kunnen beter omgaan met pyrolyse-

olie, waardoor ze grotere hoeveelheden kunnen verwerken. Eenvoudige raffinaderijen zijn minder geschikt en kunnen alleen kleinere percentages verwerken zonder problemen. iii) Het gewenste eindproduct. Pyrolyse-olie of bio-olie kan worden gebruikt als grondstof voor brandstoffen (benzine, diesel) of chemische productie (olefinen, aromaten). Voor hoogwaardige eindproducten zoals vliegtuigbrandstof of petrochemische grondstoffen zijn strenge specificaties vereist, wat het bijmengpercentage kan beperken. Raffinaderijen die al commerciële testen hebben uitgevoerd, zoals Neste, TotalEnergies, en Shell, melden bijmengpercentages van ongeveer 10-15% in bestaande installaties zonder grote aanpassingen. Met verbeteringen in technologie en strengere wetgeving rond duurzaamheid en recycling, wordt verwacht dat raffinaderijen meer pyrolyse- en bio-olie gaan verwerken. Het ontwikkelen van standaarden voor de kwaliteit van de olie en investeringen in zuiverings- en blendingstechnologieën zal hierbij cruciaal zijn. Een belangrijke vraag is in hoeverre deze route past in een duurzaam eindbeeld van de koolstofchemie waarin geen fossiele feedstocks gebruikt worden.

12. Voor gebruik in een naftakraker moet bio-olie (zie voetnoot 8) meestal eerst worden geüpgraded (bijvoorbeeld door hydrodeoxygenatie of katalytische cracking) om de zuurstof te verwijderen en de koolwaterstofsamenstelling te verbeteren. Zonder upgrading kan het hoge zuurstofgehalte van bio-olie leiden tot problemen, zoals corrosie, koolstofafzettingen, of een lagere opbrengst van waardevolle producten zoals ethyleen en propyleen. De benodigde upgrading van bio-olie kan kostbaar zijn. Het proces vereist vaak waterstof en specifieke katalysatoren, wat de kosten en de energie-input verhoogt. Pyrolyse-olie uit plastic afval (zie voetnoot 9) kan in principe vooral in moderne naftakrakers zonder grote aanpassingen worden verwerkt, mits de kwaliteit consistent is. Meestal is enige voorbehandeling nodig, zoals het ontdoen van chloor, ontwaveling en destillatie, om ongewenste componenten te verwijderen en de eigenschappen van de olie aan te passen. Onzuiverheden kunnen corrosie veroorzaken, katalysatoren vervuilen en de efficiëntie van de kraker verminderen.
13. In het Fisher-Tropsch-proces (FT) reageert syngas (zie voetnoot 6) onder hoge druk (10-40 bar) bij temperaturen van 200 tot 350°C in aanwezigheid van een katalysator, meestal gebaseerd op ijzer of kobalt, tot lange-keten koolwaterstoffen.
De versimpelde reactievergelijking voor de vorming verzadigde koolwaterstoffen is: $(2n+1)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$. En voor onverzadigde koolwaterstoffen (olefinen of alkenen): $2nH_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n} + nH_2O$. Zowel hogere temperaturen als een katalysator gebaseerd op ijzer geven naar verhouding meer olefinen.
14. Zoals aangegeven bij het vergassingsproces (voetnoot 5) en de watergasconversie (voetnoot 7) wordt een significant deel van de koolstof uit de biograndstoffen omgezet in biogeen CO₂. Indien dit ondergronds wordt opgeslagen is sprake van negatieve emissies, maar deze CO₂ kan ook worden ingezet als koolstofbron (zie voetnoot 21). Het gaat hier om een relatief pure stroom CO₂ (>90%) die vrijkomt bij het conversieproces en dus niet om CO₂ uit verbrandingsgassen, die een veel lagere CO₂-concentratie hebben (20-30%), tenzij met zuivere zuurstof wordt verbrand.
15. Het produceren van methanol (CH₃OH) uit syngas (zie voetnoot 6) in een synthesesereactor is een katalytisch proces (op basis van koper, zinkoxide, en alumina) dat plaats vindt bij 200 tot 300 °C en een druk van 50 tot 100 bar. De reactiestappen zijn: $CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$ op basis van (geoptimaliseerd) syngas of $CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$ op basis van CO₂ en waterstof. Niet-gereageerd gas wordt gerecirculeerd. Warmte wordt afgevoerd om de reactie te beheersen. De methanol wordt gescheiden en gezuiverd voor (verder) gebruik.
16. Een nafta-kraker produceert basischemicaliën zoals ethyleen, propyleen, butadien, aromaten (benzeen, toluen, xyleen), andere monomeren (o.a. butenen) en hogere

koolwaterstoffen (C5+) die ingezet kunnen worden als grondstoffen voor verdere verwerking in de chemie.

17. 'Chemie' refereert hier naar de omzetting of polymerisatie van (basis)chemicaliën naar complexere chemicaliën of materialen afkomstig van chemische recycling (zie voetnoot 3), van de nafta-kraker (zie voetnoot 16), van het MtO-proces (zie voetnoot 19), van biochemische omzettingen (voetnoot 20) en van de 'Nieuwe chemie' (zie voetnoot 23).
18. Reforming van methanol is een katalytisch proces (op basis van nikkel of koper-zink) waarin uit methanol synthesesgas wordt gevormd voor verdere verwerking in een FT-proces (zie voetnoot 11). Het vindt plaats bij 200 tot 300 °C en 20 tot 50 bar. Dit proces wordt gebruikt in de nieuw te bouwen fabriek in Rotterdam van Power2X en Advorio voor de productie van 250.000 ton kerosine per jaar in 2030, vooralsnog op basis van te importeren methanol.
19. Methanol-to-Olefins (MtO) is een katalytisch proces (meestal op basis van zoelieten) bij een temperatuur van 300 tot 500 °C voor de omzetting van methanol naar olefinen (etheen, propheen, etc.). De belangrijkste stappen zijn: i) Methanoldehydratie waarin methanol wordt omgezet in dimethylether (DME): $2\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ en ii) olefinenvorming door het kraken van DME en resterend methanol tot lichte olefinen door koolstofketenopbouw- en splitsingsreacties. DME kan ook direct worden gebruikt als dieselvervanger of als drijfgas in spuitbussen. Uit olefinen kunnen ook aromaten worden gevormd (vooral benzeen, toluen en xyleen).
20. Biochemie betreft alle processen voor de omzetting van voedselafval, (suiker)gewassen en agrarische reststromen (zoals maïskolven en stro) of houtige biograndstoffen door middel van enzymen, fermentatie (bacteriën, schimmels, gisten) en (an)aërobe vergisting in producten als ethanol, butanol, methaan, (melk)zuren en vetzuren die eventueel weer als grondstof in de verdere chemie kunnen worden ingezet. Tevens valt hier de productie van HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) en HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) onder. HVO is een dieselbrandstof die wordt geproduceerd door plantaardige oliën en dierlijke vetten (UCO's of Used Cooking Oils) te behandelen met waterstof (hydrogenering). HEFA is met name een kerosinevervanger en staat ook bekend als Sustainable Aviation Fuel (SAF). HVO en HEFA hebben op dit moment qua volume het grootste aandeel in de productie van duurzame brandstoffen. In de toekomst zal dit aandeel (sterk) afnemen aangezien de beschikbaarheid van de gebruikte grondstoffen niet of nauwelijks zal toenemen. Ook produceert de energiesector al op grote schaal bio-ethanol door fermentatie van biomassa-suikers met behulp van micro-organismen om de klimaatimpact van transportbrandstof omlaag te brengen. Deze bio-ethanol kan ook gebruikt worden voor de chemie of kan ingezet worden om bouwstenen voor de productie van polyester vezels en plastics.
21. CO₂ kan worden ingezet in de methanolsynthese (zie voetnoot 15) of als grondstof dienen in de 'Nieuwe chemie' (CCU, zie voetnoot 22). Het vergassingsproces (voetnoot 5) levert waarschijnlijk genoeg CO₂ op. Als dat niet het geval zou zijn, dan zou CO₂ ook op basis van Direct Air Capture uit de atmosfeer gewonnen kunnen worden (niet in het schema opgenomen).
22. De vloeibare brandstoffen waar het hier om gaat zijn met name kerosine voor de luchtvaart (incl. HEFA), diesel (o.a. voor de zeescheepvaart) uit het FT-proces (zie voetnoot 13), methanol (met name voor de zeescheepvaart) uit de methanolsynthese (voetnoot 15), DiMethylEther (of DME als vervanger van diesel en LPG) uit het MtO-proces (zie voetnoot 19) en ethanol (met name voor het wegverkeer) uit de biochemie (zie voetnoot 20). Uit de 'nieuwe chemie' kunnen ook brandstoffen voortkomen. Deze lijn is gestippeld omdat nog onduidelijk is om welke processen en brandstoffen het zal gaan (zie voetnoot 23).

23. 'Nieuwe chemie' op basis van biograndstoffen betreft routes naar kunststoffen op basis van alternatieve processen die functionaliteiten of molecuulstructuren in de grondstof beter benutten dan de eerder beschreven hoofdroutes (synthese-gebaseerd en adaptatie van bestaande petrochemie). In die routes worden grondstoffen immers afgebroken tot moleculen die voornamelijk uit koolstof en waterstof bestaan. Dit is vaak energetisch ongunstiger en molecuulstructuren die in de grondstof aanwezig zijn, o.a. door de aanwezigheid van zuurstof en stikstof in de chemische verbindingen, gaan verloren bij het afbreken en komen vrij als emissies. Er zijn vershillende chemische processen in ontwikkeling om deze biogebaseerde chemie vorm te geven, ook via het Biobased Circular Groeifonds. Belangrijke biopolymeren met een groot potentieel zijn onder andere PLA, PHA, PEF en harsen en coatings. Deze polymeren kunnen gebruikt worden om verschillende producten te maken zoals verpakkingen, bouwmaterialen, schoonmaakmiddelen, landbouwplastics, bekertjes etc.

Chemische routes die worden aangedreven door elektronen uit hernieuwbare energiebronnen zoals zonne- en windenergie bevinden zich veelal nog op lage TRLs bij universiteiten en startups. Het gaat hier om onder andere fotokatalyse, elektrochemie en plasmachemie, waarmee op basis van CO₂ basischemicaliën geproduceerd kunnen worden. Fotokatalyse maakt gebruik van (zon)licht om een chemische reactie te versnellen, zoals de productie van methanol uit CO₂. Elektrochemie maakt gebruik van elektronen voor de chemische reactie.

Zo kan bijvoorbeeld ethyleen geproduceerd worden door elektrochemische reductie van CO₂ en kunnen formiaat of oxalaat gemaakt worden uit elektrochemische omzetting van carbonaat. Plasmachemie maakt, door middel van een elektrische vlam, chemische reacties mogelijk die momenteel onmogelijk zijn bij lagere temperatuur en druk, o.a. de productie van acetyleen, ethyleen of waterstofcyanide. Deze technologie heeft een hogere TRL dan de bovenstaande technologieën.

Tot slot zijn er routes die industrieel bekend zijn, maar vanwege de hoge kosten niet zijn geïmplementeerd, zoals de elektrochemische dimerisatie van acrylonitril naar adiponitril, het monomeer voor polyamide 6,6.

Het merendeel van de technologieën in de nieuwe chemie verkeren in TRL 1 of TRL 2 en vragen dus nog veel ontwikkeling om deze commercieel te krijgen. De rol van universiteiten, kennisinstellingen en startups is hierbij groot. Daarnaast zijn er ook technologieën die al (veel) vroeger bekend waren, maar het hebben afgelegd tegen een concurrerend proces dat goedkoper bleek. Plasmachemie is hier een voorbeeld van.

Indicatief indicatorenkader

In Hoofdstuk 4 is benoemd dat de overheid een rol heeft in het bewaken van de maatschappelijke effecten in een transitie naar een duurzame koolstofchemie. In deze bijlage wordt het handvat van een indicatorenkader verder ingevuld.

Hieronder biedt het expertteam een indicatorenkader op hoofdlijnen om de impact en de gevolgen van de ontwikkelingen en interventies in de transitie integraal te beoordelen. Het indicatorenkader weerspiegelt een manier van denken die handvatten biedt om impact en gevolgen te analyseren, te begrijpen en er (eventueel) naar te handelen.

Het gepresenteerde indicatorenkader bestaat – logischerwijs – uit verschillende indicatoren. Met een indicator bedoelen we in deze context een thema waarop beschouwing en/of beoordeling van gevolgen en impact relevant is voor een integrale benadering. De beschouwing en/of beoordeling van een indicator volgt uit een reeks overwegingen vanuit verschillende perspectieven op dit thema. Met behulp van verschillende indicatoren worden effecten integraal in beeld gebracht en komen de (negatieve of positieve) impact en gevolgen van een bepaalde keuze naar boven, wat helpt bij het onderbouwen van politiek-maatschappelijke keuzes.

Er zijn drie sets aan indicatoren opgesteld die een eerste aanzet geven aan deze manier van denken

- Set 1: Beschouwing van de klimaatimpact en emissiereductie.
- Set 2: Brede maatschappelijke overwegingen.
- Set 3: Grondstoffen en beschikbaarheid.

Let op: afwegingskader en beschouwing zijn indicatief

- Onderstaande set indicatoren is geen volledig afgewogen en doordachte set indicatoren: de introductie in dit advies is bedoeld om de manier van denken over dit soort keuzes te illustreren.
- Om een compleet afwegingskader te definiëren is meer onderzoek/studie nodig. Een uitgebreide vervolgstudie is nodig om deze aanzet verder uit te werken en de gevolgen en impact beter te doorgronden.
- Ook de beschouwing van de indicatoren is een vingeroefening en kan worden verdiept met meer tijd voor inhoudelijke discussie.

Set 1: Beschouwing van klimaatimpact en emissiereductie

De eerste set indicatoren belicht de aspecten die gericht zijn op het verminderen van CO₂-uitstoot en het behalen van (inter)nationale klimaatdoelen.

1. Klimaatimpact of realisatie van reductie: een evaluatie van het ontwikkelpad, de snelheid en efficiëntie van koolstof- en energiegebruik waarmee een proces binnen de hoofdroutes bijdraagt aan de vermindering van broeikasgasemissies (kg CO₂-eq per kg product).
2. Fossielvrij: beschouwing van de manier waarop de hoofdroute bijdraagt aan een fossielvrije koolstofchemie.
3. Potentieel voor negatieve emissies: beschouwing van de mate waarin een bijdrage kan worden geleverd aan negatieve emissies.

Klimaatimpact: realisatie van reductie

Beschouwing van deze indicator geeft weer in hoeverre verschillende technologieën binnen de drie hoofdroutes bijdragen aan de reductie van broeikasgasemissies in de koolstofketen. Dit omvat voornamelijk CO₂-emissies, maar ook andere broeikasgassen, zoals methaan, die de klimaatimpact beïnvloeden. Hierbij wordt niet alleen gekeken naar de theoretische potentie van emissiereducties, maar ook naar het ontwikkelpad, de snelheid van opschaling en de implementatie. Er wordt rekening gehouden met emissies die vrijkomen bij grondstofwinning (scope 3 upstream), productie (scope 1) en emissies door energiegebruik van de chemie (scope 2). Emissies downstream, en voor zover gerelateerd aan de gebruikte grondstoffen (scope 3 downstream), hangen af van de geschiktheid en de inzet van (consumenten) producten als circulaire grondstoffen en/of hun verwerking als afval. Het uiteindelijke doel is een significante, blijvende vermindering van broeikasgasemissies in de chemische industrie, met als langetermijnperspectief klimaatneutraliteit.

Op korte termijn kunnen bestaande processen worden geoptimaliseerd door bijvoorbeeld elektrificatie of het gebruik van alternatieve, duurzame grondstoffen. Daarnaast kan de energievoorziening voor deze processen verder verduurzaamd worden. Op lange termijn ligt de focus op de ontwikkeling van volledig omgebouwde of nieuwe productieprocessen die netto geen broeikasgasemissies veroorzaken, oftewel klimaatneutrale processen.

Fossielvrij

Met deze indicator wordt beoordeeld in hoeverre de verschillende hoofdroutes bijdragen aan een fossielvrije koolstofchemie. In dit advies wordt 'fossielvrij' gedefinieerd als een systeem waarin geen *virgin* fossiele grondstoffen of fossiele energie worden gebruikt voor de productie van eindproducten. Dit betekent dat fossiele koolstof uit gerecyclede plastics of andere afvalstromen niet als fossiele grondstof wordt meegerekend, terwijl dit in de definitie die de EU hanteert wél het geval kan zijn.⁵⁸

De snelheid waarmee fossielvrij bereikt wordt, verschilt per hoofdroute en hangt af van technologische ontwikkeling, beschikbaarheid van duurzame grondstoffen en energie en beleidskeuzes. Een succesvolle transitie betekent niet alleen de volledige vervanging van virgin fossiele grondstoffen, maar ook de ontwikkeling van waardeketens die dit ondersteunen.

Potentieel voor negatieve emissies

Met deze indicator beschouwen we de mogelijkheid voor negatieve emissies. We spreken van negatieve emissies wanneer biogene CO₂ ondergronds wordt opgeslagen (CCS). In het algemeen is het potentieel van negatieve emissies op de hoofdroutes afhankelijk van de hoeveelheid biogene CO₂ die vrijkomt bij het omzettingsproces en/of de opwekking van de energie die daarvoor nodig is en de hoeveelheid die wordt opgeslagen. Bijvoorbeeld in het vergassingsproces van (houtachtige) biograndstoffen biogene CO₂ vrijkomt in relatief zuivere vorm, het opslaan hiervan resulteert in negatieve emissies.

⁵⁸ Bijvoorbeeld [EU Verordening 2024/3012](#) "vaststelling certificeringskader van de Unie voor permanente koolstofverwijderingen, koolstoflandbeheer en koolstofopslag in producten"

Set 2: Bredere maatschappelijke overwegingen

Deze set indicatoren beschouwt de aspecten die in een bredere, maatschappelijke context bestaan en directe lokale gevolgen kunnen hebben. Deze aspecten kunnen bovendien een duidelijke koppeling hebben met andere beleidsdomeinen dan alleen klimaatbeleid.

- Milieu-impact: beschouwing van de gevolgen van het sturen op klimaatimpact voor (lokale) milieueffecten zoals: biodiversiteit, water- en luchtkwaliteit, geluidsoverlast en stikstofuitstoot.
- Industrieel ruimtegebruik: beschouwing van verwacht (extra) industrieel ruimtegebruik benodigd voor de bouw van nieuwe installaties en fabrieken (hoeveelheid en locaties).
- Maatschappelijke kosten en baten: beschouwing van de omvang van de maatschappelijke kosten en baten (en de verdeling daarvan) die gemoeid zijn met de investeringen die nodig zijn voor de ontwikkeling van de verschillende hoofdroutes.
- Verdelende rechtvaardigheid: beschouwing van de mate waarin de impact van een ontwikkeling op de indicatoren hierboven eerlijk verdeeld kan worden over verschillende groepen in de maatschappij.

Milieu-impact

Deze indicator neemt de bredere milieueffecten in beschouwing die voortvloeien uit inspanningen om de klimaatimpact te verminderen. Dit omvat niet alleen de reductie van broeikasgasemissies, maar ook de mogelijke toename van andere emissies zoals vluchtige organische stoffen, fijnstof en stikstofhoudende stoffen. Deze emissies kunnen nadelige gevolgen hebben voor biodiversiteit, water- en luchtkwaliteit, en geluidsoverlast en gezondheidsrisico's veroorzaken. Ook klassieke milieuthema's zoals watergebruik, landgebruik, verzuring en eutrofiëring zijn hierbij relevant. Daarnaast leidt het gebruik van plastics tot de vorming van niet volledig afbreekbare (micro)plastics die een risico vormen voor de gezondheid van mens en dier.

Het is daarom essentieel om vooraf te beoordelen welke milieu-impact gepaard gaat met de reductie van klimaatimpact. Voor het beperken van milieu-impact bestaat al veel wet- en regelgeving die daarbij in beschouwing genomen moet worden.

De waarde van de indicator wordt als succesvol beschouwd wanneer de reductie van klimaatimpact niet leidt tot ongewenste neveneffecten op andere milieuthema's. Het doel is om een evenwichtige benadering te vinden waarbij zowel klimaat- als milieu-impact worden geminimaliseerd. Dit vereist een zorgvuldige beoordeling en monitoring op de korte én lange termijn.

Industrieel ruimtegebruik

Deze indicator gaat over de verwachte behoefte aan (extra) industriële ruimte voor (de bouw van nieuwe) installaties en fabrieken. Dit omvat de hoeveelheid ruimte die nodig is, de locaties waar deze installaties worden gebouwd en de clustering van de industrie.

- De benodigde (extra) ruimte is sterk verweven met de benodigde installaties en fabrieken. Afhankelijk van de grondstof en de technologie zijn er meer of minder verwerkings- en productiestappen nodig, zoals ook beschreven in 2.3.
- De locatie hangt samen met de vraag in hoeverre integratie met bestaande industriële clusters mogelijk is. Waar technologieën leunen op de bestaande industrie is een locatie dichtbij bestaande clusters logisch. Dit kan interessant zijn vanwege de bestaande zware milieucategorieën en opslagcapaciteiten. Nieuwe technologieën die onafhankelijk zijn van de bestaande industrie kunnen ook op andere locaties ontwikkeld worden, bijvoorbeeld dicht bij de duurzame koolstofbron.
- Tot slot is de mate waarin de technologie zich clustert ook nog een overweging. Is het mogelijk om een technologie op grote schaal te realiseren, zoals in de bestaande industrieclusters het geval is, of is een grotere verscheidenheid aan kleinschalige installaties op verschillende locaties gewenst, afhankelijk van de diversiteit en locatie van beschikbare grondstoffen?

Er wordt gestreefd naar efficiënte benutting van de ruimte en de minimale verstoring van omliggende ecosystemen en/of gemeenschappen. De ruimtelijke ordening is ook in belangrijke mate ondergebracht in verwante wet- en regelgeving. Vergelijkbaar met de milieu-impact kunnen verschillende routes een verschillende ruimtelijke impact hebben, en daarmee keuzes beïnvloeden.

NB: dit betreft niet het ruimtegebruik voor het verbouwen van biograndstoffen. Het ruimtegebruik voor (het verbouwen van) grondstoffen, zoals land- of bosbouwgrond, wordt hier niet in meegenomen vanwege de internationale context, zoals beschreven in paragraaf 2.3 is de verwachting dat import vanuit Europa nodig is. Overwogen kan worden om 'ruimtegebruik voor grondstoffen' als aanvullende indicator op te nemen.

Maatschappelijke kosten en baten

Met deze indicator worden de kosten en baten beschouwd die landen in de samenleving. De transitie naar een fossielvrije koolstofchemie is op dit moment commercieel gezien niet interessant. Voor alle routes zijn aanzienlijke investeringen benodigd en hebben bedrijven de zekerheid nodig dat er vraag is naar hun producten. De overheid kan bijvoorbeeld maatregelen introduceren waardoor de duurzame producten kunnen concurreren met de vervuilende alternatieven. Dit kan nadelige effecten hebben voor (de huidige generaties) consumenten. De overheid zou moeten kijken naar: wat brengt deze investering teweeg t.a.v. maatschappelijke kosten en baten. Als de overheid bijvoorbeeld (een deel van) investeringskosten draagt om marktfalen tegen te gaan, draagt dit dan ook bij aan maatschappelijk wenselijke effecten (baten) die het behoud van de industrie teweeg kan brengen?

Het is daarbij van belang om zowel de kapitaalinvesteringen (CAPEX) als de operationele kosten (OPEX) van de technologieën te beschouwen, die zullen verschillen per technologie en hoofdroute. Aangezien bedrijven waarschijnlijk geholpen worden met publieke middelen via onder andere subsidies, of de extra kosten doorberekenen in productprijzen, zullen deze kosten uiteindelijk door de samenleving worden gedragen.

Verdelende rechtvaardigheid

Met deze indicator kan de mate waarin de impact van een ontwikkeling op de indicatoren hierboven eerlijk verdeeld kan worden over verschillende groepen in de maatschappij worden beschouwd. Dit omvat de verdeling van zowel baten als lasten, en houdt rekening met de impact op verschillende generaties en geografische gebieden. Drie belangrijke hoofdcategory's zijn:

- Internationale verdeling: vanuit internationaal perspectief zou bijvoorbeeld aandacht moeten bestaan voor een rechtvaardige verdeling van grondstoffen (en de impact van deze verdeling), en de mate waarin toeleverende landen van deze grondstoffen ook in staat zijn te verduurzamen. Een verduurzaamde Nederlandse economie is weliswaar essentieel, maar niet als dit de mogelijkheid voor andere landen om te verduurzamen in de weg staat.⁵⁹
- Intergenerationele verdeling: overwegingen over de (financiële) rekening van klimaatverandering, die bij toekomstige generaties wordt gelegd. De overheid zal willen voorkomen dat de rekening van maatschappelijke investeringen geheel afgewenteld wordt op toekomstige generaties. Veelal wordt rechtvaardigheid opgevat als het voorkomen van klimaatverandering ten behoeve van die generaties, maar daarmee is het nog niet rechtvaardig als de rekening op de lange baan wordt geschoven. De overheid kan overwegen om strategisch te sparen voor de toekomst; zo betalen producenten van radioactief afval alvast voor de permanente berging voor dit afval, wat nu voorzien wordt voor het jaar 2130. Volgens dezelfde logica heeft de Wetenschappelijke Klimaatraad de overheid aanbevolen huidige vervuilers te laten betalen voor toekomstige CO₂-verwijdering uit de atmosfeer.⁶⁰

⁵⁹ PBL, 2021 - [Trends in Nederlandse voetafdrukken: een update | Planbureau voor de Leefomgeving \(PBL, 2021\)](#), [Tabellenset Voetafdrukken ICER 2023 \(PBL, 2023\)](#).

⁶⁰ Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR), 2024 - [De lucht klaren?](#)

- Intragenerationele verdeling: dit betreft de generaties hier en nu en omvat overwegingen over de verdeling van bijvoorbeeld ruimtelijke en kostenimpact over verschillende groepen van de Nederlandse samenleving, zowel burgers onderling als tussen bedrijven en burgers. Kostenimpact kan voor verschillende groepen onevenredig nadelig uitpakken.

Idealiter worden de kosten en baten van de transitie zo eerlijk en rechtvaardig mogelijk verdeeld, zowel binnen de huidige generatie als tussen verschillende generaties, groeperingen en landen. Dit is complex. De hoofdcategorieën kunnen helpen bij het identificeren van de verwachte gevolgen voor verschillende groepen, en het beargumenteren van beleidskeuzes op basis van deze verwachte gevolgen.

Set 3: Grondstoffen en beschikbaarheid

Deze set indicatoren beschouwt de grondstoffen. Hoe worden de grondstoffen ingezet, waar komen de grondstoffen vandaan en in hoeverre is de grondstof toepasbaar en beschikbaar in de industrie?

- Efficiënte inzet van grondstoffen: beschouwing van de koolstof die uit grondstoffen gewonnen kan worden, met oog voor de daarvoor benodigde hoeveelheid energie. Het gaat daarbij om de mate waarin koolstofatomen uit de grondstoffen worden omgezet in het gewenste eindproduct, in plaats van *ongewenste* bijproducten of CO₂-emissies.
- Toegankelijkheid, beschikbaarheid en ontwikkelbaarheid van grondstoffen: overwegingen van de mate waarin de grondstofketens binnen Nederlandse landsgrenzen, van grondstoffen tot toepassing, kan worden gerealiseerd of kan worden ontwikkeld en hoe snel dit kan. Overwegingen rondom toegankelijkheid gaan over de mate waarin een grondstof voorhanden en/of betaalbaar is in Nederland en wat de mogelijkheden zijn voor import.
- Strategische onafhankelijkheid: beschouwing van de mate waarin Nederland of Europa afhankelijk kan en/of zal zijn van respectievelijk andere landen binnen de EU of andere mondiale regio's voor de beoogde ontwikkeling van een duurzame koolstofchemie.

Efficiënte inzet van grondstoffen

Met de efficiënte inzet van grondstoffen wordt ernaar gestreefd om zo veel mogelijk koolstof uit grondstoffen nuttig in te zetten bij een zo laag mogelijk energiegebruik, waarbij ook zo min mogelijk ongewenste bijproducten of CO₂-emissies vrijkomen.

Ter illustratie twee voorbeelden van de interactie tussen koolstofefficiëntie en energie-efficiëntie:

- De koolstofopbrengst van recyclingprocessen als ook omzettingsprocessen die gebruik maken van biogrondstoffen wordt mede beïnvloed door de mate waarin de grondstof zelf wordt gebruikt voor het omzettingsproces. Dit verlaagt de koolstofopbrengst en verhoogt de CO₂-emissie.
- Het gebruik van CO₂ als koolstofbron gaat gepaard met een hoog energiegebruik, aangezien CO₂ zelf geen energie bevat en er veel energie nodig is, bijvoorbeeld in de vorm van waterstof, om de koolstof uit CO₂ vrij te maken.

Toegankelijkheid, beschikbaarheid en ontwikkelbaarheid van grondstoffen

De tijdige beschikbaarheid van grondstoffen is randvoorwaardelijk voor het ontwikkelen van de hoofdroutes en daarmee de gehele transitie. Hierbij horen overwegingen van de mate waarin tegen welke kosten, op welke schaalgrote en op welke termijn de beschikbaarheid binnen Nederlandse landsgrenzen kan worden gerealiseerd. In de beschouwing onder deze indicator horen ook overwegingen over concurrerende toepassingen van de grondstof. Het uiteindelijke doel is om een stabiele en betrouwbare aanvoer van grondstoffen te waarborgen.

De beschikbaarheid van afval vraagt om optimalisatie van inzameling, sortering en voorbewerking. Momenteel is er in Nederland schaarste aan goed gesorteerde plasticafvalstromen van hoge kwaliteit. Investerings in technologieën voor efficiënte recycling zijn nodig. In potentie zijn er in Nederland nog veel grondstoffen aanwezig waarmee de recycling opgeschaald kan worden. Dit vereist een

overheidsvisie op circulariteit en beleid voor bijvoorbeeld productontwerp gericht op circulariteit en het gebruik van gerecycled materiaal in producten (zie verder H4).

De toegankelijkheid en beschikbaarheid van biograndstoffen wordt beperkt door het beschikbare landareaal in Nederland, waardoor import hoogstwaarschijnlijk noodzakelijk is om deze op grote schaal toe te passen. De beschikbaarheid van biograndstoffen kan toenemen als de eiwittransitie doorzet. Er liggen kansen in de landbouw, die zich dan meer zou richten op het produceren van feedstocks voor de chemie. Daarnaast kan er ook slim gebruikgemaakt worden van de vele toepassingen van biograndstoffen, waarbij gewassen voor meerdere doeleinden worden geteeld. Door slimme combinaties van multi-verwaarding is er extra potentieel te ontsluiten en is er sprake van een win-winsituatie in de relatie tussen diverse transitieën.⁶¹

Strategische onafhankelijkheid

Deze indicator verwijst naar de mate waarin Nederland of Europa onafhankelijk kan opereren van externe bronnen voor essentiële grondstoffen, of van technologieën die elders zijn ontwikkeld. Dit kan belangrijk zijn voor stabiliteit en veiligheid, met name in tijden van geopolitieke spanningen of handelsbeperkingen.

De transitie naar een duurzame koolstofchemie biedt kansen om Nederland en Europa in staat te stellen om essentiële grondstoffen en technologieën zelfstandig te verkrijgen en te gebruiken, en minder afhankelijk te zijn van externe leveranciers (lees: andere werelddelen of -machten). Voor verschillende koolstofbronnen gelden verschillende overwegingen op het gebied van strategische autonomie.

Zoals hierboven beschreven bij de indicator 'toegankelijkheid, beschikbaarheid en ontwikkelbaarheid van grondstoffen' heeft iedere grondstoffenstroom zijn uitdagingen qua beschikbaarheid. Maar naast voldoende beschikbaarheid van duurzame grondstoffen, speelt ook de productie van waterstof een grote rol in het strategisch onafhankelijk zijn. Waterstof is essentieel voor sommige duurzame routes en/of verhoogt de efficiëntie van het proces in zeer hoge mate. Bijlage D

⁶¹ PBL, (2024) [Trajectverkenning klimaatneutraal 2050](https://pbl.nl/publicaties/Trajectverkenning_klimaatneutraal_2050) | Planbureau voor de Leefomgeving (pbl.nl)

Relevante onderzoeken en rapporten

Dit document bevat input vanuit het expertteam. Zij hebben allemaal vanuit hun achtergrond veel kennis en ervaring op het gebied van de verduurzaming van de chemie. Deels is de visie ook in verschillende rapporten terug te vinden. Hieronder vindt u een lijst met belangrijke onderzoeken en rapporten. Deze rapporten en onderzoeken geven extra informatie ter ondersteuning van dit advies.

Wetenschappelijke artikelen

Bhattacharjee S et al	2023	Photoelectrochemical CO₂-to-fuel conversion with simultaneous plastic reforming. Nature Synthesis. 2. 182-192.
Bolhuis, W.D.	2024	Beleidseconomen moeten weten wat transitiefalen is. Economisch Statistische Berichten, 109 (4831), 136-139.
Gabrielli et al.	2020	The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO₂ Emissions Chemical Industry - Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59, 7033-7045.
Gabrielli, Rosa, et al.	2023	Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources
Harrandt et al.	2024	Evaluation of Recent Reports on the Future of a Net-Zero Chemical Industry in 2050.
Hermans et al.	2024	Pathways for the global chemical industry to climate neutrality.
J.P. Lange	2021	Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals
Kähler, F. and Carus, M. et al.	2022	CO₂ Reduction Potential of the Chemical Industry Through CCU. Editor: Renewable Carbon Initiative (RCI), April 2022. Available at: www.renewable-carbon-initiative.com
Lopez, Keiner, et al.	2023	From fossil to green chemicals: sustainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry.
Mandley et al.	2022	The implications of geopolitical, socioeconomic, and regulatory constraints on European bioenergy imports and associated greenhouse gas emissions to 2050.

(Onderzoeks)rapportages

Brightsite	2024	Transition Outlook 2024
------------	------	---

CE Delft	2024	Balanced policy support for biobased and recycled plastics.
DECHEMA	2017	Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry
IPCC	2023	Sixth Assessment Report.
IPCC	2022	Mitigation Pathways Compatible with Long-term Goals
IRENA (International Renewable Energy Agency)	2021	Innovation Outlook: Renewable Methanol
KNMI	2023	Klimaatscenario's voor Nederland.
Methanol Institute	2022	Carbon footprint of Methanol
PBL	2024	Trajectverkenning klimaatneutraal 2050 Planbureau voor de Leefomgeving (pbl.nl)
PBL	2024	Beschikbaarheid biograndstoffen in Nederland en de Europese Unie
PBL	2024	Klimaatrisico's in Nederland.
PBL	2021	Trends in Nederlandse voetafdrukken: een update
Plastics Europe	2023	The Plastics Transition - Our industry's roadmap for plastics in Europe to be circular and have net-zero emissions by 2050.
Royal Society	2024	Catalysing change: Defossilising the chemical industry
Sustainable Industry Lab		Groene Keuzes voor de Nederlandse Basisindustrie
TNO & EBN	2021	Ondergrondse Energieopslag in Nederland 2030 - 2050 Rapport Rijksoverheid.nl
TNO	2023	Green Maritime Methanol – A call to action

Andere type bronnen

EZK	Beleidsdocument	jan-24	De Nationale Technologiestrategie
Change Inc.	Nieuwsbericht	sep-20	Petrochemische industrie duurzamer door bio-olie uit restproduct lignine Change Inc.
Digital Refining	Nieuwsbericht	nov-24	Upgrading pyrolysis oil for greater plastic circularity
Market Reserach.com	Nieuwsbericht	feb-24	Pyrolysis Oil Market Size, Trends, Analysis, and Outlook to 2030- Uncover Country and Company Growth Opportunities in 2024 and Beyond
NRC	Nieuwsbericht	dec-24	Zevende faillissement in rampjaar plasticrecycling, maar sector is (nog) niet weg
EU Member states	Publicatie	apr-24	Joint Statement on a European Sustainable Carbon Policy Package Publication Government.nl
European Commision	Publicatie	2020, 2024	Impact Assessments' van de Europese Commissie over de EU-klimaatdoelen en paden naar klimaatneutraliteit (EC, 2020b, 2024b)
European Commission	Publicatie	2022	Safe and sustianable by design (SSbD framework)

Samenwerkende brancheorganisaties	Publicatie	dec-24	Call for Demand Creation to Drive Industry Investments
VNCI	Website		Chemie in Nederland