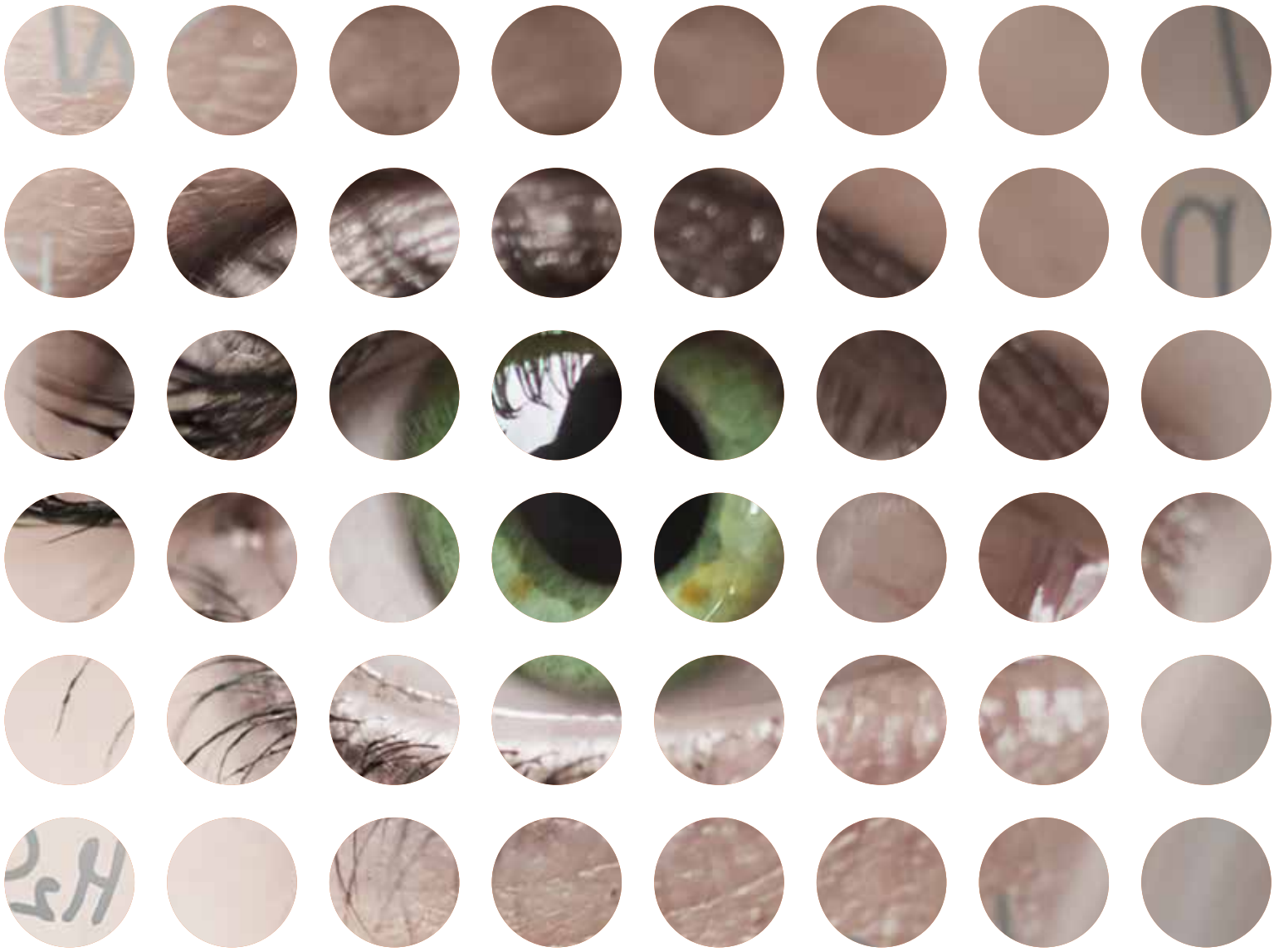


Brightsite Transition Outlook 2023



Inhoudsopgave

- 1. Schaarste duurzame grondstoffen uitdaging voor transitie chemische industrie** 04
Beschouwingen door René Slaghek, Technology Manager en Arnold Stokking, Managing Director Brightsite
- 2. Inzicht in de grondstoffentransitie van de Nederlandse basischemie met fictief industrieel complex CHEM-NL** 07
Als ammoniak en etheen in 2050 klimaatneutraal worden geproduceerd, waar komen duurzame grondstoffen dan vandaan? Welke vraagstukken moeten worden opgelost en welke knelpunten overwonnen?
Met modellen uit 3 cases van het Chemelot Integral Model System (CIMS) 14
- 3. Brightsite en de zes elkaar versterkende programmalijnen** 19
Recente ontwikkelingen van de zes programmalijnen van Brightsite. WATER-NL geeft een bredere blik op de uitdagingen rond water als schaars goed. MAATSCHAPPIJ-NL vraagt aandacht voor het maatschappelijke aspect. Keuzes staan niet op zich, maar beïnvloeden opties bij andere transitiepaden en hebben grote impact op mensen.
- 4. Nabeschouwing** 29
Met slechts 27 jaar tot de beoogde klimaatneutraliteit heerst schaarste aan grondstoffen, landoppervlak, CO₂-vrije energie, tijd en arbeid. Daarbij is de grondstoffentransitie voor de chemie onderdeel van een veel bredere maatschappelijke systeemtransitie met maatschappelijke acceptatie als de belangrijkste drijfveer achter de transitie.

Samenvatting

Gezamenlijk – bedrijven, kennisinstellingen en overheden – klimaatdoelen realiseren én een toekomstige duurzame circulaire economie vormgeven

Brightsite Transition Outlook (BTO) 2023 is geschreven voor bedrijven, kennisinstellingen, beleidsmakers en ondersteunende instanties, die samen de grondstoffentransitie voor de chemie gestalte geven. Een fictief chemiecomplex, CHEM-NL, met een omvang van de totale etheen- en ammoniakproductie in Nederland, verduidelijkt de benodigde hernieuwbare grondstoffen en energie.

Etheen en ammoniak zijn onmisbare basischemicaliën voor kunststoffen, de voedselvoorziening en hieraan gerelateerde bedrijfstakken. Dit maakt de vergroening ervan van maatschappelijk belang. De koolstofatomen (C) en waterstofatomen (H) die nu uit aardolie en aardgas komen, komen in de toekomst uit vier mogelijke hernieuwbare bronnen: afval, biomassa, atmosferische CO₂ en water. Met deze complexe grondstoffentransitie voor ogen, modelleert het Chemelot Integral Model System (CIMS) een fictief chemiecomplex CHEM-NL om optimale transitiepaden naar netto nul-emissie in 2050 te ontwerpen op basis van aannames rond kosten, technologieën en grondstofbeschikbaarheid. Productievolumina van kunststof en kunstmest in 2050 zijn op huidig niveau verondersteld.

Belangrijke bevindingen

- De grondstoffentransitie leidt tot schaarste aan beschikbare hernieuwbare grondstoffen, waardoor de inzet maximaal efficiënt moet worden ingericht. Voor de chemie is kunststofafval optimaal: verdere ontwikkeling van recycling en circulariteit heeft hoogste prioriteit.
- Wegens de lagere energie-inhoud van hernieuwbare grondstoffen neemt de behoefte aan CO₂-vrije energie significant toe, bovenop de behoefte voor de energietransitie.
- Deze extra energiebehoefte is te bedwingen met een rationale benadering van selectie en ontwikkeling van beschikbare grondstoffen (kunststofafval, diverse biograndstoffen, gemengd afval), op minimum-energievereisten voor opwerking. Zolang de voorraad strekt, daarna zal atmosferische CO₂ benut moeten worden, wat veel extra energie verlangt.
- Optimale integratie van opwerking van hernieuwbare grondstoffen voor kunststoffen kan leiden tot waterstof als co-product, bijvoorbeeld voor ammoniakbereiding.

- De transitie introduceert nieuwe technologieën, zoals elektrificatie in bestaande processen. Vergassing en plasma openen nieuwe routes naar chemicaliën en circulariteit en biomassa idem voor nieuwe, efficiënte biopolymeren en -applicaties.
- De grondstoffentransitie kan niet los worden gezien van een duurzame aanpak van industrieel watergebruik.
- De industrietransitie heeft grote gevolgen voor de maatschappij en vraagt een proactieve benadering van burgerparticipatie.

Belangrijke aanbevelingen

- Efficiënte circulariteit, waarbij zo efficiënt mogelijk met beschikbare energie en grondstoffen wordt omgegaan, vereist een systeembenadering. Ontwikkelingen moeten navenant en parallel plaatsvinden:
- Realisatie van grootschalige, efficiënte kringlopen van huidige en nieuwe (bio)materialen, met volumegroei en aanvulling van verliezen uit hernieuwbare bronnen: Grondstofwinning en productie van chemische bouwstenen uit afval, duurzame biomassa en voor de langere termijn uit atmosferische kooldioxide. Plus robuuste technologie voor productie van chemische bouwstenen en waterstof.
 - Elektrificatie van hoge temperatuur-processen, disruptieve technologieën zoals plasma-activatie
 - Ontwikkeling van bijbehorende infrastructuur
 - Ontwikkeling van verantwoord industrieel watergebruik
 - Organisatie van maatschappelijk draagvlak door participatie
- Gezien de vraag naar beperkt beschikbare hernieuwbare energie en grondstoffen zal schaarste zich waarschijnlijk verscherpt manifesteren.
- Regulering van de vraag uit verschillende sectoren. Dit is randvoorwaardelijk voor een efficiënte maatschappelijke transitie naar een duurzame circulaire samenleving.



René Slaghek
Technology Manager Brightsite

Schaarste duurzame grondstoffen uitdaging voor transitie chemische industrie richting 2050

De temperatuur op Venus is ongeveer 500°C bij een druk van zo'n 90 atmosfeer: het broeikaseffect is daarvoor verantwoordelijk. De atmosfeer bevat 96% koolstofdioxide (CO₂) en een wolkendek met zwavelzuur en stof dat zonnewarmte gevangen houdt. Toen de planeten zich miljarden jaren geleden vormden, hadden Venus en de aarde een vergelijkbare atmosfeer, naar men schat 25-50% CO₂.

Waarschijnlijk zijn op Venus door vulkanische activiteit grote hoeveelheden CO₂ in de atmosfeer terechtgekomen, die het broeikaseffect versterkten. De stijgende temperatuur heeft het water de atmosfeer uitgedreven. Op de aarde ontwikkelde zich ondertussen leven, eerst kleine schaaldiertjes en later planten. Deze levensvormen zorgden voor vastlegging van CO₂ uit de atmosfeer, waardoor de CO₂-concentratie daalde (naar circa 280 ppm-deeltjes per miljoen-rond 1750 voor de industrialisatie). En ze verhoogden de zuurstofconcentratie naar zo'n 21% nu. Al die CO₂ uit de atmosfeer is gedurende miljarden jaren terechtgekomen in de bodem in de vorm van gesteentes – de mergel in Zuid-Limburg en de White Cliffs of Dover – en enorme voorraden olie, gas en kolen.

De laatste honderdvijftig jaar heeft de mens ontdekt hoe deze rijkdommen bijdragen aan de verhoging van onze welvaart en comfort. Mergel zetten we om in cement om huizen, gebouwen, bruggen en wegen te bouwen. Olie, gas en kolen gebruiken we voor energievoorziening en de productie van allerlei producten. Het gebruik van deze fossiele grondstoffen brengt CO₂ echter weer terug in de atmosfeer en sneller dan de aarde het kan absorberen. Daardoor is de CO₂-concentratie inmiddels gestegen (tot boven de 400 ppm) en dat veroorzaakt klimaatverandering. Om de klimaatverandering te beteugelen, streven we ernaar CO₂-emissie uit fossiele grondstoffen (kalksteen, olie, gas en kolen) terug te dringen. Uiteindelijk willen we geen gebruik meer maken van fossiele grondstoffen. Klinkt logisch, maar zijn we in staat om, met een groeiende wereldbevolking, onze welvaart te behouden of zelfs uit te bouwen als we stoppen met het gebruik van fossiele grondstoffen?

Waar komen de niet-fossiele grondstoffen voor onze energie- en materialenbehoefte vandaan?

We staan pas aan het begin van de transitie naar duurzame energie en groene grondstoffen en het vervangen van 'fossiel' is een enorme uitdaging. Fossiele koolstof zit verweven in onze samenleving; slechts 14% komt momenteel van hernieuwbare bronnen. Hernieuwbare koolstof en energie zijn schaars.

De hoeveelheden beschikbare niet-fossiele koolstof uit recycling en biomassa voldoen bij lange na nog niet, hetzelfde geldt voor duurzame energie. Er zal strijd ontstaan om groene grondstoffen en duurzame energie, met schaarste waarop velen vanuit verschillende optiek een beroep doen.

Versnelling in verduurzaming is alleen mogelijk als we in staat zijn de schaarste aan groene koolstof en energie weg te nemen én inefficiënt gebruik kunnen voorkomen.

Hiervoor is regie over sectoren heen noodzakelijk. Als Brightsite komen we met oplossingen, onderbouwd door kwantitatieve analyses. We vinden de beste transitiepaden om zo efficiënt mogelijk om te gaan met hernieuwbare bronnen. In elk van onze zes programmalijnen zoeken we uit welke (technologische) keuzes er, samen met de maatschappij, gemaakt moeten worden om de chemie in Nederland te verduurzamen. Daarvoor is een systeembenadering ontwikkeld die ons helpt grip te krijgen op de vele mogelijkheden en acties en die laat zien wat de economische- en klimaateffecten van keuzes en beleid zijn. Daarbij kijken we verder dan het systeemniveau van Chemelot. De focus ligt op de Nederlandse



Arnold Stokking
Managing Director Brightsite

chemische industrie en consequenties op nationaal niveau, inclusief veiligheid en maatschappelijke impact. De transitie is complex en keuzes hebben grote impact. Zo is een elektrische auto tot ruim drie keer zo energie-efficiënt als een waterstofauto: met de keuze voor waterstof 'kannibaliseer' je schaarse, schone energie die niet meer gebruikt kan worden door andere sectoren of applicaties.

De transitie naar klimaatneutraal vergt een visie en vele keuzes richting het einddoel in 2050 én tussenoplossingen om daar te kunnen komen.

De prioriteit rond alternatieve grondstoffen ligt nu op plastic afval, dit lijkt het meest op fossiele grondstof en kan efficiënt worden opgewerkt voor bestaande installaties. Biogene bronnen, mits duurzaam, vormen de 'next best' route en zullen later meer aandacht moeten krijgen, omdat er simpelweg veel te weinig afval voor de productie van nieuwe kunststoffen beschikbaar is. In de toekomst kan ook CO₂-afvangst uit de lucht een plaats krijgen, indien er voldoende CO₂-vrije energie is voor dit energie-intensieve proces.

Transitie van de chemie: energie én grondstoffen

De huidige chemische industrie is deel van een **lineaire economie** die fossiele brandstoffen (olie, aardgas en steenkool) onttrekt aan de aarde en grotendeels verbrandt om in onze energiebehoefte te voorzien. Om nationale- en Europese klimaatdoelen te halen, moet met het verbranden van fossiel materiaal worden gestopt. Dit dwingt de chemische industrie over te schakelen op alternatieve energiebronnen, zoals CO₂-vrije elektriciteit of energiedragers.

Deze **energietransitie** elimineert CO₂-emissies op de chemiesite, de zogenaamde Scope 1-emissies¹. De chemie gebruikt aardolie en aardgas ook als grondstoffen en verwerkt dat tot materialen. Op die manier komt verse fossiele koolstof ook in kunststoffen terecht. Upstream van de chemie komt CO₂ en methaan vrij bij de olie- en aardgaswinning en downstream als kunststofafval wordt verbrand of in stortplaatsen of het milieu ontleedt: de zogenaamde Scope 3-emissies. Ook deze emissies moeten worden voorkomen: voor een chemiesite zijn deze Scope 3-emissies zelfs veel groter dan Scope 1-emissies.

Koolstof op zich afschaffen kan echter niet: er bestaat géén alternatief, maar er zijn wél andere koolstofbronnen dan fossiele olie of aardgas. De omschakeling van de chemische industrie op die alternatieven is de zogenaamde grondstof- of koolstoftransitie.

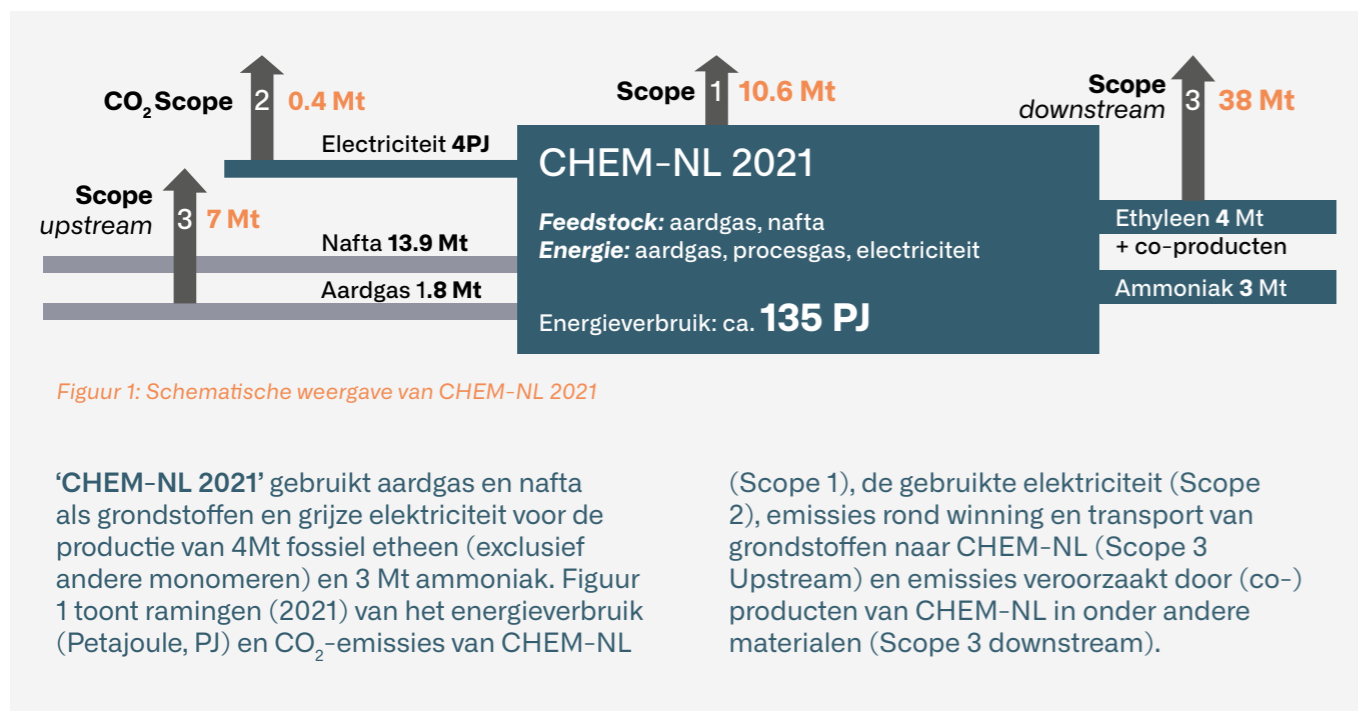
Alternatieve grondstoffen zeer schaars
Alternatieve grondstoffen zijn bijvoorbeeld biomassa en CO₂ uit de atmosfeer. Hiermee is een lineaire economie waar niet wordt gerecycled nog steeds mogelijk. *'Geen fossiele energie meer, koolstof alleen uit biomassa en atmosferische CO₂; alle kunststof bio-afbreekbaar maken of als afval verbranden voor energierugwinning'*: is zo'n toekomstbeeld niet het gemakkelijkst? Er wordt

veel gesproken over een **circulaire economie**, vaak als iets vanzelfsprekends. In een circulaire economie wordt kunststofafval als grondstof (her) gebruikt en niet verbrand en worden biomassa en atmosferische CO₂ toegevoegd om verliezen aan te vullen. Is circulair beter dan lineair? Ja. Is circulair *altijd* beter? Nee, zeker niet. Wanneer dan wél en wanneer niet, en waarom? En hoe is de grondstoffentransitie voor de chemie naar een circulaire economie te stimuleren? Welk beleid is daarvoor nodig? Dit zijn zeer relevante vragen.

Alleen een integrale aanpak kan tot antwoorden leiden, en belangrijker: tot transparantie rond problematiek en keuzemogelijkheden, tot rationele hefbomen voor stimulering van de grondstoffentransitie binnen de chemie en andere maatschappelijke sectoren. Voor nader onderzoek van deze complexe uitdagingen is een fictieve chemiesite genaamd **CHEM-NL** in het leven geroepen. CHEM-NL produceert de Nederlandse productie van ammoniak (3 Megaton, Mt, per jaar) en etheen (4 Mt), zowel in 2021 als in 2050.

Deze Brightsite Transition Outlook presenteert waarom schaarste en duurzame circulariteit belangrijk zijn en wat nodig is om klimaatneutraliteit te bereiken.

¹ Zie Brightsite Transition Outlook 2022 voor toelichting over de emissies Scope 1, 2 en 3.



‘CHEM-NL 2021’ gebruikt aardgas en nafta als grondstoffen en grijze elektriciteit voor de productie van 4Mt fossiel etheen (exclusief andere monomeren) en 3 Mt ammoniak. Figuur 1 toont ramingen (2021) van het energieverbruik (Petajoule, PJ) en CO₂-emissies van CHEM-NL

(Scope 1), de gebruikte elektriciteit (Scope 2), emissies rond winning en transport van grondstoffen naar CHEM-NL (Scope 3 Upstream) en emissies veroorzaakt door (co-) producten van CHEM-NL in onder andere materialen (Scope 3 downstream).

Grondstoffentransitie niet los te zien van nationale energietransitie

Wat betekent het in praktijk dat de grondstoffenvoorziening van CHEM-NL in 2050 gebaseerd zal zijn op recycalaat, biomateriaal of CO₂, aangevuld met waterstof en elektriciteit? Nog niet bekend is welke combinaties van grondstoffen het zullen worden. Ook is niet bekend hoe etheen en ammoniak dan worden geproduceerd: het technologielandschap kan flink veranderen.

Een stoomkraker maakt bijvoorbeeld meerdere kunststofmonomeren (propeen, etc.). In 2021 belandt zo ruwweg 2/3 van de koolstof uit nafta in kunststoffen (9 Mt uit 13,9 Mt). In 2050 ligt dit complexer. Elektrificatie en niet-fossiele nafta verhogen bijvoorbeeld de efficiency van stoomkraken. Directe routes naar etheen vermijden coproductie, maar geven andere koolstofverliezen.

De infographic beoogt hierin inzicht te geven. De huidige fossiele productie van 9 Mt kunststoffen wordt fictief (2050) gerealiseerd uit de drie typen niet-fossiele grondstoffen afzonderlijk: recycalaat, biomassa, of CO₂ uit lucht. De vergelijking betreft de fundamentele consequenties, zoals benodigde hoeveelheden en de afhankelijkheid van grondstofopties van de beschikbaarheid van CO₂-vrije energie. Buiten stoomkraken zijn ook andere processen mogelijk naar kunststoffen. Deze shortcut-routes concurreren hiermee qua integraal energie- en koolstofrendement tussen bron en materiaal (zijdelings vermeld in de infographic). Modellen zoals CIMS (Chemelot Integrated Model System) zijn ontwikkeld om met deze complexiteit om te kunnen gaan.

Op weg naar 2050

In de transitie naar 2050 bestaan de lineaire fossiele economie en een, vooralsnog zeer bescheiden, duurzame economie aanvankelijk naast elkaar. Er is voorlopig te weinig maatschappelijk afval en biomassa beschikbaar als grondstof. Tevens zijn hulpbronnen en omzettingstechnologieën onderontwikkeld en ontbreekt integraal beleid rond de rol van biomassa en CO₂-vrije energie bij de transitie. Het gevaar hierbij is dat voorlopig nog keuzes kunnen worden gemaakt die niet leiden tot de gewenste circulariteit en duurzaamheid van de economie. Bovendien ontbreekt nog uitzicht op tijds beschikbare CO₂-vrije elektriciteit en circulaire infrastructuur. Toch zal de nieuwe economie de oude tijds moeten overnemen. Daarvoor zijn vele technologieën in ontwikkeling, elk met hun eigen grondstoffengebruik en energieconsumpties, waarbij het de vraag is in hoeverre die passen bij een zo efficiënt mogelijk ingerichte transitie naar klimaatneutraliteit.

Technische ontwikkelingen bieden een stuwmeer aan mogelijkheden en kansen, maar leiden ook tot evenveel barrières van complexiteit, uiteenlopende belangen en ontbrekende incentives (stimulering) vanuit de af te bouwen lineaire economie. Samen remmen deze de voortvarende ontwikkeling van circulariteit in de chemie.

Optimale transitieroute berekenen met CIMS

Systematische modelbenadering

Brightsight heeft modelbenaderingen ontworpen om de grondstoffentransitie van nu naar 2050 op hoofd- en bijzaken te modelleren. Deze BTO toont **CIMS: een modelbenadering voor transitiepadoptimalisatie**. Het start vanuit de huidige, fossiele commodities uit aardolie en aardgas. CIMS heeft (scenario-gebaseerde) integrale **technologiemappen**² en **infopakketten**³ als input en selecteert optimale transitieroutes vanaf het fossiele heden naar een eindsituatie in 2050 met netto nul Scope 1-emissies. CIMS berekent de meest economische manier om die eindsituatie te bereiken én houdt rekening met de kosten die elk jaar onderweg naar 2050 met zich meebrengt, dus niet alleen met het optimale eindpunt. Het optimale transitiepad en

eindpunt hangen af van het gebruikte infopakket: vooraf gemaakte aannames met betrekking tot prijzen, beschikbaarheid van hernieuwbare hulpbronnen, de opgenomen bestaande en nieuwe technologieën, hun beschikbaarheid voor grote volumina en vigerend overheidsbeleid. Resultaten van CIMS-modellering dienen allereerst om consequenties van gemaakte aannames te illustreren en hiervan te leren. De beschikbaarheid in de tijd van hulpbronnen, technologieën en beleidspraktijken spelen hierbij een belangrijke rol, gezien de keuzes die op basis daarvan in de tijd worden gemaakt. En als maatschappelijke ontwikkelingen in de praktijk zouden vertragen of uitblijven, zijn de consequenties voor de transitie van CHEM-NL zichtbaar te maken.

De infographic op de volgende pagina geeft inzicht in toekomstige uitkomsten volgend uit verondersteld succes, zoals vereiste hoeveelheden grondstoffen en energie en de afhankelijkheid van grondstofopties van de beschikbaarheid van CO₂-vrije energie. Cijfers voor CHEM-NL 2050 hangen af van te maken keuzes. Als CCS in 2050 verleden tijd is, gebruikt klimaat-neutraal CHEM-NL in 2050 een combinatie van recycalaat (kunststofafval), biomateriaal (akkers, bosbouw en hun afval) of CO₂ uit lucht, aangevuld met CO₂-vrije elektriciteit en groene waterstof voor de productie van groene ammoniak, etheen en co-producten.

²Een set van duurzame technologieën, passend bij- en geïntegreerd met het CHEM-NL complex

³Zoals aannames omtrent prijzen en belastingen, limiteringen aan emissies, beschikbaarheid van grondstoffen en technologieën in de tijd.

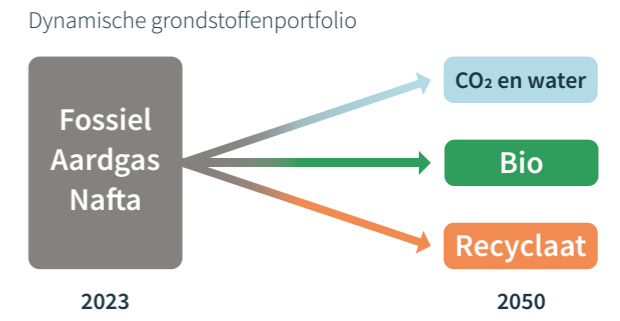
De grondstoffentransitie voor de chemie, inzichtelijk gemaakt voor etheen en ammoniak

Etheen- en ammoniak vormen de onmisbare basis voor kunststofapplicaties, de wereldwijde voedselvoorziening en gerelateerde bedrijfstakken. De transitie van olie en gas naar duurzame grondstoffen in 2050 leidt tot schaarste aan beschikbare hernieuwbare grondstoffen. Toekomstprojecties voor de huidige Nederlandse productie, indien 100% wordt uitgegaan van de drie mogelijke oplossingsroutes afzonderlijk, illustreren dit. Verschillen tussen routes zijn belangrijke indicatoren voor besluitvorming en regie, inclusief factoren als nieuwe technologie en menselijk gedrag.

Verhoudingen:

1 PJ (petajoule) energie brengt 1.200 olympische zwembaden aan de kook

1 Mt (megaton) staat gelijk aan een miljard kilogram



Wat is de haalbare periode?	Wat is de grondstofvraag?	Wat is het beslag op hulpbronnen?	Wat is de integrale energievraag?	Wat zijn grote uitdagingen?	Wat zijn de technologieën?	Wat zijn de gamechangers?
Grondstof Recycelaat Op korte termijn haalbaar		Plastic afval: 11,5 Mt Huishoudelijk afval: 9 Mt (voor waterstof) <ul style="list-style-type: none"> • Consumenten • Logistiek • Opslagruimte 	Herkomst energie <ul style="list-style-type: none"> Uit grondstoffen: 650 PJ Uit elektriciteit: 100-250 PJ 	<ul style="list-style-type: none"> • Sluiten van kringlopen • Commoditisering • Technologie-opschaling • Afvalwater • Einde-afval status 	Recycling <ul style="list-style-type: none"> • Mechanisch • Solvolyse • Pyrolyse Elektrisch kraken <ul style="list-style-type: none"> • Vergassing • Waterelektrolyse 	7R-Model <ul style="list-style-type: none"> Rethink Reduce Repair Reuse Refurbish Recycle Recover
Grondstof Biomateriaal Op midden/lange termijn haalbaar		Biomassa: 45 Mt <ul style="list-style-type: none"> • Bos: 90.000 km² (aanwas) of • Akker: ca. 25.000 km² 	Herkomst energie <ul style="list-style-type: none"> Uit grondstoffen: 800 PJ Uit elektriciteit: 150 PJ 	<ul style="list-style-type: none"> • Duurzame productie • Landgebruik • Applicatieontwikkeling • Grondstof vs. brandstof 	Disruptieve routes <ul style="list-style-type: none"> • Biopolymeren gebaseerd • Plasma-technologieën 	Nieuwe chemie Nieuwe ondernemers
Grondstof CO₂ en water Op lange termijn haalbaar		Kooldioxide uit lucht: 32 Mt Waterstof uit water: 4,8 Mt <ul style="list-style-type: none"> • Lucht: 44.000 km³ • Water: 43.000.000 m³ • Elektriciteit: 10 MW-molens: 5.000 • Zeeoppervlak: 5.000 km² 	Herkomst energie <ul style="list-style-type: none"> Uit grondstoffen: 0 PJ Uit elektriciteit: 1.050 PJ 	<ul style="list-style-type: none"> • Enorme elektriciteitsbehoefte • CO₂-afvangst technologieën • Efficiënte productietechnologieën 	CHEM-NL 2050 <ul style="list-style-type: none"> C1 chemie - Syngas <ul style="list-style-type: none"> • Methanol to olefines • Fischer-Tropsch • Direct Air Capturing 	CO ₂ -vrije energie Beschikbaarheid
Grondstof Aardolie en -gas De huidige situatie		Nafta uit aardolie: 13,9 Mt Aardgas: 1,8 Mt <ul style="list-style-type: none"> • CO₂-opslag: door het wereldwijde ecosysteem 	Herkomst energie <ul style="list-style-type: none"> Uit grondstoffen: 750 PJ Uit elektriciteit: 30 PJ 	<ul style="list-style-type: none"> • Van lineaire naar circulaire ketens • Uitfasering van fossiel • Effectieve transitiereregulering 	<ul style="list-style-type: none"> • Stoomkraken • SMR • Haber-Bosch • CCS CHEM-NL 2023	3 Mt ammoniak 4 Mt etheen etc. voor kunstmest en 9 Mt kunststoffen

Cijfers zijn indicatief. Gegevens zijn geaggregeerd, gebaseerd op openbare informatie en/of eigen berekeningen en geven geen exacte omstandigheden weer. De huidige stand van technologie is vaak ongunstiger.



CHEM-NL in CIMS

CIMS' eerste versie is ontwikkeld voor Chemelots producten en processen. De fictieve site CHEM-NL is vervolgens in CIMS gemodelleerd, gebruikmakend van openbare informatie over technologieën op Chemelot voor productie van etheen (stoom-methaanreformer (SMR) en Haber-Bosch). Dit is opgeschaald naar nationale jaarlijkse productiecapaciteiten van 3 Mt ammoniak (5 identieke plants) en 4 Mt etheen (6 identieke plants). Iedere plant kan afzonderlijk worden vergroend. Dit komt niet exact overeen met de Nederlandse ammoniak- en etheenproductie, maar beïnvloedt de resultaten niet.

Synergie in beeld brengen

Kenmerkend voor CIMS is dat gedurende de transitie rekening wordt gehouden met huidige en/of toekomstige integratie en synergiemogelijkheden tussen processen (met uitzondering van gedetailleerde warmte-integratie). Dit is geïnspireerd door procesintegraties op Chemelot en werd doelbewust behouden voor CHEM-NL om mogelijke toekomstige synergiemogelijkheden tussen de productieroutes voor etheen en ammoniak kwantificeerbaar te maken. Deze integratie is niet aanwezig op nationaal niveau en maakt CHEM-NL een virtueel model dat los staat van specifieke bedrijfsterrinen in Nederland en uitermate geschikt om transitiepaden mee vorm te geven.

Routes naar klimaatneutraal: de rol van de technologiemap

CIMS bevat een 'technologiemap' van CHEM-NL, een technisch modelnetwerk van:

1. CHEM-NL in 2021, met etheen en ammoniakproductie, de bijbehorende massa- en energie geïntegreerde consumptie van energie en grondstoffen en CO₂-emissie Scope 1 en 2
2. Geselecteerde (op basis van nu bekende) realistische technologieën met geïntegreerde alternatieve grondstofvoorzieningen (met bijbehorende technologieën en CO₂-vrije energievoorziening bijvoorbeeld voor elektrificatie van processen) die kunnen bijdragen aan een klimaatneutraal CHEM-NL:
 - Recycelaat (plastic afval, municipal solid waste (MSW)) voor ethyleen- en waterstofproductie
 - Biomassa, in de vorm van rechtstreeks in krakers te gebruiken bionafta (import) of als bron voor waterstof (via vergassing)
 - CO₂ uit MSW of afvangst uit lucht; conversie naar Fischer-Tropsch nafta of MtO (Methanol to Olefins) voor etheenproductie
 - Een selectie van vergroeningsopties: vervanging van fossiele feedstock van bestaande technologieën of (zeer beperkt)

via nieuwe chemie zoals etheen uit methaan via plasma-technologie

- Elektrificatie van hoge-temperatuurprocessen (stoomkrakers, SMR), CO₂-opslag via CCS

De infographic op pagina 10 illustreert de vereisten aan energie en grondstoffen voor de productie van drie alternatieven voor fossiele nafta uit achtereenvolgens 100% recycelaat, 100% biomateriaal of 100% CO₂ als koolstofbron. CIMS' technologiemap bevat bestaande en in ontwikkeling zijnde toekomstige routes, die ook gebruik kunnen maken van de mengvormen, en ook inclusief opties voor etheenproductie buiten nafta om (in deze BTO niet uitputtend).

De rol van het informatiepakket (scenario's)

Naast technologiemogelijkheden zijn aannames nodig over de beschikbaarheid van (alternatieve) grondstofvolumes, (CO₂-vrije) elektriciteit, nieuwe logistiek en specifieke technologieën in de tijd. Voor economische evaluaties zijn aannames nodig over grondstof- en energieprijzontwikkelingen, over wetgeving met betrekking tot CO₂-emissies en belastingen. **Toekomstscenario's** zijn een manier om daarmee om te gaan: logische, consistente verhalen die de weg vrijmaken voor verandering. De scenariokeuze bepaalt verregaand de inhoud van het 'informatiepakket' (parameterwaarden) waarmee CIMS wordt gevoed. Er zijn uiteenlopende informatiepakketten mogelijk bij één technologiemap (multi-perspectieven).

Deze BTO hanteert een 'ideaal toekomstscenario'. Europa en de samenleving dringen aan op realisatie van de Klimaatakkoorden, met sterke ondersteunende wetgeving waar hernieuwbare hulpbronnen worden ontwikkeld tot grondstoffen en wereldwijd gedeeld en waar fossiele bronnen worden uitgefaseerd.

Dit scenario is wellicht niet realistisch, maar heeft voordelen: het potentieel voor de chemische industrie wordt zichtbaar, de gevolgen voor benodigde middelen worden helder en lessen kunnen worden getrokken, zoals 'wat moet bijtijds klaar zijn opdat dit scenario kan materialiseren' (backcasting). Ook kunnen **afwijkingen van ideaal** worden aangenomen en worden onderzocht, zoals barrières en inperkingen, vertragingen in de materialisatie van alternatieve energie en grondstoffen. Daaruit blijkt wat de gevolgen zijn

voor de chemie en hoe de industrie daarop kan inspelen.

Technologiemap en infopakket van CIMS zijn vergelijkbaar met verkeerswegaanpakken en verkeersinformatie, maar zeggen nog niets over de te bereizen route.

Verwachte CO₂-emissies Scope 1 van CHEM-NL

Op basis van de aannames in het infopakket voert CIMS een boekhouding van toekomstige CO₂-emissies Scope 1 die behoren bij elke route naar 2050 (Figuur 2).

CIMS registreert deze emissies door de verschillende soorten gevormde CO₂ bij elkaar op te tellen. Verbranding of vergassing van fossiele koolstof geeft positieve emissie, van biobased koolstof een nul-emissie. Verbranding van plastic afval, nu vrijwel fossiel, telt ook als positieve emissie: een bewust conservatieve aanpak. Het biogene gehalte van gerecyclede plastic zal immers in de tijd toenemen, waardoor de fossiele Scope 1 emissie bij verbranding afneemt. Afgevangen en opgeslagen CO₂ (CCS) telt neutraal, behalve van biogene CO₂ die negatief meetelt.

Registratie van CO₂-emissies in CIMS in een toekomstig technologieland is vergelijkbaar met CO₂-emissies van autoverkeer. Brandstofverbruik is minder en emissies en kosten zijn lager indien steile, kronkelende bergwegen of tolheffingen kunnen worden vermeden door middel van shortcuts, tunnels en omleidingen. Dát is wat CIMS op het technologienetwerk naar 2050 'navigeert' en registreert.

CIMS navigeert optimale routes naar 2050

In deze BTO optimaliseert CIMS transitieroutes op **economische basis** (Net Present Value) tot netto nul-emissie in 2050: een randvoorwaarde. Alle bijbehorende prijsaannames maken deel uit van het infopakket. Tot 2030 zijn deze ontleend aan het middenprijsscenario van de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022 van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) of uit andere openbare

bronnen indien niet in de KEV. Van 2030 tot 2050 is een fictieve belasting op gebruik van oorspronkelijke fossiele grondstof doorgevoerd: een simulatie van een geleidelijke verhoging van de prijs van fossiele feedstock. Ook werden vrije emissierechten lineair afgebouwd tot nul in 2050, parallel aan een stijgende CO₂-prijs.

Tussentijdse interacties met CIMS

Additional technische of economische input is mogelijk of wenselijk. Vaak vinden op basis van eerste CIMS-resultaten interventies plaats: aanpassing van CIMS-input in het informatiepakket. Op die manier kunnen scenario's en resultaten interactief worden geoptimaliseerd: 'build the bridge while you drive'.

	Fossiel	Biogeen incl. biogeen afval	Plastic afval
Verbranding/ vergassing	positief	nul	positief
CCS	nul	negatief	nul

Figuur 2: Classificatie van CO₂ emissie in CHEM-NL, afhankelijk van herkomst koolstof en het gebruik

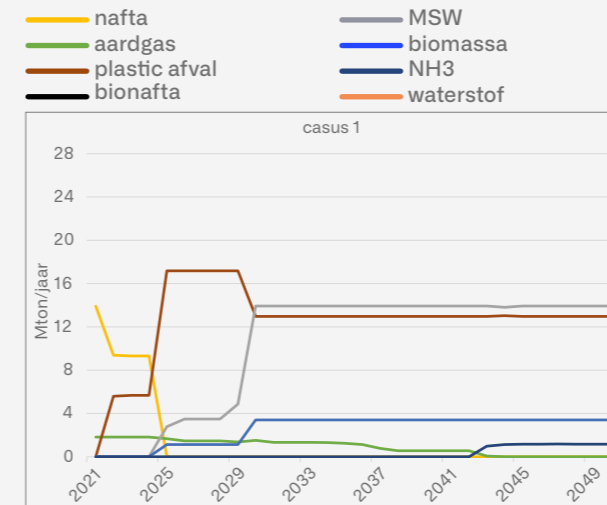
De transitie van CHEM-NL in beeld

Om interactief gebruik van CIMS te verduidelijken, worden op de volgende pagina's drie casussen gepresenteerd. Alle casussen maken gebruik van dezelfde technologiemap en infopakket. Casus 1 start eenvoudig: de beschikbaarheid van alternatieve grondstoffen (infographic) is onbeperkt. Vervolgens wordt eerst de beschikbaarheid van plastic afval gelimiteerd: casus 2, en daarna die van MSW (huishoudelijk afval, aanname: constant 60% biogene koolstof tot 2050): casus 3. CIMS-berekeningen zijn geen afspiegeling van een te verwachten werkelijkheid, maar vormen een basis voor analyses en verfijningen, zoals zal worden geïllustreerd.

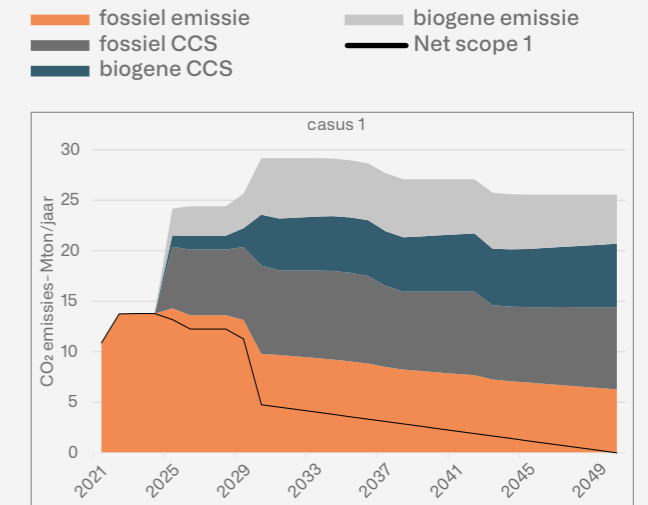
Casus 1: Geen beperkingen op grondstoffen

Grondstoffen voor het berekende optimale transitiepad zijn weergegeven in Figuur 3. Fossiele nafta en aardgas worden volledig uitgefaseerd. Etheen wordt vooral geproduceerd uit plastic afval (pyrolyse-olie) wat in 2050 een enorme vraag naar plastic afval geeft: 13 Mt. En in mindere mate uit MSW (vergassing, Fischer-Tropsch). De krakers worden deels geëlektrificeerd. Bij ammoniak is het complexer. Een deel van de ammoniakproductie wordt vervangen door groene ammoniakimport (39%). Het benodigde waterstof wordt nog gedeeltelijk geproduceerd door stoom-methaanreforming, maar aardgas wordt vervangen door bijproduct methaan van stoomkrakers en Fischer-Tropsch. De reformers worden geëlektrificeerd. De vraag naar waterstof verdubbelt ruim wegens extra behoefte bij pyrolyse (hydrotreatment) en Fischer-Tropsch. Extra waterstof wordt geproduceerd door vergassing van biomassa en MSW, wat ook een enorme vraag naar MSW geeft in 2050: 14 Mt voor koolstof én waterstofproductie.

Figuur 4 toont de overeenkomstige CO₂-emissie Scope 1. Netto nul-emissie in 2050 is bereikt via een combinatie van reductie van positief tellende (zie Figuur 2) fossiele CO₂-emissie, neutraal tellende CCS, van fossiele CO₂, neutraal tellende biogene emissies, alsmede negatief tellende biogene CCS die resterende positief tellende fossiele emissie compenseert. Omvangrijke CCS is financieel het aantrekkelijkst. Dit gaat gepaard met autotherme pyrolyse van plastic afval, dat toename van Scope 1-emissies veroorzaakt: rookgas telt (conservatief) als 100% fossiel. Zuivere CO₂ van SMR-procesgas werd gebruikt voor CCS. Bij rookgas is dat ongunstig: de lage CO₂-concentratie (6%), vereist meer investering en energie.



Figuur 3: Grondstoffen import voor casus 1: geen beperkingen in beschikbaarheid



Figuur 4: Reductie van Scope 1 CO₂-emissies van CHEM-NL tot nul tussen 2021 en 2050, bij geen beperkingen op grondstoffen

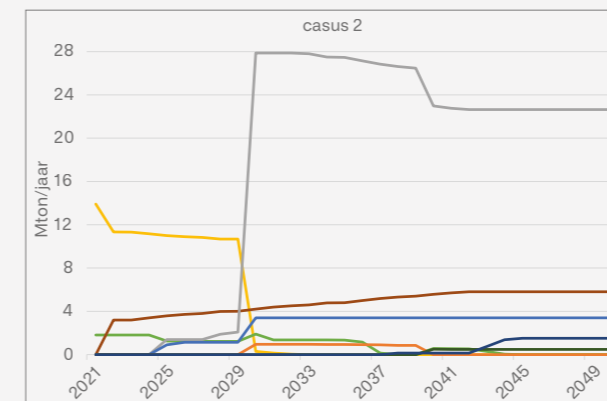
Casus 2: Beperkte beschikbaarheid plastic afval

Zelfs alle plastic afval uit Nederland (thans een grote netto (poly)etheen exporteur) zou ontoereikend om de krakers van CHEM-NL van voldoende pyrolyse-olie te voorzien: import zou vereist zijn. Hoeveel beschikbaar komt en tegen welke prijs is echter onzeker. Daarom is een vervolgsimulatie uitgevoerd waarin de plastic afval hoeveelheid werd beperkt tot 40% van de etheenproductie in 2050 (TNO⁴) bij een lineaire stijgende beschikbaarheid 2021-2050. Vraag is wat dan de beste optie wordt en hoe dit de benodigde middelen beïnvloedt.

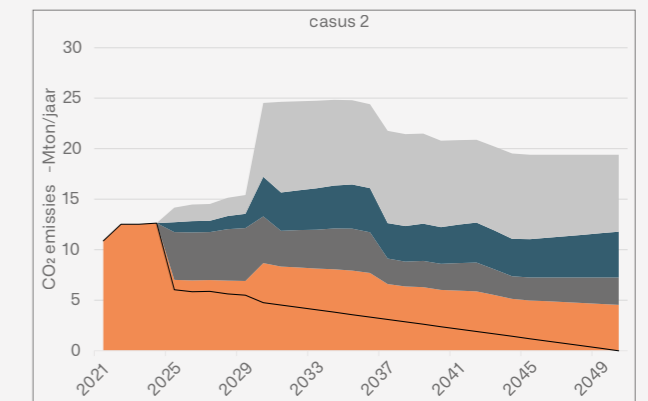
Optimale transitiepad verschuift

De benodigde extra koolstof voor de etheenproductie komt dan uit MSW: via vergassing en Fischer-Tropsch en via plasmatechnologie (na 2040 beschikbaar). De resulterende MSW vraag is enorm: maar liefst 23 Mt in 2050. Plasmatechnologie gebruikt methaan bijproduct uit stoomkrakers en Fischer-Tropsch als grondstof voor etheen. Het gevolg voor de ammoniakproductie is dat er minder methaan beschikbaar is voor de geëlektrificeerde SMR dan in casus 1, omdat de plasmatechnologie ook methaan als grondstof gebruikt, en dat er minder waterstof beschikbaar is voor Haber-Bosch vanwege de grotere vraag naar waterstof voor de Fischer-Tropsch-reactie. Dit betekent dat minder ammoniak kan worden geproduceerd en dat moet worden overgeschakeld op ammoniakimport (50%).

De waterstofvraag is nog hoger dan in casus 1 en wordt nu ook deels geïmporteerd. Een ander opvallend verschil met casus 1 is de afgenomen CCS (7 in plaats van 14 Mt in 2050): zie Figuur 6. Dit komt omdat pyrolyse in casus 1 veel fossiele CO₂-emissie genereert voor CCS. Deels maakt dit plaats voor meer biogene emissies uit MSW en emissievrije etheenproductie plasmatechnologie.



Figuur 5: De vraag naar grondstof in casus 2, bij beperkte beschikbaarheid van plastic afval



Figuur 6: Reductie van Scope 1 CO₂-emissies van CHEM-NL tot nul tussen 2021 en 2050, bij casus 2 met beperkte beschikbaarheid van plastic afval

Casus 3: Beperkte beschikbaarheid plastic afval & MSW

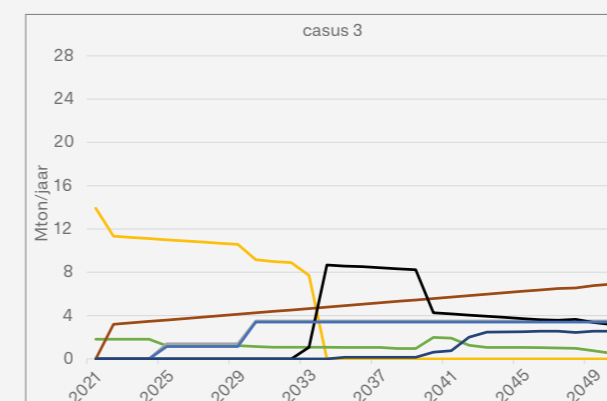
Terwijl de maatschappij afvalreductie nastreeft, stijgt de vraag naar MSW in casus 2 tot 23 Mt in 2050. Beschikbaarheid daarvan is ook niet aannemelijk. In een derde modelrun werd daarom ook MSW beperkt: tot wat in 2021 in Nederland beschikbaar was: 199 kg/inwoner oftewel 3,5 Mt (bron CBS).

Plaats voor bionafta, meer import ammoniak

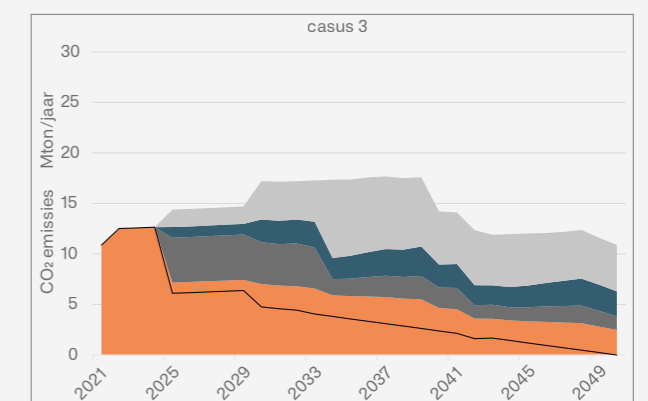
Wanneer plastic afval en MSW beide worden beperkt, vormen bionafta (stoomkraken) en vrijkomend methaan (plasmatechnologie) additionele routes naar etheen. Bionafta (naast de beperkte hoeveelheid plastic afval en huisvuilroutes) vervangt nafta volledig vanaf 2034, een paar jaar na de invoering van de belasting op fossiele grondstoffen (Figuur 7). Bionafta wordt later zelf gedeeltelijk vervangen door etheenproductie met plasmatechnologie (vanaf 2040). Zelfs in 2050 wordt daartoe nog wat fossiel aardgas geïmporteerd.

De gevolgen voor ammoniak zijn groot. In het optimale transitiepad worden procesgas methaan en lokaal geproduceerd waterstof ingezet voor etheenproductie in plaats van ammoniak. In 2050 heeft CHEM-NL geen SMRs meer, wordt ammoniak voor 85% geïmporteerd en voor 15% zelf geproduceerd.

Deze casus leunt nog minder op CCS dan casus 2 (3,8 Mt in 2050, zie Figuur 8). Dit komt vooral door het vrijwel volledig uitschakelen van de ammoniakproductie.



Figuur 7: Grondstoffen import in casus 3: beperkte beschikbaarheid van plastic afval en MSW



Figuur 8: Reductie van Scope 1 CO₂-emissies van CHEM-NL tot nul tussen 2021 en 2050, bij casus 3 met beperkte beschikbaarheid van plastic afval en MSW

⁴ <https://www.tno.nl/en/newsroom/2020/11/roadmap-circular-plastics-2050/>

Nabespreking en conclusies transitie CHEM-NL

1. Oorsprong van grondstoffen

Figuur 9 toont de herkomst van de koolstof voor etheen en van de waterstof/ammoniak voor casus 1, 2, 3 in 2050.

Koolstof van etheen is vooral afkomstig van recycalaat: plastic afval en MSW. Slechts indien de beschikbaarheid van recycalaat wordt beperkt (casus 3), wordt ook biomassa ingezet als koolstofbron. Dit is dusdanig kostenintensief dat toch enig fossiel aardgasgebruik resteert ondanks de fictieve belasting. De aanname dat plasmachemie na 2040 een nieuwe energiearme route naar etheen (met bijproduct waterstof) ontsluit, maakt dit mogelijk. **Dit onderstreept het belang nieuwe chemie en technologie te blijven ontwikkelen.**

Biograndstof is onbeperkt beschikbaar verondersteld. Grote volumina zoals voor CHEM-NL vereisen nog forse stappen op het gebied van integrale duurzaamheid en grondstofontsluiting. De prijs van bionafta is 25% hoger aangenomen dan van fossiele nafta (exclusief belasting op fossiele bronnen) en na 2030 constant gehouden: een conservatieve benadering. Veel hogere prijzen

kunnen onder andere ontstaan door concurrerende andere toepassingen zoals biobrandstoffen. Ook is uitgegaan van lage afvalprijzen: MSW 0 €/t, plastic afval 325 €/t zonder verhoging in de tijd. Stijgende prijzen kunnen technologische keuzes beïnvloeden. CO₂ afvangst uit lucht, een beschikbare optie, werd nooit kostenconcurrerend genoeg. Bij verdergaande inperkingen van fossiel, recycalaat en biograndstof zou CO₂ op den duur 'noodgedwongen' zijn geselecteerd: er is geen alternatief.

Ook ammoniak wordt bij voorkeur geproduceerd uit recycalaat (indien beschikbaar), maar productie van waterstof uit biomassa en import van ammoniak zijn concurrerende alternatieven. Geïmporteerde ammoniak moet dan uiteraard duurzaam zijn. Hoe meer de beschikbaarheid van recycalaat wordt beperkt, hoe meer ammoniak wordt geïmporteerd. In casus 3 was het gebruik van biomassa indirect beperkt via het aantal beschikbare vergassingsinstallaties in het model: een manier om modelmatig met een mogelijk beperkte toekomstige beschikbaarheid van duurzame biomassa om te gaan. Op het gebied van duurzame biograndstof is ook nog een weg te gaan.

2. Stijging productiekosten

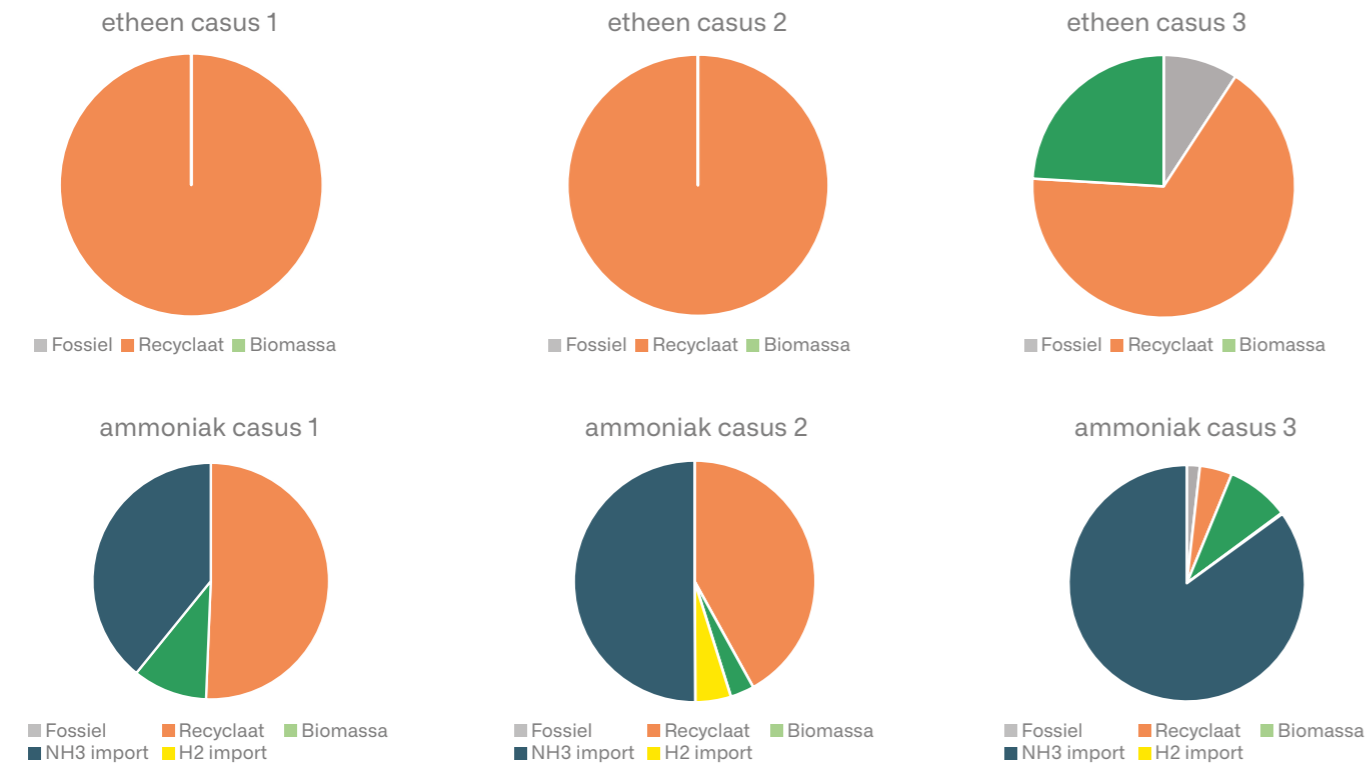
CIMS berekent variabele kosten, inclusief capex afschrijving en CO₂-belasting (combinatie van ETS en CO₂-heffing). Hieraan zijn uiteraard onzekerheden verbonden: prijzen en prijsontwikkelingen (vooral onderling en zonder inflatiecorrectie), commerciële beschikbaarheid qua tijd en capaciteit van technologie en CO₂-vrije elektriciteit; grondstof- en energie-efficiëntie. Aan de drie casussen kunnen daarom slechts trends worden ontleend. De transitie gaat gepaard met een kostenverhoging van 25% in 2050 ten opzichte van 2021 (Figuur 10). Tijdens de transitie zijn de productiekosten aanvankelijk hoger, tot 70% meer, wegens het nog niet beschikbaar zijn van alle technologische opties in het eerste decennium. Wanneer zowel plastic afval als MSW beperkt worden, stijgen de prijzen verder.

3. Verbondenheid productieprocessen

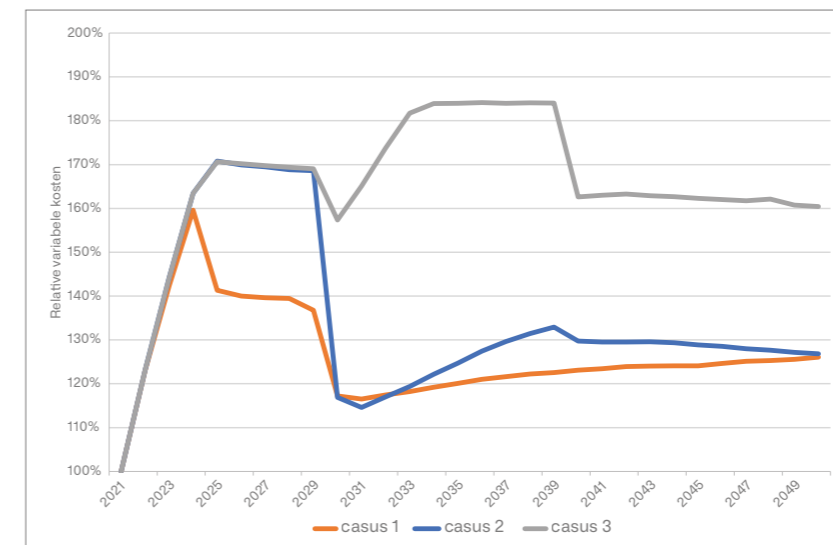
De modelresultaten laten duidelijk **synergievoordeel** zien van onderlinge verbinding van de etheen- en ammoniakproductie. Zo maakt het ammoniakproces gebruik van bijproduct methaan uit de stoomkraker en het Fischer-Tropschproces om fossiel aardgasgebruik voor SMRs volledig uit te faseren. De etheenprocessen profiteren van CCS van zuivere CO₂-stromen van de ammoniakroute, die veel goedkoper afvangbaar zijn dan verdunde rookgasstromen

uit de etheenroute. Beide routes profiteren van biomassa en de vergassing van MSW voor de productie van waterstof. De productie van ammoniak en etheen concurreren onderling om stookgas en waterstof, zoals blijkt uit casus 2 en 3. Ammoniakproductie wordt uitgefaseerd, omdat het een importoptie heeft, wat niet het geval is voor etheen. Onafhankelijke optimalisaties van de transitie van beide productieprocessen zou tot andere resultaten leiden, waarbij synergievoordelen blijken uit de verschillen met deze casussen (buiten scope).

De energiesector concurreert om dezelfde schaarse hernieuwbare koolstofbronnen voor energieopwekking door verbranding van biomassa, biobrandstoffen en afval. Aldus blijkt de vergroening van CHEM-NL zowel afhankelijk van-, als in competitie met de energietransitie. Dit verbindt de grondstoffentransitie onlosmakelijk met de energietransitie.

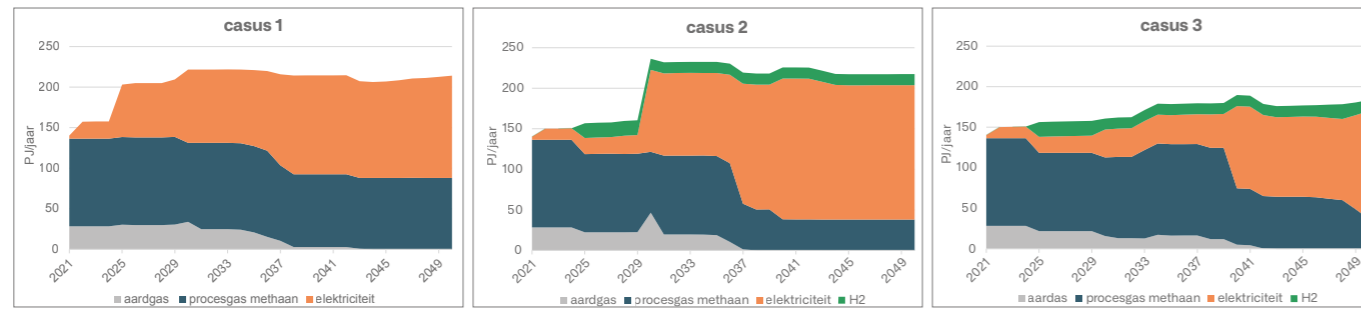


Figuur 9: Herkomst van de grondstoffen in 2050 voor de drie casussen. Etheenproductie: koolstofherkomst fossiel, uit recycalaat (plastic afval, MSW) of biomassa (bionafta). Ammoniak: uit waterstof geproduceerd uit fossiele brandstof, biomassa of recycalaat (plastic afval, MSW), geïmporteerde waterstof, of uit import.



Figuur 10: Variabele kosten (inclusief CO₂-belasting and capex afschrijving) ten opzichte van productiekosten 2021. Casus 1: onbeperkte grondstoffen; casus 2: beperkte beschikbaarheid plastic afval; casus 3: beperkte beschikbaarheid plastic afval en MSW

Brightsite en de zes elkaar versterkende programmalijnen



Figuur 11: Evolutie van de energievraag van CHEM-NL in casus 1, 2 en 3. NG: geïmporteerd fossiel aardgas als brandstof, FG; procesgas methaan geproduceerd binnen CHEM-NL, gebruikt als brandstof, H2: waterstof gebruikt als brandstof in waterstofovens, en elektriciteit

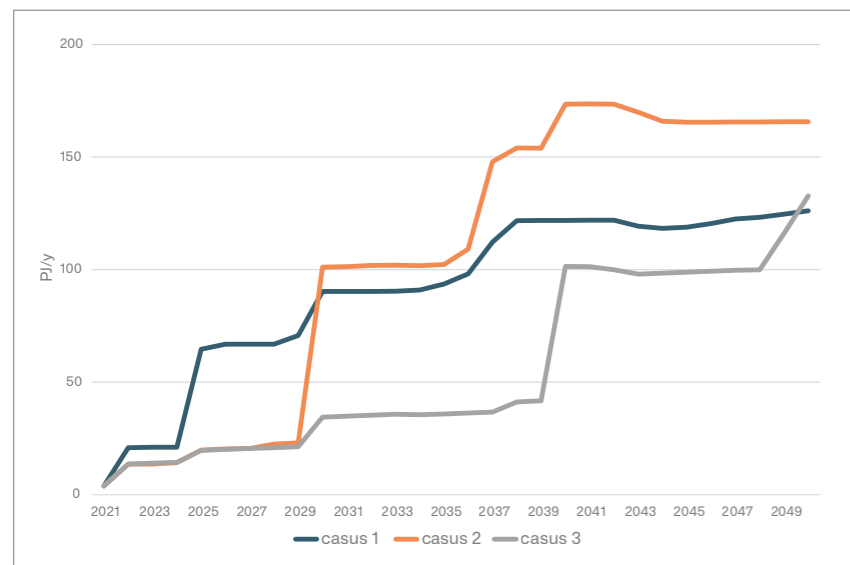
4. Verbondenheid grondstoffen- en energietransitie

De transitie van CHEM-NL gaat gepaard met een toename van het energieverbruik in casus 1 en 2 met ongeveer 50% toe (Figuur 11). De toename is beperkter in de derde casus, wegens de ammoniakproductie nagenoeg geheel buiten CHEM-NL.

De toegenomen energieconsumptie op CHEM-NL wordt voornamelijk veroorzaakt door de meestal veel lagere **energie-inhoud van hernieuwbare grondstoffen** dan die van fossiele nafta en aardgas. Overschakelen op hernieuwbare grondstoffen gaat daardoor gepaard met een toegenomen energievraag. **Minstens zo belangrijk zijn echter de consequenties van de grondstoffentransitie buiten CHEM-NL** zoals de ook benodigde extra elektriciteit en het beslag op gebruik van afval en land. De infographic onderstreept het grote beslag op bronnen dat intrinsiek aan de grondstoffentransitie is verbonden en de

afhankelijkheid van het integrale energieverbruik van de koolstofbron. Dit maakt dat naar shortcuts gezocht moet blijven worden, zoals plasmachemie en biopolymeren. De thermodynamica stelt hierbij limieten aan wat haalbaar is.

Figuur 12 toont de berekende elektriciteitsconsumptie van de drie casussen tot 2050. De grote toename van de vraag naar elektriciteit wordt voornamelijk veroorzaakt door de elektrificatie van de SMR, de gedeeltelijke elektrificatie van de krakers (30-70% van de krakers, afhankelijk van de casus) en de plasmatechnologie. In casus 2 en 3 maken sommige ovens van de krakers gebruik van op CHEM-NL geproduceerde waterstof (20% van de ovens) als brandstof. De gebruikte elektriciteit moet CO₂-vrij zijn. Indien dit niet het geval is, vindt slechts uitwisseling tussen Scope 1 en 2 -emissies plaats en kan het middel erger worden dan de kwaal. Maar CHEM-NL is niet de enige gegadigde voor hernieuwbare grondstoffen.

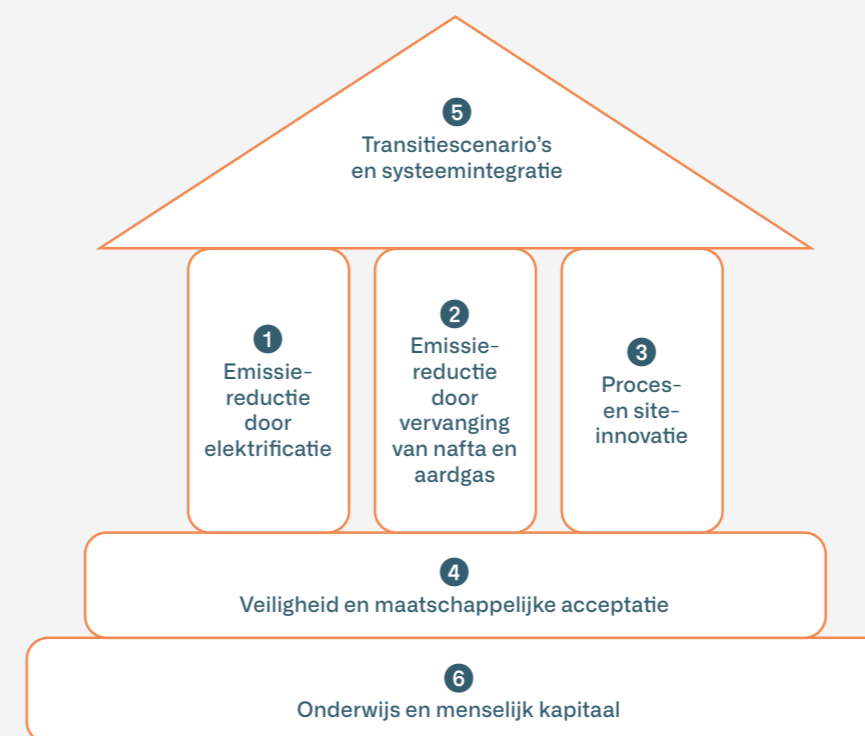


Figuur 12: Evolutie van de vraag naar (groene) elektriciteit voor casus 1, 2 en 3. NB: ruim 150 PJ per jaar komt overeen met 1000 windmolens van 10 MW (productiefactor 50%)

Als open innovatieplatform voor duurzame procestechologie en circulariteit brengt Brightsite de kennis van vele partijen samen, voorziet in samenwerking met Brightlands Chemelot Campus in faciliteiten voor opschaling en commerciële demonstratie en ondersteunt bij het kiezen en ontwikkelen van de juiste technologieën om vergroening van de chemische industrie te realiseren.

Om efficiënt bij te dragen aan de realisatie van nationale klimaatdoelen is Brightsite in 2019 opgericht door Sitech services (namens de bedrijven op de Chemelot site), TNO, Universiteit Maastricht en Brightlands Chemelot Campus. De locatie op Brightlands Chemelot Campus, omringd door grootschalige chemische industrie, biedt hiervoor een ideale uitgangspunt. Brightsite heeft als missie te demonstreren dat klimaatdoelstellingen op Chemelot daadwerkelijk haalbaar zijn, functioneert als een op feiten en wetenschap gebaseerde denktank, pakt transitieproblematiek integraal aan (multi-stakeholder perspectief) en stimuleert opleidingen voor de nieuwe generatie onderzoekers en medewerkers om dit te bewerkstelligen.

De klimaatdoelen stellen de chemische industrie voor enorme uitdagingen, maar bieden ook kansen. Goed transitie management leidt tot economische groei en trekt talent en business aan. Omdat de ontwikkeling en toepassing van nieuwe technologie veel meer omvat dan alleen de technische aspecten, omvat het werk ook veiligheidsaspecten, maatschappelijke acceptatie, juridische en economische haalbaarheid, werkgelegenheid en opleiding. Kortom, samen met de industriepartners bijdragen aan een brede welvaartsbasis voor de toekomst.



Brightsite benadert de transitie integraal met drie ontwikkelingsprogrammalijnen, die 1) elektrificatie, 2) hernieuwbare grondstoffen en 3) proces- en site-innovatie betreffen, en drie ondersteunende programmalijnen rondom 4) veiligheid en maatschappelijke acceptatie, 5) transitie scenario's en systeemintegratie en 6) onderwijs en menselijk kapitaal. De transitie komt alleen tot stand door gezamenlijke, integrale samenwerking tussen deze zes werkgebieden, zoals Figuur 13 schematisch weergeeft.

Programmaliijn 1 Emissiereductie door elektrificatie



Elektrificatie: ontwikkelen en opschalen plasmatechnologie

Overstappen op elektrisch verwarmen, met duurzaam opgewekte elektrische energie, kan een belangrijke bijdrage leveren aan het terugdringen van CO₂-emissie op Chemelot in de periode 2030-2050. Brightsite ziet **plasmatechnologie als een potentiële ‘game changing’ technologie**, omdat het de CO₂-emissie kan verlagen en tegelijkertijd koolstof in de kringloop van een circulaire economie houdt. Voor de korte termijn, tot 2030, zijn elektrificatie-opties geïdentificeerd waarmee de Scope 1 broeikasgasemissie ten opzichte van 2015 met circa 40% kan worden gereduceerd.

Brightsite focus: nieuwe waardeketens & Plasmalab

Uit een haalbaarheidsonderzoek van Brightsite bleek dat methaan met behulp van plasmatechnologie omgezet kan worden in waterstof en koolstofproducten, zonder CO₂ emissies en tot 85% minder energieverbruik ten opzichte van waterelektrolyse. De huidige CO₂-emissie van de chemische industrie kan hiermee dus worden verlaagd met tegelijkertijd een hogere energie-efficiëntie. Dit maakt mogelijk uit aardgas of methaan dat vrijkomt bij bijvoorbeeld geëlektrificeerde kraakprocessen, zowel waterstof als etheen te produceren. Daarbij werkt SABIC aan elektrisch stoomkraken.

Brightsite heeft in het Brightsite Plasmalab een **unieke 3-generatiebenadering** geïnitieerd. Daarbij wordt maximale koolstof- en energie-efficiëntie ontwikkeld en opgeschaald door middel van:

1. Het volledig begrijpen van bestaande technologie en plasma's en hun limiteringen
2. Het verbeteren van de bestaande plasmatechnologie voor de korte termijn

3. Voor de langere termijn: Het ontwerpen van de best mogelijke technologie vanuit de beheersbaarheid en besturing van plasma's en gewenste plasmachemie naar nieuwe bouwstenen voor de chemische industrie

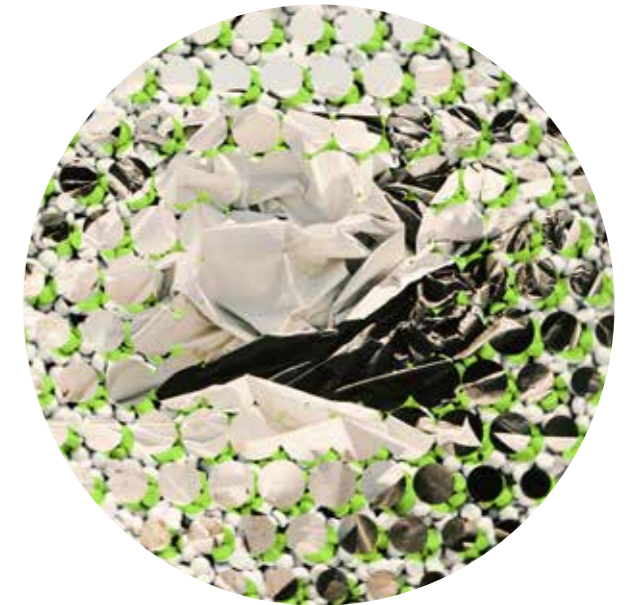
Het methaanonderzoek heeft geleid tot de eerste kleinschalige omzetting van methaan in etheen, acetyleen en waterstof met een verhoogde etheenselectiviteit. Ook is de toepasbaarheid van plasma als platformtechnologie verder uitgediept: verschillende **andere moleculen, bijvoorbeeld stikstof en CO₂**, kunnen eveneens effectief worden gebruikt voor de productie van de nieuwe generatie grondstoffen voor de chemische industrie en/of als bouwsteen voor nieuwe waardeketens op Chemelot. Verdieping en verbreding van het onderzoek naar opschaling van plasmaprocessen leidt zo tot nieuwe opties voor de grondstoffentransitie en circulariteit in 2050.

Site- en regio-overschrijdende aanpak nodig

Naar verwachting kunnen de huidige emissies van CO₂ Scope 1 op Chemelot in 2050 ten opzichte van 1990 met 95% afnemen door elektrificatie van verwarmingsprocessen en de productie en inzet van niet-fossiele waterstof⁵. Plasmatechnologie kan hieraan een belangrijke bijdrage leveren doordat het koolstof energiegunstig in een kringloop kan houden en daarmee emissie van schaarse niet-fossiele koolstof voorkomt. Omzetting in CO₂ wordt vermeden, waardoor geen CCS, geen andere koolstofbronnen en geen energie-intensieve routes zoals CCU nodig zijn. Voor productie, transport én gebruik van de benodigde duurzame elektriciteit zijn echter op en buiten Chemelot grootschalige investeringen in elektriciteitsopwekking, transportverbindingen en aanverwante infrastructuur nodig. Dit vergt een site- en regio-overschrijdende aanpak.

⁵ Referentie naar BTO 2022

Programmaliijn 2 Emissiereductie door vervanging van nafta en aardgas



Vervanging van fossiele grondstoffen

Bedrijven op Chemelot hebben **drie opties** om het gebruik van fossiele grondstoffen en de bijbehorende fossiele CO₂-emissies te verminderen, en zo te vergroenen: 1) **recycling van materialen** uit producten 'end-of-life' voor nieuwe, circulaire grondstoffen, 2) bereiding van **grondstoffen uit biogebaseerde bronnen** of 3) gebruik van **CO₂ uit de atmosfeer**. Om significante afbouw van fossiele grondstoffen daadwerkelijk mogelijk te maken is ontwikkeling voor **grootschalig gebruik geïmpliceerd**, bijvoorbeeld voor bijmenging van niet-fossiele grondstoffen uit nieuwe productieprocessen bij fossiele feedstock, of door middel van nieuwe niet-fossiele producten. Zover is het echter nog lang niet. Dit komt onder andere door de onderontwikkelde koolstofbronnen, processen en nieuwe waardeketens waar ze deel van uitmaken, gecombineerd met de behoefte aan risicobeheersing door gecontroleerde invoering, en het vertrouwen in de gevestigde waardeketens.

Ontwikkelingen op Chemelot

Bedrijven op Chemelot **evalueren en realiseren nieuwe technologische opties**. Zo worden circulaire grondstoffen gebruikt voor de **SPEAR** pyrolyse-eenheid die grondstoffen uit kunststofafval gaat produceren voor de **SABIC** naftakrakers. **Fibrant** bestudeert mogelijkheden voor depolymerisatie van nylonafval tot nylonmonomeren en **Black Bear Carbon** heeft het plan een fabriek te bouwen voor de recycling van autobanden tot nieuwe grondstoffen. Verder overweegt **RWE** de bouw van een grootschalige unit voor vergassing van grondstof uit afval voor productie van waterstof. De uitdaging bij biomassa is dat het grote hoeveelheden zuurstof en water bevat. Niettemin worden enkele interessante opties ontwikkeld om afvalstromen te gebruiken als krakervoeding of door etheenproductie vanuit suikers verder te ontwikkelen. Ook wordt nagedacht

over nieuwe mogelijkheden met biograndstoffen op Chemelot.

Brightsite focus: opwaarderen van afval

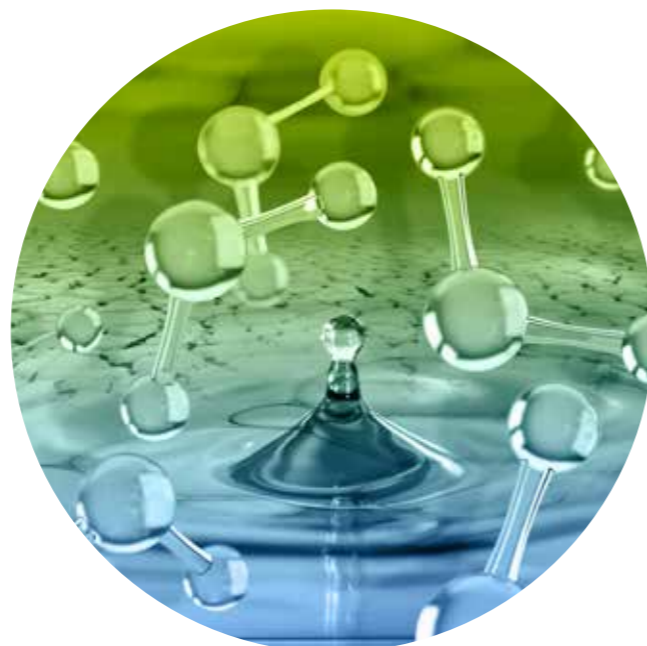
Het Brightsite programma voor hernieuwbare grondstoffen focust zich op het kunststofafval waarvan kwaliteit en beschikbare hoeveelheid nog niet overeenkomen met de eisen van thermochemische recycling. Het onderzoek beoogt de **hoeveelheid bruikbaar kunststofafval te vergroten door scheiding en reiniging van kunststof uit voorsnog afgekeurde fracties van afvalsortering**. Dit vermeerderd bruikbaar kunststofafval voor circulaire grondstof met een factor 2 of 3 en vermindert tegelijkertijd verbranding en daarmee samenhangende CO₂-emissies.

Andere voorbeelden zijn de ontwikkeling van nieuwe technologieën, zoals katalytische ontleding van kunststoffen tot hoogwaardige chemicaliën in samenwerking met de **Universiteit Utrecht** en onderzoek naar plasmatechnologie voor de pyrolyse van kunststoffen. Brightsite ondersteunt aanvragen voor het **Nationaal Groeifonds** waarin de verbinding wordt gelegd voor biogebaseerde grondstoffen voor zowel de vergroening van gevestigde als ontwikkeling van nieuwe disruptieve technologieën, producten en waardeketens ('waardecirkels') vanuit koolhydraatrijke biograndstoffen uit land- of bosbouw.

Nieuwe situatie, nieuwe aanpak

De nieuwe 'groene' waardeketens krijgen te maken met schaarste en nieuwe voor de toekomstige economie belangrijke aspecten die aanzienlijk verschillen van die van de huidige 'fossiele' waardeketens. De beperkte beschikbaarheid van niet-fossiele grondstoffen en andere aspecten zoals duurzaam gebruik van biomassa, prioriteiten op het gebied van ruimtelijke ordening zijn van invloed.

Programmaliijn 3 Proces- en site-innovatie



Chemelot heeft proces- en site-innovaties nodig om aan de klimaatdoelstellingen te voldoen én aantrekkelijk te blijven voor investeerders. **De focus ligt op reductie van broeikasgassen, efficiënter gebruik van energie en restwarmte, digitalisering en water.**

Toekomstbestendig watersysteem

Om een toekomstbestendig watersysteem voor Chemelot te ontwikkelen heeft Brightsite in samenwerking met **USG, Sitech, RoyalHaskoning DHV** en site-users een **Roadmap Water** gemaakt onder de titel 'Towards zero emission and zero waterintake'. Deze roadmap beoogt eliminatie van emissies naar oppervlaktewater en significante reductie van het watergebruik. Lees meer over de ontwikkeling van een toekomstbestendig watersysteem in 'WATER-NL', op pagina 23.

Digitalisering: het belang van digital twins

Voor het verlagen van de footprint van fabrieken zet Brightsite ook digitalisering in. Dit is nader omschreven in 'Digital factory of the future': een door Brightsite opgestelde visie voor de procesindustrie. Brightsite ontwikkelt zogenaamde 'digital twins' en 'smart information systems' voor 'predictive maintenance', training, veiligheidsstudies en het testen van nieuwe regeltechnieken. Door toepassing van Machine Learning (ML) en Artificial Intelligence (AI) worden inzichten in het proces en kennis van de installaties vergroot (continue verbetering). Dit sluit aan bij ontwikkelingen binnen de EU. Zo benoemt een EU-rapport van het **Joint Research Center** (2022) hoe de **groene- en de digitale transitie elkaar kunnen versterken**. En in het EU-rapport 'Transition Pathways for the Chemical Industry' (2023) worden de strategische rol van de chemische

industrie voor de EU en het belang van deze twin transitie voor de chemische industrie nogmaals bekrachtigd.

Potentie CCU en warmtebatterij

Om te voorkomen dat CO₂ in de atmosfeer terecht komt en te voorzien in een hernieuwbare koolstofbron kan CCU (Carbon Capture and Utilization) ingezet worden. Een uitgebreide studie naar de potentie voor Chemelot toont dat CO₂ in de toekomst circa 20% van de benodigde koolstof zou kunnen voorzien. Hiervoor is echter jaarlijks meer dan 60 Petajoule (PJ) CO₂-vrije energie nodig, terwijl elektrificatie van Chemelot op zich al een toename in hernieuwbare energie van 20 tot 60 PJ vraagt. **Inzet van CCU op Chemelot is daarom voorlopig geen optie**. Brightsite blijft monitoren of dit verandert door ontwikkelingen zoals tekorten aan alternatieve circulaire koolstofbronnen, prijsontwikkelingen in hernieuwbare energie en technische doorbraken. Een belangrijk deel van Chemelots **restwarmte kan benut worden voor gebouwverwarming in de omgeving**. De warmtebatterij is een interessante innovatie om ontwikkeling van warmtenetten te versnellen. Brightsite spant zich in om, samen met TNO-TU/e spin-off **Cellcius** een pilot uit te voeren voor opslag, transport en afgifte van industriële restwarmte in een zouthydratie-gebaseerde warmtebatterij.

WATER-NL

Water cruciaal voor functioneren fabrieken

Water is noodzakelijk voor basisprocessen zoals koeling, verwarming, transport en veiligheid. Zo is water – in de vorm van stoom – nodig voor verwarming van processen en zorgt het voor koeling door warmte af te voeren. Ook wordt water als oplosmiddel gebruikt en dient het als transportmiddel.

Circulair watergebruik

Water wordt steeds meer een maatschappelijk issue door toenemende droogte, piekbuien en zorgen over waterkwaliteit. Adequate waterzuivering en vermindering van het watergebruik krijgen dan ook steeds meer aandacht. Brightsite ontwikkelt een visie en test technologieën om **gebruikt water zo schoon mogelijk terug te geven én om zo min mogelijk water te gebruiken**. Dit betekent naast circulair koolstofgebruik ook ontwikkeling van **Circulair watergebruik**.

Blik op de toekomst: schaarste leidt tot ontwikkeling circulariteit

Chemelot haalt water uit het Julianakanaal en loost het na zuivering in de Ur, een beek die uitmondt in de Maas. En de Maas is een bron voor drinkwaterproductie. Chemelot is zich zeer bewust van het belang van goede waterzuivering. Diverse Chemelot-brede opties voor verbeterde waterzuivering en hergebruik worden geïnventariseerd: zowel rekening houdend met steeds strengere regels rondom watervergunningen als ingrijpende procesveranderingen die zullen plaatsvinden rond verduurzamingsstappen. Immers: **de transitie naar een klimaatneutraal Chemelot in 2050 impliceert watergebruik en productie van afvalwater door toekomstige fabrieken**. Ook hier leidt schaarste tot ontwikkeling van circulariteit.

Complexe Europese regelgeving

In 2027 moeten alle waterlichamen voldoen aan de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) en daarmee aan **doelen en gespecificeerde chemische en ecologische normen**. De verwachting is dat slechts 35-65% van de regionale Nederlandse wateren volledig aan de eisen zal voldoen, met mogelijke EU-sancties tot gevolg. De Europese regelgeving wordt lokaal geïmplementeerd: eisen aan de kwaliteit van het geloosde water worden bepaald door de boven- en benedenstroomse situatie. De toegestane concentratie van een stof in te lozen water (de norm) wordt daarom situatie-specifiek vastgesteld. **Toekomstig watergebruik krijgt daarmee lokale impact**, een verschil met bijvoorbeeld CO₂.

Chemelot als voorloper

De nieuwe Europese eisen vragen om **verdere verbetering van de waterkwaliteit en ontwikkeling van methoden om stoffen te kunnen meten en analyseren**. Chemelot heeft als eerste grote chemiesite het nieuwe Nederlandse vergunningenproces doorlopen. Ruim 600 stoffen die door fabrieken op Chemelot gebruikt of geproduceerd worden en dus in het afvalwater voor *kunnen* komen, zijn beoordeeld. Eerder werden normen afgegeven voor stofcategorieën, nu wordt op componentniveau gekeken. Daardoor nam het aantal te meten stoffen met een factor twintig toe, waarbij van ongeveer tweederde nog geen norm bekend was. Oppervlaktewater wordt vanuit diverse bronnen belast, denk bijvoorbeeld aan microplastics. Het is een breed maatschappelijk probleem waarin ieder zijn rol moet nemen. Zo heeft Chemelot acties ondernomen om te voorkomen dat plastic korrels in het water terechtkomen en wordt een monitoringsmethode ontwikkeld omtrent hoeveel en welke microplastics in afvalwater aanwezig zijn en hoe dat is te voorkomen. Chemelot helpt zo de milieuzorg op dit nieuwe gebied ook landelijk verder te ontwikkelen.

Hele plaatje bekijken

Het programma 'Circulair Water voor Chemelot' beschrijft welke stappen gezet kunnen worden om watergebruik en -zuivering te optimaliseren. Gezuiverd water kan na opwerking worden hergebruikt. Hierbij ontstaat echter een geconcentreerde stroom met afvalstoffen, brijn genaamd, die bij voorkeur niet geloosd wordt. Omdat verregaande afvalwaterbehandeling vaak gepaard gaat met flinke kosten en een toename in energieverbruik, is een **steebenadering vereist om maatregelen en hun effect te beoordelen**.

Emissievrij 'by design'

Afvalstoffen die in het systeem komen, moeten ook weer worden afgevoerd. De focus ligt nu op verwijdering, maar de beste optie is 'emissievrij ontwerp'. Bijvoorbeeld koeltorens: nu worden koelwaterconditioneringsmiddelen gebruikt die kalkaanslag, microbiologische verontreiniging en corrosie in het koelsysteem voorkomen. Veel fabrieken zijn recent overgestapt op een milieuvriendelijker conditioneringsmiddel. Daarnaast worden chemiearme alternatieven voor conditioneren ontwikkeld, zoals manieren om kalk tevoren te verwijderen. Idealiter zijn koelsystemen zo ontworpen dat geen of veel minder conditioneringsmiddelen nodig zijn. Dit laat zien hoe betere **ontwerpcriteria bijdragen aan beperking van lozingen en waarom het van belang is het volledige systeem in de afwegingen te betrekken**.

Programmaliijn 4 Veiligheid & maatschappelijke acceptatie



Chemelot wil niet alleen de meest duurzame en efficiënte chemische site van Europa zijn, maar ook de veiligste en gezondste, om daarmee een goede werk- en leefomgeving te garanderen voor medewerkers en omwonenden. Veranderingen als gevolg van de energie- en grondstoffentransitie kunnen van invloed zijn op de veiligheid en de (leef)omgeving. Brightsite werkt aan processen en methodieken voor het **borgen van de integrale procesveiligheid en maatschappelijke acceptatie**.

Transitiekeuzes hebben brede impact

Er moet nog het nodige gebeuren om te komen tot een klimaatneutrale, fossielvrije, circulaire samenleving met een brede welvaart en hoge kwaliteit van leven. Het vergt keuzes die niet op zichzelf staan, maar effect hebben op andere transitiepaden, ook van andere sectoren. Brightsite helpt door **keuzes en hun effecten concreet te maken en zowel voor- als nadelen te benoemen**.

Kracht van participatie

Een Brightsite verkenning van verschillende elementen van de transitie en maatschappelijke acceptatie toont aan dat participatie van belanghebbenden cruciaal is voor de transitie van Chemelot. Er is gekeken naar omgevingsparticipatie vanuit de overtuiging dat het betrekken van de omgeving zal bijdragen aan de acceptatie van de transitieprocessen van de chemie. Keuzes tijdens de transitie hebben impact op de maatschappij als geheel en op individuen. Gebruik makend van literatuur, interviews over historische en actuele casussen en in samenspraak met de wetenschap is een

handleiding participatieaanpak Chemelot

opgesteld. Deze handleiding geeft gebruikers handvatten met betrekking tot participatie. Denk aan thema's als: wat moet en wat mag, analyse van belanghebbenden als noodzakelijke eerste stap, mogelijke participatievormen en mate en moment van participatie per belanghebbende. Lees meer over de impact van transitiekeuzes en het belang van participatie in 'MAATSCHAPPIJ-NL', op pagina 25.

Veiligheid: Leren van data

Benodigde technologieën en producten voor de transitie naar klimaatneutraal en circulariteit moeten allereerst veilig zijn, alleen dan zullen ze geaccepteerd worden door werknemers en maatschappij. De maatschappij is door de jaren heen veranderd. Ook de leercurve om tot veilige processen en fabrieken te komen zal veel korter zijn dan de chemische industrie vanuit zijn verleden gewend is. Brightsite zet actief in op het gebruik van 'big data' voor verbetering van veiligheid in combinatie met AI- en ML-technieken, het zogenaamde Early Warning Systeem (EWS) vanuit een overtuiging dat incidenten hierdoor op termijn beter voorspelbaar zijn en voorkomen kunnen worden.

MAATSCHAPPIJ-NL

Keuzes concreet maken

Tijdens de transitie zal chemische industrie door een periode van schaarste gaan. Schaarste van duurzame energie en grondstoffen, maar ook van ruimte en vakmanschap. Dit vereist keuzes met **impact op de maatschappij als geheel** én voor individuen; het algemeen versus het persoonlijk belang, huidig versus toekomstig belang. Neem de plaatselijke overlast door de aanleg van windmolens voor energievoorziening of de aanleg van een verbeterde logistiek voor industrieel transport. Hoe kunnen de lusten en lasten eerlijk worden verdeeld? Hier is niet alleen een rol weggelegd voor de wetenschap, het bedrijfsleven en de politiek, maar ook voor burgers. **Het is belangrijk dat de hele samenleving meedenkt voordat onherroepelijke keuzes gemaakt worden.**

Participatie in brede zin noodzakelijk

Participatie is nodig en moet van diverse kanten komen. De beeldvorming rond de chemie kan sterk verbeteren door een meer proactieve houding gericht op participatie. De chemie en de maatschappij hebben elkaar nodig; talloze gebruiksartikelen en directe of indirecte welvaart komen voort uit de chemie. Het bewustzijn over de verwevenheid van de chemie met de samenleving en de huidige welvaart kan worden vergroot door de maatschappij meer te betrekken, via burgerbelangengroepen bijvoorbeeld. Kortom: **Een flinke maatschappelijke inhaalslag is nodig.**

Alleen ga je sneller, samen kom je verder

Hoe ziet een brug tussen wetenschap, politiek en groeperingen in de samenleving eruit? Luisteren, vertrouwen, elkaar willen begrijpen en transparante besluitvorming zijn belangrijk. **Vroegtijdig betrekken van belanghebbenden kan tot betere oplossingen, besluiten en meer draagvlak leiden.** 'Alleen ga je wellicht sneller, samen kom je verder'. Bij een goed verlopen proces is de acceptatie van het resultaat groter. Om dit te bereiken is het nodig te weten uit welke groepen de samenleving bestaat en wat voor hen belangrijk is, om boodschappen over te maken keuzes begrijpelijk over te brengen: tastbaar, concreet, in klare taal. **Juist taalgebruik is cruciaal om elkaar te begrijpen.**

Wie maakt de keuzes richting 2050?

Een representatieve doorsnede van de bevolking helpt om betere keuzes te maken. Een belangwekkende gedachte is wie de keuzes voor 2050 gaat maken. De huidige 50-plusser of degenen die het straks moeten gaan doen: de huidige twintigers? Realiseren jongvolwassenen zich wel voldoende dat zij nu hun stem moeten laten horen? Worden zij er voldoende bij betrokken? Welke vormen van participatie zijn nodig om het proces van keuzes maken op gang te brengen?

Gedragsverandering stimuleren

De samenleving ontkomt er niet aan ander gedrag te vertonen: minder vliegen, repareren in plaats van nieuw kopen en elektrisch rijden. Een dergelijke gedragsverandering gaat niet vanzelf, maar is een samenspel van verleiden en dwingen. De overheid zal daarin een rol moeten spelen, bijvoorbeeld bij voorlichting, regulering, subsidiëring en beprijzing.

Transparant zijn...

De (chemische) industrie kan een voortrekkersrol nemen door proactief en transparant te zijn in gebruik en besparing van energie en grondstoffen, in de keuze voor duurzame oplossingen. **Concreet laten zien wat werkt én wat niet werkt.** De benodigde technologieën en processen voor transitie naar klimaatneutraal en circulair moeten veilig zijn. Alleen dan zullen ze geaccepteerd worden door de maatschappij. Bij veiligheid moet verder gedacht worden dan wat wettelijk is geregeld. Integrale veiligheid is een mix van thema's uit omgevings-, milieu-, Arbo-, verkeersveiligheid, leefbaarheid en werkgelegenheid.

... én weten wat er speelt bij burgers

Voor omwonenden weegt dagelijkse overlast het zwaarst, zoals een continue bromtoon, periodieke trilling of een bruine pluim. Dit geeft onrust, ook al is het wettelijk toegestaan. **Het is zinvol in alle stadia van ontwikkeling proactief aandacht aan participatie te besteden.** De vraag die steeds beantwoord moet worden: Wat is het effect van voorgenomen ontwikkelingen binnen de chemie op **integrale veiligheid en leefbaarheid**? Alleen dan kan het beeld dat de maatschappij van de chemische industrie heeft ten positieve veranderen. En dat is nodig.

Programmaliijn 5 Transitiescenario's en systeemintegratie



Integrale klimaattransitie

Gezien de complexiteit van een chemische site als Chemelot en de legio verduurzamingsopties kan een efficiënte klimaattransitie niet plaatsvinden zonder een integrale, systematische aanpak. Op basis van stelselmatig opgebouwde systeemkennis ontwikkelt Brightsite modellen die met complexiteit kunnen omgaan om optionele transitieroutes te ontwikkelen, opties voor stimulering van de transitie, keuzes te verhelderen en de impact van keuzes op de huidige en toekomstige samenleving te verduidelijken voor (politieke) besluitvorming.

Modellen blijven doorontwikkelen

Het Chemelot Integrated Model System (CIMS) is ontwikkeld om routes naar klimaatneutraliteit van Chemelot te optimaliseren. Dit model wordt ook gebruikt om ondersteunende gegevens voor Chemelot te genereren voor nationale gremia. De vele factoren die de transitie van Chemelot beïnvloeden vragen om uitbreiding van de functionaliteit van het modelleringsinstrumentarium. Zo zijn robuustere manieren geïdentificeerd om verschillende (toekomst)scenario's op te nemen in de parametrisering en Scope 3-emissies (upstream en end-of-life) in de optimalisatie. Ook kunnen allerlei alternatieve technologieën worden gemodelleerd.

Brightsite scenario's concretiseren transitiepaden en impact

Uit Brightsite scenario's voor de Europese chemie is bepaald welke externe factoren specifiek van invloed zijn op Chemelot. Met de modelleringstools worden reacties geformuleerd, zoals effecten op optionele transitiepaden voor Chemelot en de bijbehorende infrastructuur. 'No regret'-opties en vroege investeringsbeslissingen worden zo inzichtelijker gemaakt. Tevens laat het beleidsmakers zien wat een site als Chemelot nodig heeft voor klimaatneutraliteit. Een

volgende stap is het veralgemeniseren van de systeemmodelbenadering en geschikt maken voor andere chemische clusters.

Systeemdynamiek in kaart met SCIARS

Het SCIARS-model (Source, Commodity, Intermediates, Application, Re-Source) plaatst Chemelot in perspectief met concurrerende technologieën, toepassingen en sectoren die allen afhankelijk zijn van dezelfde schaarse hernieuwbare hulpbronnen. SCIARS omvat Chemelot in huidige lineaire én toekomstige circulaire waardeketens en brengt huidige en toekomstige vereiste en beschikbare (inter)nationale energie- en grondstoffenstromen voor de productie van chemische producten voor diverse toepassingen in kaart, inclusief de bijbehorende systeemdynamiek. Met SCIARS kunnen bronnen en grondstoffen worden gevisualiseerd, dilemma's rond optimaal gebruik van schaarse hernieuwbare grondstoffen en energie worden geïdentificeerd en afwegingen verhelderd tussen mogelijke routes. Op basis van ontwikkeling van deze visualisaties in een wiskundig model (2023-2024) wordt integrale modellering mogelijk van groeiende circulariteit middels (toekomstige) koolstofcycli en opties om deze te doen groeien.

'Zero-waste' chemische site

Gezien de toenemende druk om het milieu te ontlasten, is gestart met de ontwikkeling van een 'zero waste chemical site' concept: een chemiesite met geen of minimale milieu-impact. Het betreft niet alleen eliminatie van emissies naar lucht en water, maar ook eliminatie van toekomstige afvalstromen. Hoe kan de vorming van huidige en toekomstige afvalstoffen worden voorkomen of leiden tot nuttige producten? Circulariteit, verantwoord gebruik van schaarse hernieuwbare hulpbronnen en attractiviteit van de site staan hier centraal.

Programmaliijn 6 Onderwijs en menselijk kapitaal



Ingenieur van de toekomst opleiden voor transitie van Chemelot

De menselijke dimensie van de transitie van de chemische industrie is minstens even belangrijk als de technologische. Met de krapte op de arbeidsmarkt en het beperkte aanbod aan ingenieurs is de ontwikkeling van onderwijsprogramma's gericht op de technische en maatschappelijke klimaattransitie in de chemiesector cruciaal. Brightsite draagt bij door het opleiden van de ingenieur van de toekomst en het versterken van de pool van technische arbeidskrachten in de regio.

Inzetten op relevant onderwijs

De regionale industriële basis en de onderzoeksteams op de Brightlands Chemelot Campus verbonden met het bredere onderwijslandschap in Limburg, worden ingezet om hoog en relevant gekwalificeerde technische afgestudeerden af te leveren. Brightsite zet de ontwikkeling van onderwijs voort met de bacheloropleiding Circular Engineering en ontwikkeling van studieprogramma's op hogere niveaus, waaronder de voorbereiding voor een masteropleiding. Studenten van het bachelorsprogramma verkrijgen een solide basis met algemene engineeringvakken en een brede variatie aan keuzevakken. Op deze manier kunnen ze zich tijdens hun studie focussen op één van de drie gebieden: duurzame biotechnologie, circulaire chemische engineering en engineering fysica voor duurzame productie.

Studenten die bijdragen aan de transitie van Chemelot

We zien studenten, opgeleid binnen Brightsite-programma's en het bredere Brightsite-partnernetwerk, graag in de regio blijven en met hun waardevolle kennis en vaardigheden bijdragen aan de transitie. Daarom zet Brightsite in op sterke banden met industriële partners door middel van projectperiodes en gastcolleges. Projectwerk is een zeer belangrijk onderdeel van ingenieursopleidingen en studenten van de Universiteit Maastricht hebben het afgelopen jaar nauw samengewerkt met de regionale industrie. Zo hebben studententeams gewerkt aan oplossingen voor uitdagingen in de energie- en technologietransitie en vraagstukken zoals het verbeteren van circulariteit en het ontwikkelen van oplossingen voor waste-to-raw materialen. Het onderwijs wordt voortdurend versterkt en profiteert van cursussen die zijn ontwikkeld door onderzoeksteams van de Universiteit Maastricht, waaronder het Circular Plastics team dat 'Remake, Reuse, Repair, Recycle' onderwijst, en het Maastricht Sustainability Institute met 'Circular Business Development'. Het brede scala aan technische en actuele keuzevakken biedt afgestudeerden een breed perspectief op de transitie, waardoor een nieuwe generatie flexibele, systeemdenkende probleemoplossers ontstaat. Het komende jaar wordt gewerkt aan het ontwikkelen van meer onderwijsmogelijkheden in productie en werktuigbouwkunde en aan het versterken van de banden binnen het Brightsite partnernetwerk.

Nabeschuwing

Met slechts 27 jaar tot de beoogde klimaatneutraliteit heerst schaarste aan grondstoffen, landoppervlak, CO₂-vrije energie, tijd en zelfs arbeid⁶. Zonder deze productiemiddelen zal er geen transitie zijn.

Idealiter wordt de transitie naar klimaatneutraliteit snel en efficiënt voltooid door overgang van fossiele grondstoffen en energie naar alternatieve grondstoffen en energie. Eerder in deze BTO zijn enkele vragen rondom circulariteit gesteld:

In een circulaire economie wordt kunststofafval (her)gebruikt als grondstof en niet verbrand. Is circulair beter dan lineair? Ja. Is circulair altijd beter? Nee, zeker niet. Maar niet om voor de hand liggende redenen. Wanneer dan wél en wanneer niet, en waarom? En hoe is de grondstoffentransitie voor de chemie naar een circulaire economie te stimuleren? Welk beleid is daarvoor nodig?

Kunnen bovenstaande vragen worden beantwoord? Lang niet volledig, maar scenario's en berekeningen met modellen helpen ons op weg. We weten zeker dat als de chemie in 2050 klimaatneutraliteit heeft gerealiseerd, dat dan is overgeschakeld op combinaties van recycleert, biomateriaal en CO₂ uit de lucht, alsmede CO₂-vrije elektriciteit en waterstof. Welke combinaties dat worden is lastig te voorspellen, maar modellen als CIMS helpen dit in te schatten, zoals deze BTO illustreert. De met CIMS geïdentificeerde transitiepaden voorspellen géén toekomst, maar maken het mogelijk effecten te onderzoeken zoals het effect van wetgeving, de beschikbaarheid van hernieuwbare bronnen, prijzen etc.

Schaarste: tekort aan plastic afval

Zouden hernieuwbare bronnen onbeperkt beschikbaar zijn, dan kan de chemische industrie bijna volledig op kunststofafval en MSW draaien. Recycling houdt koolstof in een kringloop waardoor de behoefte aan verse fossiele koolstof afneemt: het principe van een circulaire economie. Het aanbod van afval is echter volstrekt ontoereikend en bovendien gaat circulariteit gepaard met onvermijdelijke verliezen.

Biomassa 'next best', mits duurzaam

De casussen laten zien dat biomassa een sleutelrol kan spelen als voorkeursbron voor het aanvullen van verliezen bij circulariteit. Behalve efficiënt, moet exploitatie van biomassa als koolstofbron ook duurzaam zijn. Dat is onderontwikkeld, zeker in vergelijking met de benodigde hoeveelheden

en zal mede gezien alternatieve toepassingen (zoals voedsel, energie, houtbouw) nog veel maatschappelijke debat en ontwikkeling vereisen. Reden te meer om koolstof zo veel mogelijk in omloop te houden, zodat volumeclaims op nieuwe biomassa kunnen worden beperkt tot aanvulling en groei van circulariteit. Biomassa inzetten voor (nieuwe) biopolymeren, ontwikkeld voor doelgerichte, efficiënte bioapplicaties kunnen daarbij ook een belangrijke rol spelen. Aan de andere kant kan concurrentie voor biomassa voor andere toepassingen de prijzen opdrijven. Prijzen die men zich bijvoorbeeld in de luchtvaart kan veroorloven, maar niet kunnen worden opgebracht door de chemie: een groot risico voor de chemische industrie in Europa. In het uiterste geval betekent dit dat de chemische industrie in Europa niet kan verduurzamen.

Transitie vereist grote volumes CO₂-vrij energie

De casussen verduidelijken ook dat de transitie leidt tot intrinsiek hoger energieverbruik. Die energie moet CO₂-vrij zijn. Exacte cijfers kan CIMS wegens te veel onzekerheden in aannames niet geven. Maar de trends zijn duidelijk: omzetting van bijvoorbeeld MSW of biomateriaal in etheen, of water en stikstof in ammoniak kost meer energie dan omzetting van aardolie in etheen, respectievelijk aardgas en stikstof in ammoniak. De ontwikkeling en stimulering van nieuwe, energiearme en grondstof-efficiënte route en technologieën (plasmatechnologie; bioroutes) is daarom uiterst belangrijk.

CO₂ als koolstofbron in de (verre) toekomst?

Bij onvoldoende beschikbaarheid van zowel afval als biomateriaal, zijn routes gebaseerd op CO₂ en water het enige alternatief voor fossiele koolstof als grondstof. Atmosferische CO₂ als koolstofbron voor de chemie zou een zeer elegante oplossing zijn: geen schaarsteprobleem hier! Maar de inherente thermodynamische aard van CO₂ en water (het zijn 'energieleze' moleculen), de verdunningsfactor in lucht en de vereiste energie voor waterelektrolyse maken deze route voor altijd veel energie-intensiever dan alle andere. Daarom kwam deze route in geen van de casussen naar voren.

⁶ Pag. 27, programmalijn 6

Energie- versus grondstofbron

De gunstige uitgangspositie voor gebruik van recycalaat en biomateriaal in de chemie wordt voor een aanzienlijk deel veroorzaakt door de eigen energie-inhoud en de vaak aanwezige, herbruikbare moleculaire structuren. In het algemeen geldt: hoe hoger de energie-inhoud van de grondstof, des te minder extra benodigde energie om de grondstof om te zetten in chemische tussenproducten. De hamvraag is: wat is wenselijker? Gebruik van biograndstoffen en afval voor energetische doeleinden of als grondstof voor de chemie? Bij inzet voor energetische doeleinden zal de chemie noodgedwongen moeten uitwijken naar CO₂ en water. De extra energieconsumptie door de chemie weegt in dat geval bij lange na niet op tegen de energie die uit deze grondstoffen kan worden opgewekt. Het antwoord is dus dat inzet van biomassa en afval voor de chemie prevaleert boven inzet voor energetische doeleinden.

Goed beheer voorkomt inefficiëntie en verspilling

De casussen illustreren ook potentiële synergie van de etheen- en ammoniakproductie om gezamenlijk tot netto nul CO₂-emissies te komen. Zodra echter schaarste van middelen in het spel komt, begint ook concurrentie om gemeenschappelijke productiestappen tussen de twee producten. De casussen indiceren dat toenemende beperkingen op hulpbronnen leidt tot toenemende import van ammoniak uit het buitenland. Het is echter goed mogelijk dat met andere aannames de etheenproductie wordt verdrongen en ammoniak in CHEM-NL blijft. De scenario's die zich voordoen betekenen allemaal dat Nederland niet zelf-supporting kan zijn. Punt is, dat wegens schaarste een goed beheer van ontwikkeling en gebruik van hernieuwbare hulpbronnen van het grootste belang is om inefficiënties en verspilling te voorkomen.

Systeembenadering om overgang naar circulariteit te laten slagen

Veel restricties in het infopakket van CIMS relateren aan beperkte beschikbaarheid: toekomstige schaarste van plastic afval, MSW, huidige schaarste zoals onderontwikkelde technologieën, alternatieve grondstoffen, ja zelfs schaarse prikkels richting circulariteit. De grondstoffentransitie zal een groot extra beslag leggen op toch al schaarse groene energie en andere middelen. Een circulaire economie, waar hergebruik en duurzaamheid prioriteit hebben naast kosten (in tegenstelling tot de huidige lineaire economie) lijkt dus de weg voorwaarts, maar gaat gepaard met vele vragen. Alternatieve bronnen voor energie en grondstoffen moeten nog ontsloten en ontwikkeld worden en nog onbewezen technologieën moeten worden opgeschaald. De nieuwe economie is daarom duurder dan de huidige fossiele economie. Toch zullen op weg naar circulariteit de fossiele en verduurzaamde systemen hybride naast elkaar moeten bestaan. Huidige belangen in de lineaire

fossiele economie die de klimaatverandering en de kosten die daar gepaard mee gaan veroorzaakt, concurreren echter met onze toekomst. Ook dit benadrukt de noodzaak van een systemische aanpak voor het beste gebruik van hernieuwbare hulpbronnen en het vermijden van inefficiënties in hun gebruik.

Er is behoefte aan een centrale, integrale Nederlands-Europese aanpak voor toewijzing van schaarse middelen waar betere alternatieven ontbreken, en stimulatie van efficiënt gebruik van schaarse middelen.

Transitie in de volle hele breedte aanvliegen

De grondstoffentransitie voor de chemie is onderdeel van een veel bredere maatschappelijke systeemtransitie. Circulariteit van materialen is niet nieuw: plastic flessen, glas, metaal en papier zijn bekende, gevorderde vormen van circulariteit. Andere stoffen zoals strategische metalen en nu ook koolstof volgen. Ook voor zoetwatergebruik wordt circulariteit steeds meer noodzaak. Transitie van de chemie naar duurzaamheid is niet mogelijk zonder een duurzame aanpak van industrieel watergebruik. Drijvende krachten achter het ontstaan en groei van circulariteit waren en zijn bijvoorbeeld materiaalschaarste, energieverbruik, milieuoverwegingen en overheidsingrijpen: deze spelen ook een rol bij de circulariteit van koolstof en water. Brightsite benadert deze problematiek holistisch met transitiescenario's, demonstraties van nieuwe technologieën, stimuleren van goed onderwijs voor de toekomst en de sociale aspecten van de transitie voor de chemie. Het geheel van de programmaliijnen is meer dan de som der delen. Bij een dermate ingrijpende maatschappelijke transitie als die vóór ons ligt, is **Societal Readiness** de sleutel voor iedere stap en een proactieve benadering van burgerparticipatie een eerste vereiste. Maatschappelijke acceptatie vormt zelfs de belangrijkste drijfveer achter de transitie.

Deze Brightsite Transition Outlook 2023 is tot stand gekomen onder leiding van Céline Fellay, Programmamanager Transitiescenario's & systeemintegratie en Paul Brandts, Intelligence Officer Brightsite, in samenwerking met de Programmamanagers.

Wilt u bijdragen aan de transitie van de chemische industrie?

Brightsite zet zich in voor het realiseren van een duurzame, concurrerende chemische industrie. Hiervoor leveren we een belangrijke bijdrage aan de transitie van de chemische industrie naar hernieuwbare energie- en grondstoffen, met als doel de sector klimaatneutraal te maken met behoud van werkgelegenheid.

Herkent u zich in de werkwijze van Brightsite? Wilt u meer weten over hoe wij aankijken tegen de transitie in de chemie of wilt u met ons samenwerken?

Wij komen graag met u in contact.

 @brightsitecenter

 www.brightsitecenter.com/newsletter



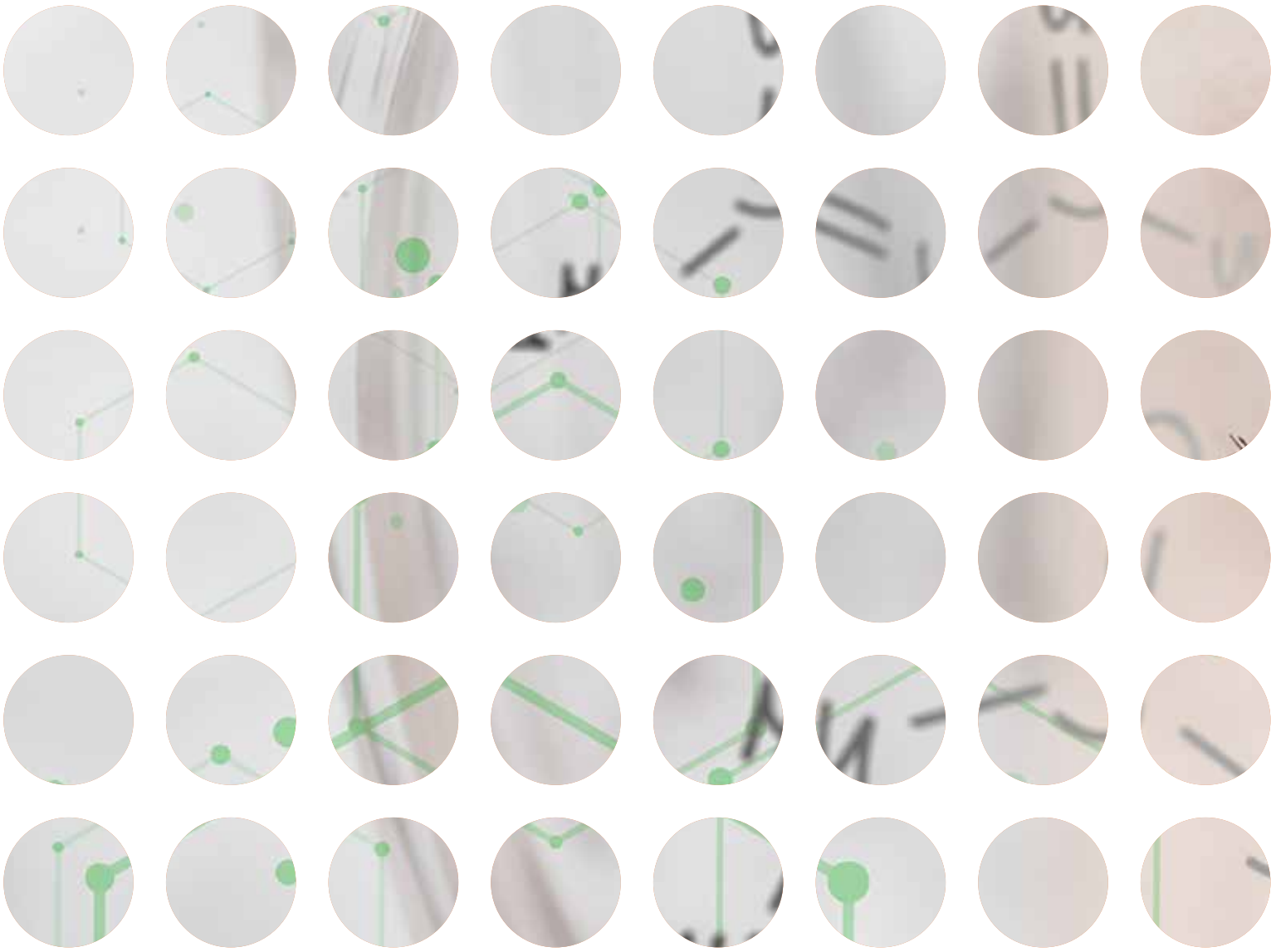
Deze publicatie is mede tot stand gekomen met ondersteuning van ChemistryNL en de Provincie Limburg.

 ChemistryNL

provincie limburg
gesubsidieerd door de Provincie Limburg 

DISCLAIMER

Scenario's en modelleringen in deze BTO zijn voorbeelden van meerdere varianten en zijn uitsluitend bedoeld om inzicht te bieden in hoe circulariteit van plastics, de energietransitie en broeikasgasreductie optimaal kunnen worden geïntegreerd. Resultaten zijn gevoelig voor aannames en zijn geen voorspellingen, maar verschaffen inzicht in sleutelfactoren die de overgang van een lineair naar een circulair systeem kenmerken en die besluitvorming over projecten, na te streven synergiën en stimuleringen kunnen bevorderen. De besproken aanpak en resultaten in dit rapport komen niet noodzakelijkerwijs overeen met benaderingen van individuele bedrijven.



Brightsite
Transforming industry

Proud partners
Sitech Services
TNO
Maastricht University
Brightlands Chemelot Campus