

MMIP 6

Grondstoffen en producten voor circulariteit van koolstof



Kernteam MMIP 6

Ronald Korstanje, trekker (TKI Energie en Industrie)

Rob Kreiter (TKI Energie en Industrie)

Oscar van den Brink (TKI Chemie)

Martijn van de Sande (RVO)

Harm-Jan Urbanus (TNO)

Kim Ragaert (Universiteit Maastricht)

Ulphard Thoden van Velzen (FBR-WUR)

Stephan Janbroers (TNO)

Jacco van Haveren (FBR-WUR)

Martijn de Graaf (TNO)

Andrea Ramirez Ramirez (TU Delft)

Petrus Postma (&Flux)

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	4
2 Innovatieopgave	6
2.1 Doelen MMIP 6: bijdrage aan missie C	6
Programmastructuur	6
2.2 Circulariteit (van kunststoffen)	7
2.3 Biograndstoffen	9
2.4 CCU	11
3 Innovatie-onderwerpen: uitwerking subthema's en Nederlandse inzet	13
3.1 Circulariteit (van kunststoffen)	13
3.1.1 Innovaties van plastic sorteren, voorbehandelen en scheiden	13
3.1.2 Conversieproces-innovaties	14
3.1.3 Product-innovaties	17
3.1.4 Keten-innovaties	19
3.1.5 Randvoorwaarden	20
3.2 Biograndstoffen	21
3.2.1 Innovaties op voorbehandeling, ontsluiting en zuivering	21
3.2.2 Conversie-proces innovaties	21
3.2.3 Product-innovaties	23
3.2.4 Keten-innovaties	26
3.2.5 Randvoorwaarden	26
3.3 CCU	27
3.3.1 Afvangen, ontsluiten en opwerken van koolstofbronnen	27
3.3.2 Mineralisatie van CO ₂	29
3.3.3 Conversie van CO ₂ en CO naar platformchemicaliën	30
3.3.4 Product-innovatie	32
3.3.5 Keten-innovatie	33
3.3.6 Randvoorwaarden: impact op systeemniveau, maatschappelijke inbedding	33
4 Nederlandse innovatie-activiteiten	35
Deelprogramma 1: Circulariteit	35
Deelprogramma 2: Biograndstoffen	36
Deelprogramma 3: CCU	36
6. Samenhang op hoofdlijnen	37
7. Stakeholders/actoren	38
6 Omgevingsanalyse en -factoren	40
6.1 Digitalisering	40
6.2 Human Capital Agenda (HCA)	42
6.3 Omgevingsanalyse en -factoren Circulariteit	43
6.4 Omgevingsanalyse en -factoren Biograndstoffen	43
6.5 Omgevingsanalyse en -factoren CCU	44
7 Communicatie, leren en disseminatie	45
8 Financiering en randvoorwaarden	46
7.1 Nationaal Groeifonds programma's	46
7.2 Subsidieregelingen	46
7.3 Randvoorwaarden	46
Referenties	47

Samenvatting

De Nederlandse industrie speelt een belangrijke rol in onze economie en samenleving. Tegelijk is zij verantwoordelijk voor ongeveer veertig procent van de uitstoot van broeikasgassen in ons land. Het is de maatschappelijke opgave om te transformeren naar een duurzame en inclusieve industrie, die een brede maatschappelijke welvaart levert en zo bijdraagt aan de kwaliteit van leven, de werkgelegenheid en de concurrentiepositie van Nederland, nu en in de toekomst.

Het klimaatakkoord en coalitieakkoord geven richting aan deze industriële transformatie: in 2050 is de industrie circulair en stoot ze vrijwel geen broeikasgas meer uit. De fabrieken draaien dan op duurzame elektriciteit uit zon en wind of energie uit aardwarmte, waterstof en biogas. De grondstoffen komen uit biomassa en reststromen en -gassen. De restwarmte gebruikt de industrie zelf of levert ze aan de tuinbouw of gebouwen en woningen. De industrie is dan naast gebruiker van energie ook producent en buffer van energie. In 2030 moet de industrie al flink minder CO₂ uitstoten. Dat is een tussenstap op weg naar volledige duurzaamheid.

Innovatie is noodzakelijk om deze ambitie te realiseren. Veel van de nieuwe manieren van produceren staan nog in de kinderschoenen en zijn nog niet marktrijp. Bedrijven investeren zelf in deze vernieuwing. Er zijn ook subsidie en overige instrumenten nodig om de ontwikkeling op gang te krijgen. Op die manier kan de industrie uitgroeien tot de meest CO₂-efficiënte industrie in Europa, en wel op een manier die de internationale concurrentiepositie niet in gevaar brengt.

Topconsortium voor kennis en innovatie Energie en Industrie (TKI E&I) ontwikkelt als onderdeel van de Topsector Energie de innovatieprogramma's die gerichte en programmatische innovatie mogelijk maken. Dit zijn Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's). Elk MMIP schetst wat de verwachte bijdragen zijn aan de missies en welke kennis- en innovatieopgaven op korte termijn moeten worden opgepakt ten behoeve van onderzoek, ontwikkeling, demonstratie en implementatie. De missie voor de industrie is gedefinieerd als:

Missie C:

Een klimaatneutrale en circulaire industrie in 2050.

De innovaties voor Missie C worden ingevuld in MMIP 6, 7 en 8, die complementair en onderling nauw verweven zijn:

MMIP 6: Grondstoffen en producten voor
circulariteit van koolstof

MMIP 7: CO₂-vrije industriële energiehuishouding

MMIP 8: Keten- en systeemaspecten

Hierbij richt MMIP 6 zich op het hergebruik van grondstoffen en producten en MMIP 7 op de energiehuishouding van de industrie. MMIP 8 is een programma dat integraal kijkt naar energie en grondstoffen en daarbij ook aandacht heeft voor de (digitale) infrastructuur, transport en opslag.

MMIP 6: Grondstoffen en producten voor circulariteit van koolstof

Dit programma draagt bij aan de doelen van het Klimaatakkoord en coalitieakkoord om de broeikasgasemissies van de industrie in 2030 te verminderen met 19,4 Mton CO₂, het verbruik van primaire grondstoffen in 2030 met 50 procent te verminderen, en biograndstoffen als vervanger van fossiele grondstoffen in te zetten. Daarmee wordt ook een bijdrage geleverd aan het doel van het Nationaal Programma Circulaire Economie, dat wil zeggen: volledig circulair in 2050, waarbij gebruik van virgin grondstoffen niet hoger is dan mogelijk binnen planetaire grenzen.

De innovatieopgave van dit MMIP ligt in het oplossen van knelpunten in drie deelprogramma's en de bijbehorende innovatiethema's:

- Circulariteit (van kunststoffen): het vergroten van de circulariteit van kunststoffen om fossiele koolstof overbodig te maken.
- Biograndstoffen (voor producten): het vervangen van fossiele grondstoffen door biograndstoffen voor de productie van hoogwaardige producten en transportbrandstoffen.
- Carbon Capture and Usage (CCU): de afvang, het ontsluiten en het gebruik van CO en CO₂ als grondstof voor producten.

Het MMIP richt zich met deze thema's op technische, economische, ecologische, sociale en institutionele veranderingsvraagstukken. Voor de korte termijn (resultaten in de periode tot 2030) ligt de nadruk op het verbeteren van de materiaal- en energie-efficiëntie van bestaande processen. Voor de middellange en lange termijn (technologie beschikbaar na 2030) worden structurele innovaties ontwikkeld voor nieuwe materialen op basis van biograndstoffen en doorbraakinnovaties onderzocht zoals de conversie van CO₂ naar platformchemicaliën.

Belangrijke succesfactoren voor dit MMIP liggen op het gebied van digitalisering en human capital. Daarnaast zijn er randvoorwaarden op het gebied van duurzaamheidsbeleid (o.a. ook water- en land gebruik), energiebeleid en industriebeleid, de ontwikkeling van normen en standaarden en maatschappelijke inbedding.

1. Inleiding

In het Klimaatakkoord zijn de doelen vastgesteld voor de CO₂-emissiereductie die de industrie in 2030 moet bereiken: 49% reductie ten opzichte van 1990. In de Europese Green Deal is dit aangescherpt tot 55%. Dit doel voor de korte termijn legt de focus op maatregelen die de emissies 'aan de schoorsteen' verminderen. Uitstoot later en elders (scope 3) en andere duurzaamheidsaspecten worden daarin minder meegenomen en een fundamentele transformatie van de industrie blijft uit.

Kijken we verder vooruit, naar 2050, dan ontstaat een perspectief van een industrie die klimaatneutraal én circulair is. Dit is de missie die centraal staat in het innovatiebeleid voor de industrie. Naar aanleiding van het klimaatakkoord is deze gedefinieerd als:

Missie C:

Een klimaatneutrale en circulaire industrie in 2050.

Met Missie C wordt ook een bijdrage geleverd aan het doel van het Nationaal Programma Circulaire Economie, dat wil zeggen: volledig circulair in 2050, waarbij gebruik van virgine grondstoffen niet hoger is dan mogelijk binnen planetaire grenzen. In 2050 zijn waardeketens circulair en duurzaam, zoals geformuleerd in het grondstoffenakkoord en uitgewerkt in de vier transitieagenda's circulaire economie.

Hieronder wordt verstaan dat in deze ketens:

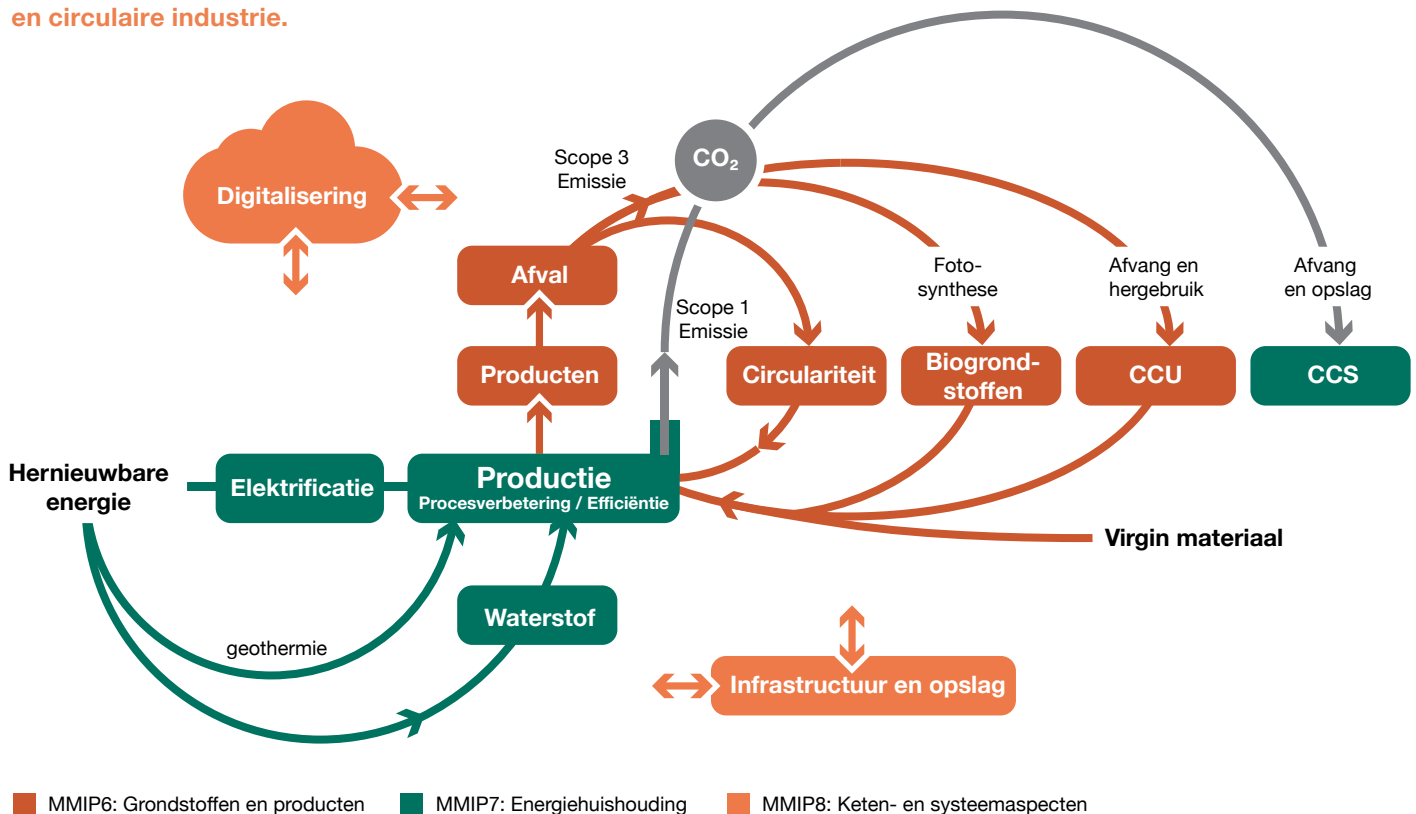
- Grondstoffen hoogwaardig worden benut;
- De productie van afval wordt geminimaliseerd;
- Er zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van duurzaam verkregen biograndstoffen;
- Alle gebruikte energie duurzaam wordt opgewekt.

Om Missie C te bereiken zullen er fundamentele keuzes gemaakt moeten worden over hoe de industrie omgebouwd gaat worden tot een intrinsiek duurzame industrie, die niet meer gevoed wordt met fossiele grondstoffen maar met duurzame bronnen. Schematisch is dit weergegeven in figuur 1.

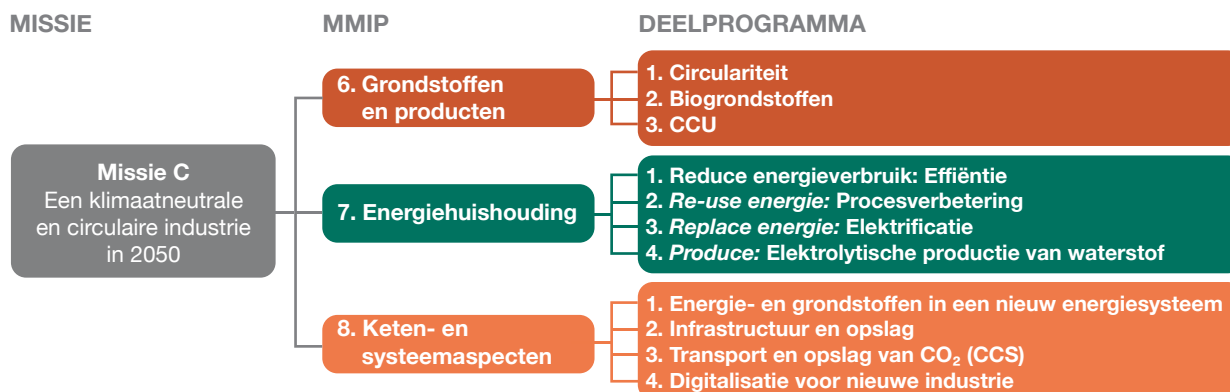
Een duurzame industrie vraagt om duurzame ketens van grondstoffen en producten, om een duurzame energievoorziening en om integratie van en tussen ketens. Dit zijn de onderwerpen van de drie Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's) die bijdragen aan missie C. Elk MMIP schetst wat de verwachte bijdragen zijn aan de missies en welke kennis- en innovatieopgaven op korte termijn moeten worden opgepakt ten behoeve van onderzoek, ontwikkeling, demonstratie en implementatie.

De grondstoffen- en energietransitie staan centraal in respectievelijk MMIP 6 en MMIP 7. De integratie tussen ketens

Figuur 1: Inrichting van toekomstige duurzame ketens van grondstoffen en energie voor een klimaatneutrale en circulaire industrie.



Figuur 2: Missie C met indeling naar innovatieprogramma's en deelprogramma's.



en binnen het industriële grondstoffen- en energiesysteem is het onderwerp van MMIP 8. Figuur 2 toont deze innovatieprogramma's met de bijbehorende deelprogramma's. Daarmee zijn alle hoofdthema's voor de missie afgedekt.

Het voorliggende document, MMIP 6, beschrijft de innovatieopgaven voor grondstoffen en producten, gericht op circulariteit van koolstof. In deze beschrijving wordt een overzicht gegeven van de innovaties die momenteel relevant zijn, wordt ingegaan op wat de status is van de diverse innovaties in Nederland en hoe deze kunnen bijdragen aan de CO₂-emissiereductie en circulariteitsdoelen en wordt in het kader van circulariteit tevens ingegaan op de koolstofhuishouding van Nederland. Het is de bedoeling dat dit document gebruikt wordt bij en richting geeft aan innovatietenders zoals deze in het kader van deze missie worden uitgezet.

Het volgende hoofdstuk, **hoofdstuk 2**, beschrijft de opbouw van MMIP 6: de doelen, de deelprogramma's en de innovatieonderwerpen die daaronder vallen op hoofdlijnen. **Hoofdstuk 3** gaat dieper in op de innovatieonderwerpen en is met name gericht op inhoudelijk specialisten. **Hoofdstuk 4** beschrijft de belangrijkste innovatieactiviteiten die de komende jaren nodig zijn en waar dit MMIP op inzet. **Hoofdstuk 5, 6 en 7** beschrijven respectievelijk de belangrijkste stakeholders en actoren binnen het innovatielandschap, de omgeving waarbinnen innovatie plaatsvindt (met nadruk op digitalisering en human capital) en de methoden om opgedane kennis te dissemineren.

Nieuw in deze herijking

Dit document is onderdeel van de herijking van de MMIP's in 2023. De MMIP's zijn oorspronkelijk in 2019 opgesteld. Vanwege maatschappelijke ontwikkelingen, verschuivingen in de doelen en prioriteiten en vooruitgang in innovatie worden de MMIP's periodiek herijkt.

Ten aanzien van 2019 is er een verschuiving van prioriteiten in Missie C, welke ook voor MMIP 6 relevant zijn. Zo is er naar aanleiding van het in 2022 verschenen IPCC-rapport duidelijke behoefte aan een onderzoeksprogramma waarbij de ontwikkeling van technieken en ketens die leiden tot mogelijke negatieve CO₂-emissie worden beschreven. Het gaat daarbij om het langs biologische of technische weg vastleggen van CO₂ om zo te komen tot afremming en uiteindelijk omkering van klimaatverandering.

Tevens worden innovatiedoelen gericht op emissiereductie binnen scope 3 met koolstofcirculariteit als belangrijkste doel, is er versterkte aandacht voor de digitale transformatie van de industrie en wordt er verzaamd ingezet op integratie van de waardeketens.

In de herijking van 2022 is CCS als deelprogramma opgenomen in MMIP 8, omdat hier geen innovaties gericht op grondstof- en materiaalproductie op industriële schaal onder vallen maar voornamelijk systeemintegratie-innovaties een rol spelen. Het deelprogramma circulaire non-ferrometalen uit de vorige versie van MMIP 6 is in deze nieuwe versie niet meer opgenomen, vanwege de inperking naar circulariteit van koolstof. Non-ferrometalen zijn essentieel voor de energietransitie, als een enabler. In de KIA circulaire economie zijn ze inmiddels ook opgenomen. Daar passen innovaties aan recycling van non-ferrometalen in een palet van innovaties aan circulaire processen, producten en diensten. De circulariteit in MMIP 6 heeft als doel om broeikasgasemissies te reduceren, gebaseerd op productie van grondstoffen en producten.

2. Innovatieopgave

2.1 Doelen MMIP 6: bijdrage aan missie C

MMIP 6 is in hoofdzaak gericht op circulariteit, het tweede deel van missie C: Een klimaatneutrale en circulaire industrie in 2050. Het beschrijft innovaties die leiden tot sluiting van industriële grondstof/materiaalketens in de industrie, welke bijdragen aan de verduurzaming van de industrie (scope 3-maatregelen) en op kostenefficiënte wijze tot CO₂-reductie leiden. De doelstelling voor grondstoffen en producten is concreet geformuleerd in het Nationaal Programma Circulaire Economie, als: volledig circulair in 2050, waarbij gebruik van virgin grondstoffen niet hoger is dan mogelijk binnen planetaire grenzen. Er is een tussendoel geformuleerd om in 2030 vijftig procent minder primaire grondstoffen te verbruiken.

Onder het hergebruik van grondstoffen en producten vallen technologieën die de koolstofketen sluiten en het gebruik van virgin fossiele grondstoffen vermijden. Dat gaat om het verhogen van de circulariteit van kunststoffen, maar hieronder valt ook het gebruik van CO/ CO₂ door middel van Carbon

Capture and Usage (CCU) en het gebruik van biograndstoffen. Deze alternatieven verdienen de voorkeur als deze voldoen aan de functionaliteitseisen en een kleinere ecologische voetafdruk hebben dan fossiele grondstoffen. Kortom, als door de inzet van grondstoffen duidelijke (economische en/of duurzaamheids) meerwaarde wordt gecreëerd.

Programmastructuur

Het huidige MMIP 6 kent de volgende deelprogramma's:

- Deelprogramma 1 - Circulariteit (van kunststoffen)
- Deelprogramma 2 - Biograndstoffen (voor producten)
- Deelprogramma 3 - CCU (Carbon Capture and Usage - de afvang en het gebruik van CO en CO₂ als grondstof voor producten)

De programmastructuur inclusief de doelen is samengevat in Tabel 2.1.

Tabel 1: Programmastructuur en MMIP-doelen

MMIP 6	Grondstoffen en producten voor circulariteit van koolstof		
MMIP-doelen	50% reductie van het primair gebruik van fossiele koolstof in 2030, naar vrij van virgin fossiele input in 2050.		
Deelprogramma	Circulariteit	Bio-grondstoffen	CCU
Deelprogramma doelen	50% reductie van primaire grondstoffen voor kunststoffen in 2030 t.o.v. 2016, wat overeenkomt met 950 kton fossiele virgin kunststoffen.	20% van het fossiele koolstofverbruik van 2023 in 2050 vervangen door duurzame biograndstoffen	CO en/of CO ₂ -hergebruik voorziet in 10-25% van de koolstofvraag in 2050
Subthema's	Innovaties van plastics sorteren, voorbehandelen en scheiden Conversieproces-innovaties Product-innovaties gericht op ontwerp voor recycling Keten-innovaties	Innovaties op voorbehandeling, ontsluiting en zuivering Conversieproces-innovaties Product-innovaties Keten-innovaties	Afvang, ontsluiting en opwerking van koolstofbronnen (incl. gasreiniging en -scheiding) Mineralisatie van CO ₂ Conversie van CO ₂ en CO naar platformchemicaliën Product-innovatie Keten-innovaties
	Randvoorwaarden (o.a. economisch, duurzaamheid, LCA, juridisch)		

Om deze doelen te behalen en duidelijk te maken waar oplossingen nodig zijn worden de 3 deelprogramma's hieronder in meer detail beschreven.

2.2 Circulariteit (van kunststoffen)

Voor Circulariteit van kunststoffen geldt dat op de volgende MMIP doelen zal worden geacteerd:

- In 2030 50 procent minder primaire grondstoffen (mineralen, metalen, fossiel) te verbruiken t.o.v. 1990;
- De broeikasgasemissies van de industrie in 2030 te verminderd met 19,5 Mton CO₂ (59% emissiereductie t.o.v. 1990);

In de 'Adviesroute naar een circulaire economie voor kunststoffen' (2) zijn deze doelen specifiek gemaakt voor kunststoffen waarbij 50% reductie van primaire input gelijk staat aan een reductie van 950 kT kunststoffen. De hieraan direct te relateren reductie van CO₂-emissie bedraagt 3105 kton. Vanuit de Versnellingstafel Chemische Recycling is in hun roadmap de ambitie beschreven om 555 kton kunststof te recyclen via chemische recycling.

Het deelprogramma Circulariteit richt zich op het verhogen van de circulariteit van kunststoffen. De reden hiervoor is dat 70 tot 80 % van de fossiele koolstof die in materialen wordt gebruikt, gebruikt wordt voor de productie van kunststoffen. Kunststoffen kunnen in potentie volledig gerecycled kunnen worden. De 20-30 % van de fossiele koolstof die gebruikt wordt in producten als vluchtige oplosmiddelen, coatings, smeermiddelen en was- en schoonmaakmiddelen kunnen niet tot dezelfde producten gerecycled worden.

Kunststoffen (6-7%) zijn, naast brandstoffen (>90%), de grootste categorie in toepassing van koolstof. En Nederland is een (relatief) groot kunststofproducerend (en -exporterend) land (1) en dus is streven naar circulariteit van deze kunststoffen economisch en ecologisch van groot belang.

Kunststoffen bestaan grotendeels uit koolstof en worden in het huidige afvalverwerkingssysteem na gebruik voor het belangrijkste deel verbrand. Daarmee belandt fossiele koolstof als CO₂ in de atmosfeer. Circulariteit van kunststoffen voorkomt emissies van de verbrandingsproducten en kan in vergelijking met de productie van virgin kunststoffen ook energiebesparing voor de productie bewerkstelligen.

Voor dit deelprogramma, Circulariteit van kunststoffen, geldt dat op de volgende MMIP-doelen zal worden geacteerd:

- In 2030 50 procent minder primaire grondstoffen (mineralen, metalen, fossiel) te verbruiken t.o.v. 1990;
- de broeikasgasemissies van de industrie in 2030 te verminderd met 19,5 Mton CO₂ (59% emissiereductie t.o.v. 1990);

In de 'Adviesroute naar een circulaire economie voor kunststoffen' (2) zijn deze doelen specifiek gemaakt voor kunststoffen waarbij 50% reductie van primaire input gelijk staat aan een reductie van 950 kT kunststoffen. De hieraan direct te

relateren reductie van CO₂-emissie bedraagt 3105 kT. Vanuit de Versnellingstafel Chemische Recycling is in hun roadmap de ambitie beschreven om 555 kT kunststof te recyclen via chemische recycling. Dit MMIP geeft richting aan de innovatieve oplossingen die hiervoor nodig zijn.

Plastic recycling is in Nederland relatief goed georganiseerd maar het recyclepercentage biedt nog veel ruimte voor verbetering. Het CE Delft rapport "Plasticgebruik en verwerking van plastic afval in Nederland" (3) geeft een goed overzicht en detailinformatie over de situatie in Nederland van plastics en daaruit kan goed uit gedestilleerd worden wat de uitdagingen zijn:

- Het absolute volume aan gebruik van plastic vertoont een groeiende trend in alle sectoren, de groei is het sterkst bij verpakkingen.
- Het recyclepercentage van plastics varieert sterk en hangt af van het type plastics en de toepassing.
- Er is onzekerheid over de recyclepercentages, bij afwezigheid van een duidelijke definitie. Een nieuwe Europese richtlijn (de EU Packaging and Packaging Waste Directive) zal meer duidelijkheid scheppen.
- De wetgeving (PPWR) voor verpakkingen zal vanaf 2024 veel meer duidelijkheid geven welke verpakkingen ontwikkeld moeten worden.
- Minimaal zestig procent van het verpakkingsplastic wordt verbrand. In Nederland wordt effectief 26% van het verpakkingsplastic van consumenten gerecycled.

Op basis van deze en overige gegevens kan worden geconcludeerd dat duidelijke verbeteringen in recycling van plastics een significante bijdrage kunnen leveren om de opgave van 50% afname in primaire grondstofgebruik in 2030 te halen.

Voor circulaire kunststoffen wordt ingezet op de doorontwikkeling en demonstratie van mechanische en chemische recyclingtechnologieën. Dit kan worden bereikt en moet ondersteund worden door systeembegrip en ontwerp van de plasticketen. Daarbij moeten worden meegenomen: vernieuwend materiaal- en productontwerp; (innovaties op en verbetering van) inzameling en sorteren; ende ontwikkeling van nieuwe businessmodellen en de maatschappelijke inbedding daarvan. Om tot commercialisatie te kunnen komen is het ook van belang om recycleaastaanden te ontwikkelen. Ook zullen relevante LCA-methoden, waarbij het totale keten denken wordt meegenomen, verder moeten worden ontwikkeld en toegepast. Dit zal door deze MMIP worden ondersteund. Deze innovaties moeten in 2050 resulteren in maximaal circulaire kunststofketens.

Tabel 2

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de innovatieopgave voor Circulariteit. De subthema's worden in hoofdstuk 4 uitgewerkt en in hoofdstuk 5 zijn de activiteiten per subthema benoemd.

Subthema	Innovatieopgave	Ambitie
Innovaties van plastics sorteren, voorberekings-technieken (ontgeuren/wassen/ontinkten) en scheiden	Doorontwikkeling van voorbereken, sorteren en scheiden gericht op vraag naar kwaliteit voor verwerking.	Vorbewerking, sortering en scheiding kosteneffectief en gericht op vraag naar kwaliteit.
Conversie proces-innovaties	Optimalisatie van mechanische recycling.	In-line kwaliteit verbetering door bijv. reactieve extrusie, ontgassing, dynamische procescontrole, etc.
	Volledig inzicht in feedstock-proces-output relatie van thermo-chemische recycling voor bulk mixed stromen.	Twee demo-installaties in 2025 en twee commerciële installaties in 2029.
	Ontwikkelen van chemische recyclingtechnologie voor plastic monostromen.	Chemisch recyclen van maximaal vijf monostromen, tot commercialisatie in 2025-2030.
Product-innovaties	Materiaal- en productinnovaties: ontwerp van duurzame nieuwe materialen en producten.	Ontwikkelen van eenvoudig recyclebare blends.
		Recycleerbare composieten.
		Verminderen van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS).
		Ontwikkelen van bio-gebaseerde en biodegradeerbare polymeren.
		Voorkomen/verminderen van microplastics.
		Ontwikkelen van herbruikbare plastic producten.
Keten-innovaties	Effectiever sluiten van de kunststof-waardeketens.	Effectiever verzamelen en aansluiten van sorteercapaciteit op marktvrage (750 kton mechanisch recycling en 550 kton chemisch recycling in 2030).
		Verkrijgen van inzicht hoe nieuwe technieken in een nieuwe keten op elkaar aansluiten en bijdragen tot duurzaamheid.
	In beleid en innovatie faciliteren van import van plastics.	Voor 2025 opstellen van goede beleidsinstrumenten. Voor 2025 creëren van inzicht in optimale logistiek en verwerking.
Randvoorwaarden	Gedrag en acceptatie rond circulaire producten en ketens.	Ontwikkeling van nieuwe duurzame waardeketens.
	Acceptatie en gedragselementen toevoegen aan impactmodellen.	In het stellen van prioriteiten voor beleidskeuzes worden gedrag en acceptatie meegenomen.

2.3 Biograndstoffen

Het vervangen van fossiele grondstoffen door biograndstoffen voor de productie van hoogwaardige producten en transportbrandstoffen levert een directe vermindering op van het gebruik van primaire fossiele grondstoffen. Met de doelstelling om in 2050 20% van het huidige fossiele grondstofverbruik te vervangen door biograndstoffen wordt zo een significante bijdrage geleverd om te komen tot verbruik van 50% minder primaire (niet-circulaire) grondstoffen. Daarbij is het belangrijk dat producten worden gemaakt die circulair zijn, waarbij wordt uitgegaan van design voor recycling principes waardoor circulair gebruik van koolstof wordt gerealiseerd.

De hoofdfocus richting 2030 en 2040 zal liggen op biograndstoffen voor materialen in hoogwaardige productketens, waarin de toegevoegde waarde hoog is. Echter, analoog aan bestaande fossiele aardolieraffinage-processen, biedt de bioraffinage en conversie van biograndstoffen mogelijkheden tot zeer efficiënte co-productie schema's waarbij zowel hoogwaardige (tussen)producten als biobrandstoffen gemaakt worden.

Gelet op de ontwikkeling van elektrische personenauto's en de wetgeving in de EU dat per 2035 elke nieuwe personenauto geen fossiele energiebron mag gebruiken, wordt ervoor gekozen om na 2030 geen ontwikkelingen van bio-transportbrandstoffen voor personenauto's te ondersteunen. De ontwikkelingen van biobrandstof na die tijd zullen zich richten op de luchtvaart en zeescheepvaart.

In dit deelprogramma is er aandacht voor voorbehandelingstechnieken om te komen tot goed gedefinieerde en zo zuiver mogelijke biomassastromen. Hier vallen ook (thermo)-chemische depolymerisatie en bioraffinage van complexe bio-gebaseerde stromen onder. Daarnaast is er aandacht voor biotechnologische en/of chemische conversie van biomassa naar hoogwaardige producten en

intermediatoren. Deze producten zullen in belangrijke mate dienen als bouwstenen voor hernieuwbare en circulaire (recyclebare) plastics (bijv. bio-aromaten zoals BTX, maar ook MEG en organische di-zuren en diolen).

Daarnaast zal een heel scala aan niet-kunststof producten ontwikkeld moeten worden voor toepassingen als was-en schoonmaakmiddelen, smeermiddelen, oplosmiddelen, lijmen en verven. Dit zijn producten die voor de Nederlandse chemiesector (en consumenten) van groot belang zijn en die niet op productniveau gerecycled kunnen worden en dus ontworpen moeten worden om bio-based en/of biologisch afbreekbaar te zijn.

Naast deze technische innovatieopgaven richt het programma zich op cross-disciplinaire en cross-sectorale samenwerking rond organisatorische innovaties, gericht op het mobiliseren van duurzame biomassaketens. Dit heeft als doel om de supply chain op middellange en lange termijn te kunnen waarborgen.

Het deelprogramma Biobased grondstoffen voor de industrie richt zich met name op onderstaande toepassingen:

- Hoogwaardige en complexe moleculen, waarvoor de chemische synthese op basis van fossiele bronnen of CO₂ zeer energie-intensief is (niches, high-end)
- Moleculen met een koolstofskelet groter dan C₄ en aromaten, diolen, dizuren. Dit zal altijd gepaard gaan met de conversie van kleinere moleculen (CO, H₂ en CH₄).
- Polymeren zoals bio-PET, PEF, bio-PE/PP, PLA en PHA en op lignine gebaseerde thermoplasten en thermoset kunststoffen.
- Biobased moleculen voor niet recyclebare toepassingen als was-en schoonmaakmiddelen, smeermiddelen, biobased verven, coatings en lijmen, biobased alternatieven voor ZZS
- Recyclebare bouwmaterialen, vanwege de lange levensduur vormen zij een vorm van koolstofopslag.
- Cellulose-, lignine- en zetmeel-gebaseerde polymeren
- Lignocellulosevezels onder meer voor biocomposieten

Tabel 3

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de innovatieopgave voor biograndstoffen. De subthema's worden in hoofdstuk 3 uitgewerkt en in hoofdstuk 4 zijn de activiteiten per subthema benoemd.

Subthema	Innovatieopgave	Ambitie
Innovaties op voorbehandeling, ontsluiting en zuivering	Ontwikkelen van voorbewerkingstechnieken die gecascadeerd gebruik van biomassa mogelijk maken.	Zuivering van homogene en energiedichte tussenproducten.
		Water- en mineralenterugwinning.
		Energiebesparing in voorbehandeling, ontsluiting en zuivering.
Conversie proces-innovaties	Bioraffinage en conversie van biobased grondstoffen naar chemicaliën en (circulaire) materialen.	<p>Hoogwaardige productketens ingevuld door biobased koolstof</p> <p>Ontwikkeling biobased bulkchemicaliën en hoogwaardige specialties.</p> <p>Drie bioraffinagecomplexen voor gecombineerde productie van chemische building blocks, brandstoffen en energie.</p> <p>Inzet biocokes voor de staalproductie technisch uitontwikkeld.</p>
Productinnovaties	Lignine Oliën en vetten Suikers	
Keteninnovaties	Mobiliseren van voldoende, duurzame beschikbaarheid van biobased grondstoffen.	In 2030 is voldoende duurzame biobased grondstof beschikbaar, efficiënte conversieprocessen voor producten voor de chemie. De parameter voor uitbouw van duurzame beschikbaarheid zijn bekend voor de periode na 2030.
		Sterk verbeterde eco-footprint van producten en processen.
Randvoorwaarden	Onderzoek of en hoe inzet van biobased grondstoffen een versterkende betekenis heeft voor people, planet en profit en bijdraagt aan de realisatie van maatschappelijke behoeftes.	<p>De inzet van biobased grondstoffen is gebaseerd op de grootte van ecologische effecten en de eisen die de samenleving heeft geformuleerd voor deze inzet.</p> <p>De samenleving heeft vertrouwen dat een circulaire economie kan worden vervuld met de bijdrage van biobased grondstoffen.</p>

2.4 CCU

In het deelprogramma CCU wordt beschreven waarom de afvang, het ontsluiten en gebruiken van CO₂ en CO als grondstof nodig is voor het behalen van de missie en welke uitdagingen daarvoor moeten worden aangepakt.

In 2050 is de wereldvraag naar koolstofgebaseerde producten (zoals plastics) verdubbeld, voornamelijk door de groei van de wereldbevolking en de toename van de levensstandaard (8). Alhoewel de koolstofvraag in Europa en Nederland constant zal blijven, moeten we tegelijkertijd toe naar nul netto emissies en zo volledig mogelijke circulariteit. Naar verwachting is onvoldoende verantwoord verkregen biobased koolstof beschikbaar om in aanvulling op de circulaire koolstof te voorzien in de totale behoefte. Daarnaast zullen, afhankelijk van plaats en tijd, biobased grondstoffen en grondstoffen uit CCU wedijveren om de laagste ecologische voetafdruk. Nova Instituut, WUR en TNO schatten in dat in 2050 ongeveer 10-25% van de totale koolstofvraag gedekt zal moeten worden door conversie van CO₂ en/of CO uit onvermijdelijke emissies (bijv. uit de cement en staalindustrie), biogene afvalgassen, biogas emissies of zelfs uit de lucht en water. Alhoewel de omzetting naar koolwaterstoffen energie-intensief is, is zij cruciaal voor het sluiten van de koolstofketen in het kader van een CO₂ neutrale en circulaire economie.

In een samenleving waar CO₂-emissies minimaal moeten zijn, is CCU een essentieel onderdeel van de grondstoffentransitie. De duurzaamheid van deze aanpak is echter sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van groene elektriciteit en waterstof en de oorsprong van CO₂. Daarnaast hebben verschillende CCU-routes sterk verschillende rest-emissies van CO₂, en daarmee een verschillende impact op klimaat- en circulariteitsdoelen.

De afwegingen bij de keuze voor CCU zal daarom steeds gebaseerd moeten zijn op een onafhankelijke vergelijking tussen circulaire koolstof opties op basis van grondstoffefficiëntie, de ecofootprint over de hele keten en de economische waardecreatie en de maatschappelijke functie van het product. CCU kan zeker bijdragen aan CO₂-reductie, maar over de gehele keten bezien moet de vrijkomende CO₂-emissie dan lager zijn dan het fossiele alternatief en het liefst zelfs negatief over de levenscyclus.

Er bestaan diverse manieren om CO₂ of CO om te zetten naar waardevolle producten. Daarbij dient er oog te zijn voor de keten- en systeemaspecten en is er nog een grote technisch-economische innovatieslag te maken op het gebied van efficiency en ketenrendement. De meest kansrijke omzettingroutes omvatten in volgorde van maturiteit: thermo-katalytische, biochemische, elektrochemische, fotochemische en plasma-gebaseerde omzettingen. Bij deze omzettingroutes is een significante verbetering van energie- en conversie-efficiëntie vereist. Om commercieel relevant te zijn, moet daarom worden onderzocht in welke periode en onder welke systeemcondities deze technieken daadwerkelijk ingezet kunnen worden om bij te kunnen dragen aan de klimaat- en circulariteitsdoelen. Daarnaast moet verzekerd worden dat ze op schaal toepasbaar zijn onder industrieel relevante condities in de nationale en internationale industrieclusters. De geschiktheid van locaties voor de productie van de op CO₂ of CO en duurzame waterstof gebaseerde producten zal sterk beïnvloed worden door de lokale beschikbaarheid van de essentiële grondstoffen en minder door de afstand tot de gebruikersmarkt. Dit geldt vooral voor chemicaliën en brandstoffen maar in mindere mate voor materialen.

Tabel 4

In de onderstaande tabel worden de innovatieopgaven op het gebied van CCU gestructureerd weergegeven. De subthema's worden in hoofdstuk 3 uitgewerkt en in hoofdstuk 4 zijn de activiteiten per subthema benoemd.

Subthema	Innovatieopgave	Ambitie
Het afvangen, ontsluiten en opwerken van CO ₂ en CO bronnen (incl. gasreiniging en -scheiding)	Het afscheiden en zuiveren van CO ₂ en CO uit de bron voor verdere conversie naar producten.	Het op een zo efficiënte mogelijke wijze verkrijgen van zuivere CO ₂ en CO van puntbronnen en de lucht en water op industriële schaal.
Mineralisatie van CO ₂	Het grootschalig commercieel toepasbaar maken van CO ₂ in bouwmaterialen.	Beschikbaarheid van substantieel deel van de nieuwe bouwmaterialen gemaakt uit CO ₂ .
Conversie van CO ₂ en CO naar platformchemicaliën	Het op schaal verkrijgen van hoogwaardige platformchemicaliën op basis van CO ₂ en CO tegen acceptabele kosten.	Significante verbetering in CO ₂ - en CO-conversietechnologieën m.b.t. ketenrendement, energie- en conversie-efficiency op industriële schaal.
		Beschikbaarheid van flexibele processen waarbij omgegaan kan worden met variabele beschikbaarheid van energie (elektriciteit, H ₂) in transitie naar alleen duurzame bronnen.
		Beschikbaarheid van katalysatoren en/of reactoren die om kunnen gaan met onzuiverheden.
Product-innovatie	Het op grote schaal vanuit CCU kunnen produceren van hoogwaardige en te verkopen producten.	Productie en verkoop van producten die gebaseerd zijn op CO ₂ en/of CO.
		Ontwikkelen en vermarkten van CCU-gebaseerde brandstoffen, plastics, additieven en voedingsingrediënten
Keten-innovatie	Het opzetten van duurzame CCU-waardeketens.	In elk industrie-cluster is minstens één CCU-productieketen gerealiseerd.
		Realisatie van een koolstof-monitoringsysteem.
Randvoorwaarden	Wegnemen van niet-technologische belemmeringen voor CCU.	Prioritering van de juiste technologische ontwikkelingen die bijdragen aan het maatschappelijk belang (economisch, ecologisch en sociaal).
		Realisatie van beleid dat integrale, duurzame productieketens op basis van CCU stimuleert, gebaseerd op een track-systeem voor koolstof.

3. Innovatie-onderwerpen: uitwerking subthema's en Nederlandse inzet

Om inzicht te krijgen wat van belang is om de deelonderwerpen tot verdere ontwikkeling te brengen worden alle sub-thema's van de deelonderwerpen hier verder uitgewerkt. De onderlinge prioriteiten van de geïdentificeerde innovatieonderwerpen worden bepaald aan de hand van de innovatiedoelstellingen, Nederlandse sterktes en potentieel verdienvermogen. Het Nederlandse innovatie-ecosysteem voor de geïdentificeerde onderwerpen wordt beschreven en mate waarin Nederland het verschil kan maken.

3.1 Circulariteit van kunststoffen

Het deelprogramma bestaat uit de volgende subthema's:

- a Innovaties van plastics sorteren, voorbehandelen en scheiden
- a Conversieproces-innovaties
- b Product-innovaties
- c Keten-innovaties
- d Generieke aspecten

Nederland is internationaal een voorloper op het gebied van innovaties en strategieën om plastics duurzamer te maken. Nederland en Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen spelen ook een actieve rol in internationale samenwerking op het gebied van plastic recycling. Daarnaast heeft Nederland een goed ontwikkeld logistiek systeem van afvalinzameling. In dat opzicht liggen er in Nederland goede kansen en mogelijkheden om grote stappen te maken in het circulair maken van de diverse plastic ketens en een leidende kennis en systeem positie in de wereld op te bouwen in dit veld.

3.1.1. Innovaties van plastic sorteren, voorbehandelen en scheiden

Innovatieopgave: Doorontwikkeling van voorbereken, sorteren en scheiden gericht op vraag naar kwaliteit voor verwerking.

Ambitie: Voorberekening, sortering en scheiding kosteneffectief en gericht op vraag naar kwaliteit.

Het sorteren, voorbehandelen en scheiden van plastics is van wezenlijk belang voor het goed opzetten en optimaal functioneren van circulaire plastic waardeketens. Door deze stap worden gespecificeerde grondstoffen aangeleverd die verwerkt kunnen worden naar recyclaat. Het is daarmee direct en integraal verbonden met de conversieprocessen die het recyclaat produceren, maar ook met de kwaliteit van het ingezamelde materiaal en daarmee met product-innovaties. Het heeft een directe en grote invloed op het behalen van primaire grondstof en CO₂-reductie doelen, omdat het als integraal aspect in de keten van wezenlijke betekenis is om deze doelen te halen, zoals grondstofzekerheid en kwaliteit.

De huidige situatie in Nederland is dat de kennisontwikkeling zeer snel verloopt, dat er veel industriële partijen zijn die, dan wel in door de overheid gesubsidieerde projecten dan wel in industrieprojecten, actief zijn met de ontwikkeling van nieuwe inzichten en technieken en dat er veel vragen van de markt zijn om nieuwe ontwikkelingen te introduceren. Belangrijke spelers die actief zijn in dit werkgebied zijn KIDV, WUR-FBR en de demofaciliteit van NTCP. Dit heeft nog niet geleid tot veel nieuwe marktintroductions. Het economisch potentieel is groot omdat er in Nederland vele bedrijven zijn welke actief investeren in nieuwe innovaties. Deze nieuwe innovaties leveren een indirecte en matige bijdrage aan de MMIP-doelstelling "50 procent minder primaire grondstoffen verbruik t.o.v. 1990, welke bijdragen aan de verduurzaming van de industrie (scope 3-maatregelen) en op kostenefficiënte wijze tot CO₂-reductie leiden"

In de MMIP 2019 was ervan uitgegaan dat doorontwikkeling van technologie voor inzameling, voorbereken, sorteren en scheiding na 2022 was gerealiseerd en dat inzameling van verschillende applicatie/stromen was geoptimaliseerd. Dit is niet het geval en daarom moet deze activiteit nog minimaal tot 2026 worden voortgezet. Hierbij ligt de nadruk op het specifiek geschikt maken van gesorteerde plastics voor levensmiddelentoe toepassingen middels *perfect sorting*. Dit is een onderwerp wat o.a. wordt opgepakt door NTCP in projecten samen met andere kennispartijen en industriële partners. Daarnaast ligt er een belangrijke opgave in voorberekening en sorteren/scheiden van textiel. Dit is een onderwerp waar middelen voor beschikbaar gaan komen door middel van de op te richten UPV Textiel door brancheorganisatie Modint. Kennispartijen als Saxion Hogeschool spelen een belangrijke rol in het realiseren van nieuwe innovaties.

Om een goed beeld te hebben van wat er in de wereld speelt wordt technologie-ontwikkeling over de hele wereld gevolgd. Dit gebeurt o.a. in het MOOI project InReP, waar een brede technologie assessment wordt uitgevoerd op nieuwe en in ontwikkeling zijnde sorteerkarakteriseer en voorbehandelingstechnieken welke relevant zijn voor plastic verpakkingen. Een dergelijk assessment moet ook voor andere toepassingsgebieden worden uitgevoerd om inzicht te geven in wat mogelijk is en nog noodzakelijk om verder te ontwikkelen. Deze informatie moet verder gebruikt worden in specifieke projecten van het NGF CP.NL.

Sorteren

In Nederland is, ondersteund door het Ministerie van I&W en de Provincie Friesland, geïnvesteerd in een demo locatie voor sorteren, voorbehandelen en scheiden van plastics; het Nationaal Testcentrum Circulair Plastics in Heerenveen. Hiermee is een relevante test en innovatie hub gerealiseerd. Deze richt zich met de huidige demo-lijn alleen op verpakingsplastics (uit huis- en

institutioneel afval). Hier worden, samen met kennisinstellingen en bedrijven, nieuwe karakterisatie tools ontwikkeld en getest, worden nieuw ontwikkelde verpakkingsconcepten getest, en wordt gewerkt aan “perfect sorting” strategieën om te komen tot specifiek gedefinieerde stromen welke direct als voeding voor een conversieproces kunnen dienen.

Omdat karakterisatie van materialen van wezenlijk belang is voor het snel en accuraat sorteren, is TI-COAST een relevant en actief netwerk van kennisinstellingen en bedrijven die hier aan werken. Van belang voor een efficiënte operatie is snelle en specifieke verwerking van data. AI-gebaseerde technieken, waarbij de diverse data-operationele onderdelen van een sorteerlijn aan elkaar worden gebonden en waarbij ook nieuwe robotica geïntegreerd kan worden, worden o.a. door TI-COAST ondersteund en worden toegepast in de demo-industriële setting van het NTCP. Ook voor deze toepassingen relatief nieuwe analysetechnieken zoals snelle IR of RAMAN zullen worden verkend en mogelijk geïmplementeerd in de demo-lijn.

Naast ontwikkeling van nieuwe in-line technologie is ook ontwikkeling van at-line karakterisatie technieken noodzakelijk. Ook in de ontwikkeling van deze technieken speelt het TI-COAST net werk een relevante rol. In Nederland zijn er, naast het NTCP, diverse onderzoeksgroepen welke actief zijn op het sorteren van plastics, zoals TU-Delft en WUR-FBR. TU-Delft is hierbij vooral actief op het ontwikkelen van nieuwe manieren van sorteren en nieuwe sorteertechnieken, waarbij WUR-FBR vooral actief is op het doen van onderzoek op de samenstelling van ingezameld afval.

Mechatronica

In het integraal opzetten en optimaliseren van nieuwe sorteerlijnen met nieuwe analytische tools, waarbij de integratie van data gerelateerd aan diverse mechanische functies wordt geregeld is mechatronica onontbeerlijk. Mechatronica is een soort van toegepaste digitalisatie en wordt 1-op-1 verbonden met alles wat te maken heeft met Industry-4.0. In Nederland zijn er diverse mechatronica onderzoeks- en ontwikkelgroepen (TU Delft, U Twente, TU/e) die o.a. actief zijn op sorteren en scheiden. Er is daarmee een wezenlijk innovatie-ecosysteem in Nederland aanwezig. Dit innovatie-ecosysteem zal door NGF CP.NL verder worden uitgebreid en versterkt. Zo zal er specifiek worden gewerkt aan technologische innovaties voor effectieve sortering/scheiding en voorbehandeling van textiel en tapijt.

Voorbehandeling

Specifieke was en/of oplos strategieën, als voorbehandeling of als in-line uitvoering, zijn voorbeelden van technologieën waarmee de chemische stabiliteit kan worden bereikt, geurafwijkingen kunnen worden voorkomen en contaminanten in voldoende mate kunnen worden afgescheiden. Er is in Nederland een groeiend aantal kennispartijen en

start-up bedrijven die zich bezig houden met specifieke voorbehandelingstechnieken, waaronder dissolutie-technieken. Voorbeelden daarvan zijn TNO, Universiteit Maastricht en Obbotec.

Digital twins

Naast technologie ontwikkeling is het ook van belang om het sorteren van afval conceptueel te benaderen. Omdat het sorteren als doel heeft om een zo goed mogelijk te verwerken stroom aan plastics te genereren voor de opvolgende processen, maar ook om zoveel mogelijk van het afval naar een te verwerken stroom te dirigeren zodat wettelijke recyclingdoelstellingen worden gehaald. Tegelijkertijd is de kwaliteit van het gemaakte sorteerproduct cruciaal voor het recyclingbedrijf. Echter omdat kwaliteit veel dimensies kent en elk recyclingbedrijf andere dimensies belangrijk kan vinden, is een goede karakterisering en analyse van de kwaliteit in al zijn dimensies van groot belang. Met behulp van referentie data van bestaande systemen kan hiervoor een zogenaamde digital-twin gemaakt worden. Dit gebeurt o.a. bij TNO.

3.1.2 Conversieproces-innovaties

Innovatieopgave: Optimalisatie van mechanische recycling.

Ambitie: in-line kwaliteit verbetering door bijv. reactieve extrusie, ontgassing, dynamische procescontrole etc.

Innovatieopgave: Volledig inzicht in feedstock-proces-output relatie van thermo-chemische recycling voor bulk mixed stromen.

Ambitie: twee demo-installaties in 2025 en twee commerciële installaties in 2029.

Innovatieopgave: Ontwikkelen van chemische recyclingtechnologie voor plastic monostromen.

Ambitie: Chemisch recyclen van maximaal vijf monostromen, tot commercialisatie in 2025-2030.

Het realiseren van robuuste en effectieve conversieprocessen voor plastics tot nieuwe plastic grondstoffen (recycalaat, gezuiverde monomeren, kraker-feedstock), levert een directe bijdrage aan de reductie van primair grondstofgebruik en de CO₂-reductie doelstellingen. De ambitie om te komen tot 750 kT mechanisch gerecycleerd plastics in 2030, zoals geformuleerd in de MMIP 6 van 2019, wordt aangehouden waarbij de nadruk moet worden gelegd op hogere waarde, waarbij levensmiddelen-toepassingen, zowel vanwege de omvang als vanwege de uitdaging te kunnen voldoen aan wetgeving, de ultieme toepassing zijn. Uitgaande van een gemiddelde CO₂-impact van 2.4 kg CO₂ per kg polymeer voor PE, PP en PET (12) komt dit neer op een CO₂-reductie van 1,8 Mton per jaar, waarbij geen rekening is gehouden met de CO₂-impact van het recyclingproces.

De conversieprocessen die betrekking hebben op circulariteit van plastics worden als volgt gerangschikt:

- Mechanische recycling/conversie
- Chemische depolymerisatie
- Thermo-chemische depolymerisatie

Deze nieuwe innovaties leveren een directe en hoge bijdrage aan de MMIP-doelstellingen. Dit moet leiden tot een recycling van plastics in 2030 middels chemische en thermochemische depolymerisatie van 550 kT in 2030. Uitgaande van een gemiddelde CO₂-impact van 2.5 kg CO₂ per kg polymeer voor gemengde plastics (12) komt dit neer op een CO₂-reductie van 1,4 Mton per jaar, waarbij geen rekening is gehouden met de CO₂-impact van het recyclingproces.

Mechanische recycling

Bij mechanische recycling blijven de chemische verbindingen van het plastic intact en wordt het plastic gereinigd en daarna omgesmolten tot een nieuw plastic; het recycalaat. Dit is technisch gezien een bekend en toegepast proces, maar in het licht van gebruik van grondstof afkomstig uit afvalplastics zijn er nieuwe uitdagingen die nog veel onderzoek behoeven. Uitdagingen welke een belangrijke rol spelen bij het realiseren van recycalaat van commerciële hoogwaardige kwaliteit zijn chemische en mechanische stabiliteit, in vergelijking met virgin kwaliteit, het voorkomen van geurafwijkingen en hoe omgegaan moet worden met gevaarlijke contaminanten en ongewenste stoffen (zeer zorgwekkende stoffen [ZZS-en], Intentionally added substances [IAS] en non-intentionally added substances [NIAS]) die tijdens gebruik en/of inzameling in het materiaal gekomen zijn.

De chemische stabiliteit speelt een belangrijke rol bij verpakking van voedsel en medicijnen maar ook voor automotive en home-goods. Om die reden zijn er zeer strenge regels in ontwikkeling voor gebruik van recycalaat voor deze toepassingen. Omdat nu onbekend is waar contaminanten in polyolefinerecycalaat vandaan komt en de aanwezigheid daarvan dus ook niet kan worden uitgesloten, is het nu binnen het wettelijk kader (EU 2022/1616) en door de EFSA gehanteerde risicobeoordelingsprotocol onmogelijk om de grootste groep levensmiddelenverpakkingen mechanisch te recyclen naar een levensmiddelenverpakking. Voor een echte doorbraak richting een meer circulaire economie voor verpakkingen is het onontbeerlijk dat we ook leren te begrijpen waar contaminanten in polyolefines vandaan komen en hoe we ze kunnen uitsluiten. Alleen door een fundamenteel en gedegen inzicht te ontwikkelen in de herkomst van contaminanten in polyolefine-recyclaten en verwijderingstechnologieën te ontwikkelen, kan er voldoende bewijs worden geleverd dat er risico's kunnen worden uitgesloten, waarna er meer recycalaat circulair zou kunnen worden toegepast. Er is veel kennis van contaminanten in recyclaten bij WUR-FBR en RIVM.

Achteruitgang in mechanische stabiliteit komt door veroudering en/of her-verwerken van plastics. Daarnaast ontstaat mechanische instabiliteit doordat de zuiverheid van het recycalaat te laag is. Kennis en specifiek gebruik van duurzame en te recycleren stabilisatoren om veroudering en kwaliteitsachteruitgang door herverwerking te voorkomen is daarom belangrijk. Naast effectief scheiden om een zo zuiver mogelijke voeding te krijgen is gebruik van duurzame en recycleerbare compatibilisers van belang om mechanische instabiliteit door onzuiverheden op te vangen. Tevens is onderzoek naar het tijdens extrusie verlengen van ketens voor (hoofdzakelijk) polycondensaten relevant zodat deze sneller en effectiever hergebruikt kunnen worden. Ook is het mogelijk om in-line, tijdens het extrusieproces, bewerkingen uit te voeren die als doel hebben het verbeteren van de recycalaat kwaliteit. Dit kan door bijvoorbeeld door probleemcomponenten (ZZS-en) specifiek tijdens extrusie te verwijderen met behulp van oplosmiddelen en gebruik van reactieve extrusie i.c.m. compatibilizers om de stabiliteit van recycalaat te verbeteren.

Er is in Nederland voldoende kennis en capaciteit beschikbaar om hier gericht aan te werken. Bijvoorbeeld bij PSP in Zwolle, WUR-FBR in Wageningen, NHL Stenden, Universiteit Maastricht of TNO-BMC. Voor mechanische recycling/conversie van plastics geldt dat dit al vele jaren wordt uitgevoerd met bestaande spuit-giet en extrusie technieken. Om recycalaat kwaliteit te verbeteren en te vergroten en toepassing in hogere waarde toepassingen mogelijk te maken zijn er diverse voorbehandelingstechnieken in ontwikkeling. Deze zijn nog niet op commerciële schaal beschikbaar. Het economisch potentieel van deze ontwikkelingen voor Nederland is relatief laag omdat veel van de bedrijven actief in deze ontwikkelingen niet Nederlands zijn.

Chemische depolymerisatie

Chemische depolymerisatie van polycondensaten is het door middel van (bio)-chemie afbreken van de polymeren in plastic. Er bestaan diverse chemische routes zoals glycolyse, hydrolyse en aminolyse. Met deze processen kunnen polycondensaten als PET, PA en PUR worden omgezet in hun monomeren. Daarnaast bestaan er ook dissolutie technieken, voor bijvoorbeeld polystyreen, welke onder chemische recycling worden gevat.

Chemische depolymerisatie wordt toegepast op zowel zuivere als vervuilde stromen. Bij zuivere stromen is het doel om een recycalaat te produceren waar producten van te maken zijn met eenzelfde functionaliteit als het oorspronkelijke plastic. Hierbij bepaalt de uitvoering en efficiency van het depolymerisatieproces voor een belangrijk deel of dit proces commercieel opschaalbaar is. Bij vervuilde stromen is het van belang om eerst een zuiveringstap efficiënt uit te voeren waarna een recycalaat geproduceerd wordt waar producten van te maken zijn met eenzelfde functionaliteit als het oorspronkelijke plastic.

Een combinatie van een efficiënt en goedkoop scheidingsproces en een robuust depolymerisatieproces waar een gradiënt van rest-vervuilingen tot weinig verstoring leidt en effectieve terugwinning van de depolymerisatie-vloeistof, is hiervoor de preferente richting.

Bij dissolutie is het de bedoeling om een zuiver recyclelaat te krijgen door het oplossen van de plastics matrix en het afscheiden van onzuiverheden. Een efficiënt en goedkoop scheidingsproces in combinatie met een efficiënte terugwinning van oplosmiddel zal hierbij bepalend zijn voor de commerciële toepassing.

Gelet op bovenstaande zijn de algemene uitdagingen waar oplossingen voor gevonden moeten worden het kunnen gebruiken van een stabiele grondstofstroom met een constante kwaliteit, het efficiënt terugwinnen van een gezuiverd oplosmiddel of reactant en het efficiënt opzuiveren van de polymeren, oligomeren of monomeren (afhankelijk van type plastic en proces). Omdat ieder polymeer z'n eigen specifiek chemisch depolymerisatie proces behoeft is het om die reden belangrijk dat ontwikkeling van verschillende chemische recyclingtechnologieën voor moeilijk mechanisch te recyclen monostromen wordt uitgevoerd, naast ontwikkeling van verschillende chemische recyclingtechnologieën specifiek om te depolymeriseren.

In Nederland is er vooral in het noorden veel kennis op het gebied van depolymerisatie. NHL Stenden en Hanze Hogeschool zijn hiervan de beste voorbeelden. De bedrijven Cure en Ioniqa zijn in hun innovatie-activiteiten nauw verbonden met deze kennisinstellingen, waarin TU/e ook een belangrijke rol speelt. Op het gebied van dissolutie is met name TNO actief. WUR-FBR richt zich op enzymatische depolymerisatie.

Chemische depolymerisatie is zeer veelbelovend en is sterk in ontwikkeling in Nederland vanuit een kennispositie van polycondensaten welke zich in het verleden heeft ontwikkeld in Nederland (Akzo). Vanwege de grote hoeveelheden van met name PET is het economisch potentieel groot omdat er in Nederland enkele bedrijven zijn die effectieve innovaties ontwikkelen (CURE, Ioniqa). Deze zijn met name gericht op het ontwikkelen van verschillende chemische recyclingtechnologieën voor moeilijk mechanisch te recyclen monostromen door middel van scheiden van polymeren van andere stoffen met het doel zo zuiver mogelijk recyclelaat te krijgen. Er staan diverse investeringen in demo-faciliteiten op het programma waarmee de commerciële toepassing een stap dichterbij komt.

Naast PET, met belangrijke toepassingen in (levensmiddelen) verpakkingen en textiel, zijn PUR (matrassen en bouw) en Styrenen (veelal bouw en automotive) grote plastic groepen waar nieuwe innovaties op worden ingezet. Hierbij is de ontwikkeling gericht op chemische recyclingtechnologieën specifiek om te depolymeriseren.

Het economisch potentieel van chemische recycling is groot omdat er in Nederland vele bedrijven zijn welke actief investeren in nieuwe innovaties en er grote stromen plastics beschikbaar zijn. Deze nieuwe innovaties leveren een hoge bijdrage aan de MMIP-doelstellingen. De activiteiten om te komen tot demo-fabrieken voor chemische recycling welke gepland staan in het NGF CP.NL geven voldoende vertrouwen dat doelstellingen kunnen worden gehaald en zijn in lijn met de plannen van MMIP 2019.

Thermo-chemische depolymerisatie

Thermo-chemische depolymerisatie van plastics is het door middel van warmte en een reactant (veelal waterdamp) afbreken van polymeren in een zuurstofloos milieu. Deze techniek wordt met name toegepast op polyolefinen zoals PP en PE. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen pyrolyse (400-700°C) en vergassing (700-1000°C). Zowel pyrolyse als vergassing richten zich op gemengde en (enigszins) vervuilde polyolefine-rijke stromen.

Bij pyrolyse is het gebruik van katalysatoren een mogelijkheid om de samenstelling van het product te beïnvloeden. Het product van pyrolyse is divers en, naast katalysatoren, afhankelijk van kwaliteit van de voeding en procesinstellingen: functionele moleculen als er veel biogene verontreiniging in de voeding zit, meer olefinen en monomeren bij grote hoeveelheden plastics, met de mogelijkheid om een deel direct om te zetten in transport brandstoffen. Een interessante pyrolyse technologie waar een lage temperatuur in combinatie met een efficiënte omzetting van gemengde plastics wordt toegepast is superkritische watervergassing. Deze wordt o.a. door Mura-Dow (HydroPRS) en SCW systems verder ontwikkeld. Aan deze techniek is in het verleden uitgebreid onderzoek gedaan op de U Twente.

Bij vergassing wordt met een beperkte hoeveelheid zuurstof gewerkt. Lage temperatuur vergassing (< 900°C) levert een gas met daarin aromaten en olefinen. Hoge temperatuur vergassing (>900°C) levert met name syngas (CO+H₂) op. Het syngas is een bruikbare feed voor de productie van methanol wat gebruikt kan worden voor de productie van olefinen.

De uitdagingen bij pyrolyse waar oplossingen voor gevonden moeten worden zijn het kunnen gebruiken van een stabiele stroom als voeding met een zo constant mogelijke kwaliteit, het zo efficiënt mogelijk omzetten van de voeding naar een eindproduct (monomeren) wat zoveel mogelijk lijkt op fossiele nafta of het katalytisch omzetten van de voeding tot Benzeen, Xyleen en Tolueen (BTX) waarbij de katalysator intact blijft, het produceren van zo weinig mogelijk teer en het op grote schaal continu bedrijven van een plastic pyrolyse proces. Om die reden is ontwikkeling van optimale procescondities gericht op katalysator stabiliteit en het terugwinnen en opzuiveren van product van belang. Door deze ontwikkeling kan de ontwikkeling van 2 commerciële installatie voor pyrolyse van plastics naar

kraker feedstock gerealiseerd worden in 2029. Het is gepland dat dit binnen het NGF CP.NL zal worden gerealiseerd door industriële consortia.

Er is in Nederland geruime kennis en ervaring met pyrolyse (RUG, U Twente, TNO), superkritisch water omzetting (U Twente) en vergassing (TU Delft en TNO). De verdere ontwikkeling van thermo-chemische depolymerisatie van plastics, en met name pyrolyse, wordt door de petrochemische industrie sterk ondersteund omdat hiermee een op nafta lijkend recylaat wordt geproduceerd wat relatief eenvoudig kan worden toegevoerd in de bestaande krakers. Het economisch potentieel van chemische recycling is groot omdat er in Nederland diverse petrochemische bedrijven zijn welke actief investeren in nieuwe innovaties en er grote stromen plastics voor pyrolyse beschikbaar zijn. Om verbranding van plastics volledig uit te bannen en een sluitende keten te kunnen krijgen is naast pyrolyse ook vergassing nodig. Op dit gebied vindt veel innovatie plaats bij partijen als Enerkem en Synova. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze stromen voor een belangrijk deel uit het buitenland moeten komen. Dit is logisch omdat Nederland een grote netto exporteur is van plastics. Om de cirkel rond te krijgen moet er daarom geïmporteerd worden. De Versnellingsstafel Chemische Recycling heeft dit duidelijk beschreven in hun roadmap. Deze import is een keten-beslissing, maar onontbeerlijk om de bouw van commerciële pyrolyse faciliteiten te faciliteren.

In de komende jaren staan diverse investeringen in demo-faciliteiten gepland voor diverse plastic pyrolyse technieken waaronder ook in het NGF CP.NL. Deze zijn in lijn met de plannen zoals beschreven in de MMIP 2019.

3.1.3 Product-innovaties

Innovatieopgave: Materiaal- en productinnovaties: ontwerp van duurzame nieuwe materialen en producten.

Ambities:

- *Ontwikkelen van eenvoudig recyclebare blends.*
- *Recycleerbare composieten.*
- *Verminderen van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS).*
- *Ontwikkelen van bio-gebaseerde en biodegradeerbare polymeren.*
- *Voorkomen/verminderen van microplastics.*
- *Ontwikkelen van herbruikbare plastic producten.*

Product-innovaties worden gedreven door eindgebruikers van producten. Eindgebruikers worden door de overheid aangesproken op hun verantwoordelijkheid voor recycleren van de plastic producten die ze op de markt brengen via UPV's. Daarnaast worden eindgebruikers aangesproken op hun plastic productie door NGO's zoals Greenpeace en EllenMacArthur Foundation. Om die reden hebben veel eindgebruikers commitments afgegeven

voor het recycleerbaar maken van hun producten. Hierbij volgen ze de adviezen zoals beschreven staan in design-for-recycling guidelines zoals opgesteld door CEFLEX (voor flexiblen) en het KIDV (voor verpakkingen). Om de ontwikkelingen verder te ontwikkelen is er in Nederland een goede en uitgebreide kennisbasis op universitair en hogeschool niveau.

Vele eindgebruikers die verpakkingen op de markt brengen, zoals Unilever en Nestlé, hebben beloofd dat in 2025 al hun verpakkingen recycleerbaar zullen zijn. Uitgaande van een toename van recycling van alle verpakkingen tot 95% in 2030 betekent dit dat, gebaseerd op de cijfers van 2020 (4) 620 kT verpakkingsplastic wordt gerecycleerd. Dit levert een totale CO2 reductie op van 1.5 Mton/jaar en betekent een toename van 450 kton/jaar t.o.v. 2020. Deze nieuwe innovaties leveren daarmee directe en significante bijdrage aan de MMIP doelstellingen.

Product-innovaties kunnen bijdragen aan deze doelstellingen door toepassing van de diverse r-strategieën zoals reductie, hergebruik en recycleren.

Reductie

Het PlasticPact.NL heeft als doel te komen tot reductie van plastic. Er zijn inmiddels vele producten op de markt welke eerst van plastic waren en nu van papier, bio-polymeer/papier combinaties of andere producten uit biogebaseerde grondstof als vervanging voor plastics. Deze leveren een groeiende bijdrage aan de reductie van primair grondstofgebruik. Uitdagingen hierbij zijn de functionaliteit van deze producten t.o.v. de plastic producten. Ook is de prijs vaak veel hoger waardoor marktsucces beperkt is. Ook is de duurzaamheid van deze producten onderwerp van discussie, omdat niet zondermeer kan worden aangetoond dat deze beter is.

Er is in Nederland veel kennis en ervaring voor het ontwikkelen van biogebaseerde producten die een vervanging van plastics voorzien. WUR, RUG, UVA, WUR-FBR, U Twente en U Maastricht en ook diverse hogescholen zijn actief in dit veld. Het is de bedoeling dat ontwikkelingen voor 2030 resulteren in het opzetten van minimaal 3 demo-fabrieken voor de productie van biogebaseerde dan wel biodegradeerbare nieuwe materialen dan wel eindproducten.

Hergebruik

Hergebruik van plastic producten is groeiend. Een nieuwe trend is hergebruik van (non-food) verpakkingen door toepassing van dispenser systemen. De trend van hergebruik levert hier vooral logistieke en consumentengedrag gerelateerde uitdagingen. Een mogelijke uitdaging in dit verband ligt in de (voedingsgerelateerde) veiligheid van hergebruik van voedselverpakkingen voor verse/kort houdbare/gekoelde producten. Materiaalgerichte innovaties (easy to clean coatings/anti-bacteriële coatings/reduced water spoilage cleaning) zijn hier relevant. De reinigingsprocedures die nu

gangbaar zijn bij Duitse meermalige PET flessen zorgen voor een beperkte afname van de optische helderheid en de mechanische sterkte van de fles met elke omloop, waardoor marketeers ze al na 6 à 8 omlopen afkeuren. Voor polyolefines is de relatie van hergebruik met opeenvolgende reiniging en de lange termijn stabiliteit nog niet bekend.

Er is dus behoefte aan onderzoek naar de relatie tussen hergebruik en de invloed van reiniging om te begrijpen hoe bestaande kunststoffen dan wel nieuwe/aangepaste kunststoffen het alkalisch wassen beter kunnen doorstaan. Ook is geen herbruikbare oplossing voor zogenoemde modified atmosphere packages (MAP). Deze MAP verpakkingen worden voor tal van versproducten (vlees, vis, kaas, vega, groente, noten, etc.) gebruikt en moeten een hoge gas barrière hebben (om de beschermende atmosfeer te behouden) en gelijktijdig herbruikbaar en dus hersluitbaar zijn. Hiervoor zijn nog geen oplossingen beschikbaar.

In Nederland zijn diverse universiteiten en kennisinstituten met veel kennis op het gebied van functionele coatings, zoals WUR, TU/e en RUG. Al deze hergebruik toepassingen kunnen op termijn leiden tot een zeer relevante reductie van gebruik van grondstoffen.

Ontwerp voor recycling

In het ontwerpen van recycleerbare plastic producten ligt de focus op twee aspecten. Ten eerste op het streven naar producten die bestaan uit mono-polymere onderdelen en het zoveel mogelijk beperken van het aantal typen plastics. Ten tweede als verpakkingen / objecten uit meerdere componenten van andere materialen bestaan, dat deze dan gemakkelijk scheidbaar zijn (bijvoorbeeld door delaminatie). Met dergelijke producten is sorteren eenvoudiger en ontstaan grote stromen van zuivere mono-polymere plastics die naar hoogwaardig recyclelaat kunnen worden omgezet.

Een inherente uitdaging bij mono-polymere plastic producten is de recycling compatibiliteit van de sealing lagen. Deze sealings hebben, als ze al uit hetzelfde polymeer bestaan, een heel andere polymere dichtheid waardoor ze niet te mengen zijn met het plastic. Om die reden moeten sealing lagen eenvoudig afwasbaar zijn, om een stabiel te verwerken mono-plastic te krijgen.

Een uitdaging bij het streven naar mono-polymere onderdelen is dat de functionaliteit niet voldoende is. Oplossingen hiervoor kunnen bestaan uit het toevoegen van een extra laag of een specifieke toevoeging aan het plastics waardoor voldoende functionaliteit ontstaat. Voorbeeld is het in minder dan 5% toepassen van EVOH in combinatie met een PE folie om doorlaatbaarheid van zuurstof te beperken. Door CEFLEX wordt geclaimd dat op deze manier de PE-folie functioneel en toch recycleerbaar is. Gesubstantieerd bewijs hiervoor ontbreekt nog, maar deze denkrichting biedt wel goede mogelijkheden voor onderzoek en implementatie. Om te komen tot 95%

recycleerbare verpakkingsplastics in 2030 wordt dergelijk onderzoek om te komen tot mono-polymere en functionele verpakkingen ondersteund.

Een andere oplossing kan zijn dat de samenstelling van het plastic wordt aangepast, waardoor bepaalde functionaliteit wordt verbeterd en een mono-polymeer plastic voldoet, waar anders een multi-laags product werd gebruikt. Hiervoor is de ontwikkeling van specifieke additieven nodig. Dit moeten duurzame additieven zijn en mogen niet leiden tot Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS).

Het aanpassen van polymeren om daarmee de functionaliteit te beïnvloeden kan bijvoorbeeld door de introductie van co-polymeren. Uitdaging hierbij is om hier producten van te produceren die goed gerecycled kunnen worden. Maar deze route biedt voldoende mogelijkheden tot creatieve resultaten en wordt om die reden ondersteund.

Om recycleerbaarheid van plastics naar hoogwaardige toepassingen verder te bevorderen is het vervangen van ZZS voor duurzame en geaccepteerde stoffen of andere chemische of fysische maatregelen die de rol van deze stoffen vervangen van wezenlijk belang. Uitdaging is dat er heel veel ZZS zijn en deze in bijna alle typen plastics aanwezig zijn. Het doel is om in 2030 een vervanging van 50% van de ZZS voor duurzame alternatieven te hebben.

Recycling van composieten is bijzonder uitdagend vanwege de sterke covalente binding tussen polymere matrix en vezel/vulstof. Hieraan is al vele jaren en door vele groepen (zowel in NL als buitenland) gewerkt. Introductie van een zwakkere (non-covalente of flexibele) binding geeft veelal dat de functionaliteit van het composiet tekortschiet. Om die reden is de huidige praktijk dat plastic composiet wordt vernalen en op die manier wordt hergebruikt (bijv. rubber korrels van banden op kunstgrasvelden) of wordt ingemengd in een nieuwe blend, waarbij veelal de functionaliteit van de toepassing lager is dan de originele toepassing (down-cycling). Het blijft een stevige uitdaging om composiet recycling zonder down-cycling uit te voeren; het is desalniettemin de ambitie om hierin te investeren.

Biogebaseerde en biodegradeerbare polymeren

Het ontwikkelen van biogebaseerde en/of biodegradeerbare polymeren is belangrijk om te komen tot duurzame plastic ketens waarbij nieuwe inzet van fossiel wordt geminimaliseerd. Dit onderwerp wordt beschreven onder het deelprogramma biograndstoffen.

Microplastics zijn ontstaan door de introductie van plastics. Er is steeds meer bewijs dat microplastics overal voorkomen, inclusief de voedselketen en in dieren en mensen. De impact van microplastics is voor een belangrijk deel nog onbekend. Hier moet meer onderzoek naar worden gedaan, evenals naar het

voorkomen van de vorming en verspreiding van microplastics. De white-paper die TNO hierover in 2022 heeft gepubliceerd geeft goede inzichten hoe dit verder kan worden opgepakt (9).

3.1.4 Keten-innovaties

Innovatieopgave: Effectiever sluiten van de kunststof-waardeketens.

Ambitie:

- *Effectiever verzamelen en aansluiten van sorteer capaciteit op marktvraag (750 kton mechanisch recycling, en 550 kton chemisch recycling, in 2030).*
- *Verkrijgen van inzicht hoe nieuwe technieken in een nieuwe keten op elkaar aansluiten en bijdragen tot duurzaamheid.*

Innovatieopgave: In beleid en innovatie faciliteren van import van plastics.

Ambitie:

- *Voor 2025 opstellen van goede beleidsinstrumenten.*
- *Voor 2025 creëren van inzicht in optimale logistiek en verwerking.*

Bij innovaties om te komen tot een beter rendement van recycling van plastics in de keten gaat het om het effectiever sluiten van de kunststof waardeketens. In de MMIP 6 2019 werden de volgende keteninnovaties reeds beschreven:

- Het opzetten van databases in combinatie met modellen en het actief verzamelen van data van een keten waardoor een goed beeld ontstaat wat er gebeurt met producten in de keten op kwaliteits- en hoeveelheidsniveau.
- Het binnen ketens standaardiseren van recycle kwaliteit.
- Het ontwikkelen van LCA's waarbij de hele ketendynamiek is meegenomen.

Hieraan toegevoegd zijn:

- Het ontwikkelen van gesloten ketens, bijv. door introductie van statiegeld principes.
- Het ontwikkelen van systemisch inzicht hoe nieuwe technieken in een nieuwe keten op elkaar aansluiten.
- Het ontwikkelen van beleidsinstrumenten om gereguleerde import mogelijk te maken.
- Het ontwikkelen van inzicht in optimale logistiek en verwerking.

Deze innovaties zijn wezenlijk om circulaire principes eenvoudiger en sneller voor elkaar te krijgen en inzicht te krijgen en vertrouwen te hebben in nieuwe innovaties en deze ook daadwerkelijk op de markt te brengen. Daarmee dragen ze indirect bij aan de MMIP-doelstellingen.

Het opzetten van Uitgebreide Producenten Verantwoordelijkheid (UPV) voor alle productketens

UPV's zijn organisaties die de uitgebreide producenten verantwoordelijkheid voor het recyclen van producten die op de markt gebracht worden, organiseert. Een voorbeeld is het

Afvalfonds Verpakkingen. Het is nodig dat alle waardeketens van plastic producten een UPV opzetten, zodat recycling in die keten op een goede manier wordt georganiseerd. Een recente ontwikkeling is het opzetten van een UPV voor textiel. Deze is 1 januari 2024 actief. Naast het opzetten van nieuwe UPV's is ook het optimaliseren van bestaande UPV's belangrijk. Het gaat dan vooral om integratie van activiteiten over de hele keten en het leveren van relevante data die voor de hele keten van belang zijn voor het creëren van inzicht naar bottlenecks om te komen tot 100% recycling.

Het Ministerie van I&W is verantwoordelijk voor het creëren van een wettelijk kader waarin een UPV kan functioneren. De branche-organisaties zoals Modint zijn verantwoordelijk om UPV's op te zetten en uit te voeren. Het verder opzetten van UPV's heeft een belangrijke bijdrage voor het realiseren van recycledoelstellingen. Richting 2030 moet het de bedoeling zijn dat alle branches die relevante hoeveelheden kunststof op de markt brengen een UPV hebben opgezet. Dit betreft een uitbreiding van de activiteiten in de MMIP 6 2019.

Het ontwikkelen van gesloten ketens, bijv. door introductie van statiegeldprincipes.

Het opzetten van statiegeld principes draagt ertoe bij dat er gesloten ketens van gelijkvormige en gelijksoortige plastic producten worden ingezameld. Deze kunnen op een efficiënte, snelle en goedkope manier worden gesorteerd en volgens gestandaardiseerde processen effectief worden herverwerkt. Door de introductie hiervan wordt het "perfect sorting" principe ondersteund en kan op grote schaal worden toegepast. Om die reden wordt, waar dit logistiek mogelijk is, deze ontwikkeling ondersteund.

Voor de scheiding van consumenten afval wordt in Nederland naast elkaar gewerkt met bronscheiding dan wel nascheiding. Bij bronscheiding is sprake van het actief door de consument scheiden van bijvoorbeeld plastic, blik/metaal en drankkartons (PMD). Dit levert een stroom die relatief eenvoudig is te scheiden en dus efficiency voordelen heeft. Omdat bronscheiding niet overall praktisch is te realiseren, met name in hoogbouw in stedelijke gebieden, wordt een belangrijk aandeel van het consumenten afval via na-scheiding gescheiden.

Omdat manieren van verzamelen een direct effect hebben hoe de keten hier mee om moet gaan moeten innovaties op inzameling benaderd worden als een keten-innovatie, waarbij de invloed op de keten als resultaat moet worden opgeleverd. Het Copernicus Instituut, als onderdeel van de Universiteit Utrecht, naast FBR-WUR en TNO zijn goed voorbeelden van groepen die de juiste competenties hebben om dit soort onderzoek uit te voeren.

Het opzetten van databases in combinatie met modellen
Modellen met een koppeling naar databases over hoeveelheden

en kwaliteiten van de verschillende producten is nodig voor monitoring van zowel de hele keten als op product niveau. Dit type inzichten is belangrijk voor UPV's om de werkelijke recycling te kunnen monitoren, en daarnaast voor bedrijven en organisaties/branches om hun product stewardship goed te kunnen regelen.

Er zijn in Nederland al ontwikkelingen in die richting. Zo heeft Kalavasta een Carbon Transition Model (CTM) ontwikkeld om koolstof op industrie-locatie en op systeemniveau te monitoren en scenario's van interventies in de keten mee uit te voeren. TNO is actief met de ontwikkeling van een op plastics gericht model wat op een veel hoger detail niveau informatie op moet leveren over zowel de kwaliteit als de hoeveelheid van polymeer gerelateerde stromen in een plastic waardeketen: CITS. Dergelijke ontwikkelingen zijn van groot belang en worden om die reden ondersteund. Omdat er in 2028 Europese regelgeving komt waarin wordt bepaald dat alle koolstof in productieketens gevolgd moet kunnen worden, zal er ook in de plastics industrie een monitoring systeem opgezet moeten worden om dit mogelijk te maken.

Het ontwikkelen van systemisch inzicht hoe nieuwe technieken in een nieuwe keten op elkaar aansluiten

Omdat het werken in een systeem wat in transitie is van lineaire naar circulaire ketens waarbij veel nieuwe technologieën worden geïntroduceerd, veel onduidelijkheid kan geven hoe bepaalde technologieën elkaar kunnen ondersteunen, is het belangrijk om systemisch inzicht te ontwikkelen waarin de afhankelijkheid van de diverse technologieën duidelijk wordt. Er zijn in Nederland diverse onderzoeksgroepen en kennispartijen, zoals TNO, Copernicus en JADS die ervaring hebben met het opzetten van het benodigde systemisch inzicht.

Het binnen ketens ontwikkelen van standaarden voor recycleat kwaliteit en bijbehorende testmethoden

Om een stabiele en transparante markt van recycleat te creëren is het belangrijk dat standaarden worden ontwikkeld die beschrijven waar de kwaliteit van recycleat aan moet voldoen. NRK is samen met bedrijven en kennisinstellingen actief in het opzetten van deze standaarden voor recycleat uit mechanische recycling. Voor alle nieuw ontwikkelde en commercieel gerealiseerde conversie/recycling processen zullen ook recycleat standaarden moeten worden opgezet. Het is gepland in het NGF CP.NL om hier verdere invulling aan te geven.

Het ontwikkelen van beleidsinstrumenten om gereguleerde import mogelijk te maken

Omdat Nederland een netto exporteur is van plastics met er in het streven naar circulariteit binnen de Nederlandse landsgrenzen een evenwicht zijn tussen export en import van plastics. Momenteel wordt er veel plastics geïmporteerd in Nederland wat bestemd is voor verbranding voor energie.

Het is momenteel wettelijk niet mogelijk om dit plastic te gebruiken voor verwerking naar plastics, omdat dit buiten de stroom valt waar een UPV als Afvalfonds Verpakkingen voor verantwoordelijk is. Om dit mogelijk te maken is er beleid en wetgeving nodig waarin dit mogelijk wordt gemaakt.

Het ontwikkelen van inzicht in optimale logistiek en verwerking

Bij het opzetten van nieuwe circulaire ketens vanuit een bestaande lineaire situatie is sprake van nieuwe manieren van verwerken en een nieuwe manier van distributie van materialen over de diverse verwerkingsmogelijkheden. Dit creëert een volledig nieuwe logistieke situatie. Voor het goed functioneren van nieuwe circulaire ketens is het daarom van belang om inzicht te krijgen in een optimale logistiek in relatie tot de verwerking binnen een nieuwe keten.

Het ontwikkelen van LCA's waarbij de hele ketendynamiek is meegenomen

Om een goede beoordeling van de duurzaamheid van recycleat en gerecycleerd plastics te kunnen maken, moeten er LCA's worden ontwikkeld die het circulaire principe van de relevante keten beschrijven en meenemen. Dit is voor de meer gangbare systemen, waarbij er een instroom van nieuwe grondstof nodig is en een uitstroom van kwalitatief minder product plaatsvindt een ingewikkelder opgave. Er moeten tal van vragen worden opgelost hoe er met dit kwaliteitsverlies in de LCA afdoende kan worden omgegaan. Ook zullen reboundeffecten en additionaliteitsvragen (vervangt het product gemaakt van recycleat daadwerkelijk een primaire grondstof?) correct worden moeten beantwoord. Er zijn in Nederland diverse academische en hogeschool experts op dit gebied; bijv. U Maastricht, U Utrecht, WUR en RUG.

3.1.5 Randvoorwaarden

Innovatieopgave: Gedrag en acceptatie rond circulaire producten en ketens.

Ambitie: Ontwikkeling van nieuwe duurzame waardeketens.

Innovatieopgave: Acceptatie en gedragselementen toevoegen aan impactmodellen.

Ambitie: In het stellen van prioriteiten voor beleidskeuzes worden gedrag en acceptatie meegenomen.

Innovatieopgave: Ontwikkelen van wetten en financiële prikkels.

Ambitie: Nieuwe wetten en financiële prikkels geaccepteerd en klaar voor implementatie.

Acceptatie door de consument is cruciaal voor het welslagen van de introductie van duurzame circulaire kunststoffen voor de vele toepassingen die er zijn. Het is om die reden van groot belang om volledige en eenduidige productinformatie te hanteren om acceptatie en gedrag van consumenten te beïnvloeden. Dit moet

door brancheverenigingen worden ingezet en door de overheid op worden toegezien en worden ondersteund en zo mogelijk in regels of wetten worden afgedwongen.

Duurzame waardeketens, gebaseerd op duurzame en circulaire businessmodellen zijn nodig om introductie van duurzame circulaire producten mogelijk te maken. Uit onderzoek wordt steeds duidelijker dat circulariteit niet vanzelf door de markt wordt opgepakt (10). De overheid heeft een belangrijke rol om de transitie naar deze duurzame waardeketens mogelijk te maken en te ondersteunen. Hiervoor heeft de overheid de mogelijkheid om wetten en/of financiële prikkels te introduceren.

Om beleidskeuzes voor de ondersteuning van duurzame waardeketens bij overheidsinstanties en -organisaties inzichtelijk te maken is het nodig dat impactmodellen worden ontwikkeld waarbij gedrag en acceptatie voor duurzame producten worden meegenomen.

3.2 Biograndstoffen

Het deelprogramma Biograndstoffen is opgedeeld in de volgende subthema's:
Innovaties op voorbehandeling, ontsluiting en zuivering
a Conversieproces-innovaties
b Product-innovaties
c Keten-innovaties
d Generieke aspecten

3.2.1 Innovaties op voorbehandeling, ontsluiting en zuivering

Innovatieopgave: Ontwikkelen van voorbereidingstechnieken die gecascadeerd gebruik van biomassa mogelijk maken.

Ambitie:

- *Zuivering van homogene en energiedichte tussenproducten.*
- *Water- en mineralenterugwinning.*
- *Energiebesparing in voorbehandeling, ontsluiting en zuivering.*

Om de waarde van biograndstoffen te maximaliseren is behoud van functionaliteit van groot belang. Om behoud van (chemische of fysische) functionaliteit van biograndstoffen te bewerkstelligen is geoptimaliseerde voorbehandeling van de matrix waarin de biograndstoffen besloten zitten, ontsluiting uit de matrix en zuivering van deze stoffen na ontsluiting uit de matrix zeer belangrijk. Omdat de matrix waaruit biograndstoffen worden gewonnen zeer heterogeen is en, naast veel water, bestaat uit vele typen stoffen is het van belang om ontwikkeling van voorbereidingstechnieken die gecascadeerd gebruik van biomassa mogelijk maken te realiseren. Voor de verdere zuivering van de biograndstoffen van interesse is combinatie met technieken voor mineralen- en waterterugwinning van belang.

Ten opzichte van MMIP 6 2019 ligt de aandacht meer op processen waarbij energiegebruik en waterterugwinning meegenomen worden. Een belangrijk verschil tussen fossiele grondstoffen en biograndstoffen is het aandeel water. Voor de productie van bulkchemicaliën uit biograndstoffen is het (effectief) verwijderen van water erg belangrijk voor de kostprijsontwikkeling. Het ontwikkelen van effectieve processen om water te verwijderen is daarmee belangrijk voor het behalen van de doelstelling. Al deze technieken kosten veel energie. Omdat energie steeds kostbaarder wordt en er een link is met CO₂ uitstoot, is het de uitdaging bij het ontwikkelen en uitvoeren van deze processen om ze energetisch efficiënt te maken.

Er is in Nederland sprake van een jarenlange, diepe en zowel brede ervaring op het gebied van voorbehandeling, ontsluiting en zuivering met betrekking tot bio-gebaseerde stromen. Nederland heeft een uitgebreid kennisnetwerk op deze gebieden, bestaande uit universiteiten (o.a. TU Delft, WUR, U Twente), hogescholen (o.a. VanHall Larenstein, NHL Stenden, Hanze, Saxion) en instituten (o.a. W-FBR, Wetsus) om samen met bedrijven te werken aan deze uitdagingen.

Het economisch potentieel van deze innovaties is groot omdat er in Nederland vele bedrijven zijn welke actief investeren in nieuwe innovaties en inmiddels stabiele en internationaal opererende activiteiten hebben. Deze nieuwe innovaties leveren een indirecte en matige bijdrage aan de MMIP doelstelling "50 procent minder primaire grondstoffen verbruik t.o.v. 1990, welke bijdragen aan de verduurzaming van de industrie (scope 3-maatregelen) en op kostenefficiënte wijze tot CO₂-reductie leiden"

3.2.2 Conversie-proces innovaties

Innovatieopgave: Bioraffinage en conversie van biobased grondstoffen naar chemicaliën en (circulaire) materialen.

Ambitie:

- *Hoogwaardige productketens ingevuld door biobased koolstof*
- *Ontwikkeling biobased bulkchemicaliën en hoogwaardige specialties.*
- *Drie Bioraffinage complexen voor gecombineerde productie van chemische building blocks, brandstoffen en energie.*
- *Inzet biocokes voor de staalproductie technisch uitontwikkeld.*

Bij de conversie van biograndstoffen naar (platform)-chemicaliën of complexe verbindingen is energie-efficiëntie van groot belang om de CO₂-voetafdruk zo laag mogelijk te houden. Deze overweging moet worden meegenomen bij de ontwikkeling van deze processen:

- Thermochemische conversie naar (pyrolyse)olie voor chemie, inclusief de opwerking tot de gewenste kwaliteit/specificaties
- Thermochemische conversie naar gas voor de chemie- en transport sector, met de focus op coproductie van

hoogwaardige chemicaliën (zoals BTX) en zinvolle verwaarding van het restgas (bijvoorbeeld naar RNG of via syngas naar methanol of bio-brandstoffen);

- Chemisch-katalytische en biotechnologische conversie naar bestaande en nieuwe biobased bouwstenen (o.a. naar PLA, PHA's, organische (di-)zuren, diolen, glycolen (o.a. MEG/MPG), bio-aromaten) en producten op basis daarvan
- Toepasbaar maken van biobased bouwmaterialen voor grootschalige uitrol.

In Nederland is voldoende kennis op universiteiten (o.a. U Maastricht, TU Delft, WUR, U Twente, RUG), hogescholen en kennisinstellingen (TNO, W-FBR) om deze uitdagingen samen met bedrijven aan te gaan.

Nederlandse innovatie-activiteiten

Bij de transitie naar bio-gebaseerde alternatieven zijn meerdere innovaties nodig. Dat geldt ook voor de conversieprocessen. Er moeten tenslotte vele producten vergroenen waarbij gebruik wordt gemaakt aan een veelvoud aan bio-grondstoffen. Juist de diversiteit aan grondstoffen, inclusief de beschikbaarheid, en de diversiteit aan producten maakt dat er meerdere nieuwe conversieroutes ontwikkeld moeten worden. In Nederland wordt al veel aan nieuwe routes gewerkt. De nadruk ligt hierbij zowel op thermochemische als op biochemische routes.

Een relevante conversietechniek die vandaag veelvuldig wordt toegepast is transesterificatie. Bij dit proces worden zowel plantaardige als dierlijke oliën en vetten samen met methanol omgezet naar biodiesel (FAME). FAME is lange tijd toegepast omdat het, afhankelijk van het gebruikte vetzuur, een veel lagere CO₂ voetafdruk heeft (~45% tot 90% reductie t.o.v. fossiel). Echter, zoals eerder aangegeven is deze markt vanuit de Europese Unie gereguleerd en zal niet meer groeien. Wel is er aandacht voor de productie van FAME vanuit afgewerkte frituurolie, met name op de zuivering van de vervuilde, afgewerkte, olie. Juist het gebruik van deze afgewerkte oliën levert een grote reductie van broeikasgassen (~90% CO₂ reductie t.o.v. fossiel). Relevante innovatie op dit terrein moet om die reden ondersteund worden, als onderdeel van de transitie van fossiele diesel, naar biodiesel, naar elektrisch.

Een andere veelgebruikte conversietechniek van oliën en vetten is een combinatie van hydrogeneren en isomeriseren voor de productie van hernieuwbare diesel en SAF (HVO). HVO heeft een vergelijkbare CO₂-voetafdruk als FAME maar is sterk afhankelijk van de grondstoffen.

Relevante innovatie op dit terrein moet om die reden ondersteund worden, als onderdeel van de transitie van fossiele diesel, naar biodiesel, naar elektrisch.

Eén van de mogelijke oplossingen voor fossiel LPG is vervanging door bio-DME. Dit kan worden gemaakt uit bio-

methanol. Bio-methanol kan o.a. via vergassing (naar syngas) en vervolgens methanolsynthese worden verkregen. Via een syngas platform kunnen meerdere alternatieve brandstoffen en chemicaliën worden geproduceerd. Binnen Nederland zijn verschillende partijen actief om via vergassing van biogene reststromen tot brandstoffen en chemicaliën te komen. Voorbeelden hiervan zijn BEN, Gidara, HoSt, Furec, SCW, Synova en Torrgas. Een groot voordeel van deze technologieën is dat ze geschikt zijn voor de conversie van houtige biomassa, agro residuen en andere afvalstromen zoals mest. Hiermee kan typisch een CO₂ reductie worden behaald van meer dan 90% t.o.v. fossiele methanol.

Om tot efficiëntere processen te komen wordt waar mogelijk ingezet op chemicaliën coproductie. Zo ontwikkelt TNO en Bio-BTX een proces om aromaten (BTX) uit het productgas te oogsten. Dit gas kan dan worden omgezet naar b.v. bio-methaan of bio-methanol. Andere voorbeelden zijn Torrgas en BEN die beiden een vaste kool produceren wat als product kan worden gebruikt en daarmee een negatieve emissie realiseert.

Een andere thermochemische route waar veel innovatie plaats vindt is flash-pyrolyse waar het Nederlandse BTG koploper in is in de wereld op dit gebied met hun Fast Pyrolysis Bio Oil (FPBO). Echter, bijmenging van typische bio-olie heeft zijn beperkingen en er zijn nog altijd innovaties nodig om bio-olie te stabiliseren dan wel op te werken tot b.v. "drop-in" feed voor krakers. Een groot voordeel van pyrolyse is dat 90-95% CO₂-reductie worden behaald, afhankelijk van de locatie (bron: Master plan for CO₂ reduction in the Dutch shipping sector, Platform Duurzame Biobrandstoffen). Eventueel gebruik van fossiele waterstof het opwerken heeft weer een negatief effect. Hier geniet het gebruik van hernieuwbare waterstof de voorkeur.

Niet alleen voor het opwerken van grondstoffen, maar ook tijdens productie wordt veelvuldig gebruik gemaakt van katalytische processen, een industrie waar Nederland sterk vertegenwoordigd is. Innovaties op katalytisch gebied vinden plaats voor b.v. het zuiveren en opwerken van syngas, bij verschillende coproductie routes en productie van verschillende eindproducten. Voorbeelden zijn de BTX coproductie (ethyleen aromatiseren naar BTX), nieuwe methanol synthese routes middels membraan- en sorptie-technologieën.

Wat van groot belang is bij bovengenoemde conversies is de selectiviteit van katalysatoren en productiviteit van het proces. Hier liggen nog grote innovatie opgaven welke opgelost kunnen worden door universitaire groepen binnen U Utrecht, UvA, RUG en UTwente.

In veel gevallen zal de bio-grondstof eerst moeten worden voorbehandeld. In het simpelste geval gaat het om voorsorteren, wassen en op maat brengen zodat deze geschikt

is om in een proces in te voeren. Er zijn veel biogene stromen, zeker agroresiduen, vervuild met o.a. verschillen zouten en chlorides. Deze zullen moeten worden voorbehandeld om vervuiling en verslakken tijdens de hoge temperatuur conversie processen te voorkomen. Voorbeelden van nieuwe technologieën zijn van DES, Recell, TNO (Torwash) en WUR. De opgewerkte grondstoffen zijn pas na voorbehandeling geschikt voor thermochemische conversie maar typisch ook beter te vergisting of fermenteren.

Naast thermochemische conversies zijn ook biochemische conversies van zeer groot belang. Het gaat dan met name om anaerobe vergisting en fermentatie als conversie routes. Ook op dit gebied moet nog veel geïnnoveerd worden. Voor vergisten zijn er ook mogelijkheden om met eerder besproken voorbehandelingsmethoden en thermochemische processen te integreren. Ook op het gebied van fermentatie liggen veel kansen. Naast de commerciële processen om b.v. ethanol te produceren richt onderzoek zich o.a. op de productie van middellange vetzuren middels ketenverlenging, isobuteen uit suikerbiet, 1,4-butaandiol uit zetmeel en zelfs directe productie van eiwitten. Ook hier geldt dat syngas, via syngas fermentatie, een sleutelrol speelt in de productie van ethanol, butanol, azijnzuur, boterzuur en methaan.

In geval van biotechnologische omzetting zijn stabiele, laag-energetische en specifieke micro-organismen en/of enzymen nodig die een hoge titer realiseren. Er zijn in Nederland diverse hoog-technologische bio-tech bedrijven die op deze markt actief zijn. Onderzoek vindt plaats aan verschillende universiteiten en instituten zoals de TU-Delft en de Bioprocess Pilot Facility op de Biotech Campus in Delft, Universiteit Groningen, Universiteit Maastricht en WUR. Verder werken verschillende bedrijven, zoals DSM en Unilever, aan nieuwe processen.

In het algemeen geldt dat bij zowel de thermochemische- als de biochemische processen ook CO₂ wordt gevormd. Dit levert een puntbron van CO₂ welke kan worden ingezet voor CC(U)S / BECCS toepassingen. Daarnaast biedt het kansen om te integreren met de productie van hernieuwbare waterstof (waarbij ook zuivere zuurstof wordt gevormd). Door integratie van hernieuwbare waterstof en zuurstof kunnen bovenstaande processen worden geoptimaliseerd en kan nagenoeg 100% van de biogene koolstof worden omgezet in hoogwaardige producten.

3.2.3 Product-innovaties

De ontwikkeling van innovatieve, biogebaseerde producten gericht op specifieke marktsectoren is essentieel om tot een reductie van het primaire grondstofgebruik en CO₂-emissie te komen. Dynamische en duurzame biobased industrieën hebben het potentieel om veel ecologische, economische en sociale voordelen te bieden. De ontwikkeling van innovatieve

technologieën en hun opschaling naar commercieel niveau, zal een verdere impuls geven aan de transitie van fossiele naar hernieuwbare bronnen.

Gelet op de diversiteit aan producten die moeten verduurzamen zullen verschillende voorbehandelingsmethoden en conversietechnologieën parallel ontwikkeld moeten worden. Platformtechnologieën die een breed scala aan (voorbehandelde) grondstoffen kunnen verwerken hebben hierbij een voordeel. Vanuit (energie) efficiency oogpunt moet daarom hierop ingezet worden. Voor enkele voorbeelden van ontwikkelingen die nu plaatsvinden, inclusief TRL niveaus (11).

Er zijn producten die vanuit biomassa grondstoffen gemaakt kunnen worden en chemisch identiek zijn aan het fossiele "origineel". In deze gevallen is veelal de economie van de totale keten, resulterend in een kostprijs, bepalend of het duurzame alternatief levensvatbaar is. Het opzetten van LCA's waar alle facetten van de fossiele en biogebaseerde ketens worden meegenomen, zijn belangrijk om de duurzaamheid juist te analyseren.

Andere uitdagingen ontstaan als er geen drop-in alternatief beschikbaar is of het drop-in alternatief ongewenst is (bijvoorbeeld bio-based bis-fenol-A). Veranderingen in functionaliteit hebben veelal invloed op bestaande productieprocessen of eigenschappen van het eindproduct. In deze gevallen is echte innovatie vereist om de biomassa grondstoffen en / of het proces zo aan te passen zodat er een geschikt alternatief ontstaat. Ook hier is het opzetten en uitvoeren van LCA's waar alle facetten van de fossiele en biogebaseerde ketens worden meegenomen belangrijk om de duurzaamheid juist te analyseren.

Om de ambitieuze reductie doelstellingen te halen zullen alle marktsectoren moeten vergroenen. Hierbij zijn oplossingen gerelateerd aan de kunststofsector zeer relevant. Kunststoffen zijn niet eindeloos te recyclen en tijdens het recycling proces zijn er veel verliezen. Daarom zullen biogebaseerde alternatieven moeten worden toegepast om aan de totale vraag aan plastics te voldoen. Om aan deze vraag te voldoen moeten volledig nieuwe polymeerstructuren (b.v. op suikers en limoneen gebaseerde technische polymeren - polyurethanen, polycarbonaten, polyamiden) worden ontwikkeld, of moeten drop-in substituten worden ontwikkeld die afgeleid zijn van hernieuwbare bronnen (b.v. biofenolharsen).

Polyhydroxyalkanoaten (PHA's) zijn interessant als biologisch afbreekbaar alternatief voor een aantal basispolymeren, zoals HDPE, PP en andere. Het feit dat PHA's kunnen worden verkregen via puur biotechnologische routes uitgaande van een verscheidenheid aan koolstofrijke biomassa grondstoffen maakt ze bijzonder aantrekkelijk. Hetzelfde geldt voor (nano)cellulose

plastics welke uit verschillende cellulose houdende grondstoffen kunnen worden vervaardigd.

Voor Nederland, gelet op onze kennis, is ook de ontwikkeling van geavanceerde technische toepassingen van belang. Het gaat hierbij om technische materialen met verhoogde thermomechanische eigenschappen die geschikt zijn voor de automobiel- en bouwsector, zoals biopolyesters (PEF), biopolyamiden, matrices en vulstoffen voor versterkte biocomposieten, evenals biosmeermiddelen.

Er is een veelvoud aan verschillende type biomassagrondstoffen beschikbaar, zoals biomassa productie via houtachtige en andere non-food gewassen, huishoud afval, landbouwresiduen of afval van voedsel- en diervoederstromen. Al deze grondstoffen verschillen in chemische samenstelling en complexiteit. In basis kunnen we verschillende componenten definiëren: tabel 3.2.3

Binnen Nederland is op bovenbeschreven gebieden veel kennis aanwezig. Rondom bio-gebaseerde technologieën kent Nederland verschillende “bio” clusters, te weten: Chemport

Europe, Carbohydrate Competence Centre, Biotech Campus Delft, Brightlands Chemelot Campus, Centre of Expertise Biobased Economy en Circular Biobased Delta. Daarnaast is er veel kennis aanwezig bij verschillende universiteiten (zoals b.v. Hanze hogeschool, TU Delft, Twente Universiteit, Universiteit Groningen, Universiteit Utrecht incl. het Copernicus instituut, Wageningen Universiteit) en bij kennisinstellingen zoals TNO en WUR. Daarnaast zijn er verschillende hoog-innovatieve Nederlandse bedrijven actief. We zien vooral activiteiten op het gebied van lignine, oliën en vetten, suikers en biogeen afval.

Lignine

De natuurlijke overvloed en wereldwijde beschikbaarheid van lignine zijn een belangrijke redenen om lignine in te zetten als biograndstof (en niet alleen als energiebron). Lignine heeft een chemische veelzijdigheid en uniekheid als bron van aromatische bouwstenen. Aromaten zijn over het algemeen alleen verkrijgbaar uit fossiele olie en hun essentiële rol in tal van industriële sectoren, waaronder brandstoffen, oplosmiddelen, smeermiddelen en plastic materialen, maakt ze zeer aantrekkelijk als ze zijn afgeleid van hernieuwbare bronnen.

Tabel 5

Voornaamste bio-componenten	Voorbeelden van materialen / applicaties	Gangbare industrieën
Plant aardige vezels (cellulose en hemicellulose)	Kunststoffen (alternatief voor verpakkingsmaterialen), vulstoffen, stabilisatoren, filtermedia, alternatief voor glas, koolstofvezels versterkte plastics	automobiel industrie, biomedische sector, verpakkingsindustrie
Lignine	koolstof nanovezels, bio-BTX aromaten, bio-olie, fenol en fenolharsen, alkylfenolen	bulk chemicaliën, farmaceutische industrie, kunststoffen
Oliën en vetten	biologisch afbreekbare kunststoffen, FAME, HVO, bio-propaan, smeermiddelen, componenten voor verven en coatings	Olie en gas sector, Automobiel industrie, technische kunststoffen
Suikers	biologisch afbreekbare kunststoffen, ethanol (ethyleen), melkzuur (PLA), Barnsteenzuur, FDCA, 3-HPA (acroleïne, acrylzuur, 1,3-propaandiol), paraxyleen, adipinezuur, hexaandiamine	Olie en gas industrie, energie sector, chemische industrie, plastic (verpakking) sector
Natuurlijk rubber	Vervanging van synthetisch rubber	automobiel industrie, biomedische sector
Terpenen	polyurethanen, polyamiden, polycarbonaat	Kunststoffen, de bouw sector
Biogeen afval (deels in huishoud afval), sloophout, mest, RDF, SRF, etc.	Via syngas chemie (eventueel icm met coproductie) naar methanol, hogere alcoholen, biobrandstoffen, waterstof, ammonia, aromaten	Olie en gas industrie, energie sector, chemische industrie

Oliën en vetten

De inzet van zowel plantaardige als dierlijke oliën en vetten is op dit moment al goed geïntegreerd met de petrochemie, als grondstof voor was- en schoonmaakmiddelen, smeermiddelen, verven en coatings. Daarnaast worden plantaardige oliën nog veel gebruikt voor, met name, de productie van biobrandstoffen (FAME, HEFA). Echter, naar aanleiding van de “food versus fuel” (voedsel versus brandstof) discussie is de inzet van deze grondstoffen door de EU aan banden gelegd. Afgewerkte oliën daarentegen zijn hiervan vrijgesteld en worden meer en meer ingezet voor de productie van hernieuwbare vliegtuigbrandstof. De beschikbaarheid van afgewerkte olie is en zal altijd beperkt blijven. Inzet van plantaardige oliën voor hoogwaardige producten en materialen heeft daarom in een toekomstscenario de voorkeur.

Suikers

Het is voorzien dat suiker een nog veel belangrijkere rol gaat spelen als biograndstof. “Suiker” is een verzamelnaam van verschillende stoffen zoals sacharose, glucose en fructose. Suikergewassen (zoals suikerbiet, suikerriet, suikerpalm) zijn een bron van sacharose. Mais, tarwe en aardappelen zijn een bron van zetmeel wat omgezet kan worden in glucose en fructose. Tenslotte kan suiker worden geproduceerd uit (hemi)cellulose, de zogenaamde tweede generatie suikers. Voorbehandeling van biomassa is hierbij essentieel en onderwerp van R&D. Voorbehandelingstechnologieën zijn onder meer verdunde en geconcentreerde zure hydrolyse, organosolv, alkalische systemen en depolymerisatie met ionische vloeistoffen. Ook hydrothermale behandelingen of stoomexplosie moeten verder worden onderzocht om efficiënt suikers te ontsluiten.

Enkele veelbelovende bouwstenen voor chemische industrie zijn:
Ethanol als grondstof voor ethyleen (en de basis voor polyethyleen, de meest gebruikte kunststof ter wereld);
Melkzuur als grondstof voor PLA;
Barnsteenzuur, als monomeer van polybutyleensuccinaat (een thermoplastische polymeerhars);
2,5-FDCA voor de productie van PET, een biogebaseerde vervanger van PET.

Fermentatie is een van de sleuteltechnologieën om vanuit suikers tot bovenstaande bouwstenen te komen. Fermentatie naar ethanol, butanol, isobutanol, barnsteenzuur, melkzuur, propaandiol en itaconzuur zijn reeds commercieel beschikbaar. Echter, in dit veld vinden nog veel ontwikkelingen plaats. Zo bevinden de fermentatie van suikers tot 3-hydroxypropionaldehyde (als bouwsteen voor acroleïne, acrylzuur, 1,3-propaandiol), isopropanol, methacrylzuur, isopreen en syngas fermentatie zich in een R&D fase. In het algemeen biedt fermentatie veel kansen, ook in combinatie met genetisch aangepaste micro-organismen om tot hogere zuiverheden en efficiëntie te komen.

Suikers kunnen ook chemisch worden omgezet in producten als sorbitol, xylitol, furfural, glycol, 1,2-propaandiol, isosorbide. Deze zijn al commercieel verkrijgbaar. Ook is er het BioForming proces van Virent voor de productie van paraxyleen en de productie van adipinezuur en hexaandiamine door Rennovia. Een ander voorbeeld is 2,5-FDCA voor de productie van PEF door Avantium.

In het algemeen kan gesteld worden dat de suikerchemie heel veel potentie biedt als oplossing voor de chemische industrie. Er zullen zowel aan de biomassa voorbehandeling (ontsluiting van suikers) als de omzetting van suikers nog veel innovaties moeten plaatsvinden om het maximale potentieel te benutten.

Biogeen afval

In aanvulling op bovenstaande zullen thermochemische processen, zoals pyrolyse of directe en indirecte vergassing, essentieel zijn om op grote schaal de chemische sector te verduurzamen. Zo is BTG commercieel succesvol in de omzetting van biomassa naar pyrolyse olie. Onderzoek rondom het opwerken van dit type oliën naar nog hoogwaardiger producten is in volle gang. Rondom vergassing bevinden zich verschillende concepten zich in de R&D fase, elk gericht op de omzetting van specifieke bio (houdende) grondstoffen en / of eindproducten. Het voordeel is dat een vergasser typisch een breed scala aan grondstoffen aan kan. Denk hierbij niet alleen aan “schoon hout” maar ook aan fracties het huishoudafval, sloophout, RDF en SRF. Enkele technologieën richten zich op de omzetting van natte biomassa zoals mest. Directe vergassing is typisch gericht op de productie van synthesesgas, oftewel syngas (een mengsel van CO en H₂). Vanuit syngas kan vervolgens, met behulp van verschillende katalytische stappen, een scala aan producten worden geproduceerd. Denk hierbij aan synthetisch aardgas (methaan), methanol, hogere alcoholen, waterstof, ammonia en via het Fischer-Tropsch proces verschillende brandstoffen zoals diesel en kerosine. Hiermee wordt een directe link gemaakt naar CCU en wordt aangegeven dat systemisch denken en handelen zeer belangrijk is. Dit moet mogelijk gemaakt worden door flexibele wettelijke kaders die op regionaal niveau uitgevoerd worden.

Bij een indirecte vergasser wordt niet alleen syngas geproduceerd maar worden b.v. ook methaan en aromaten gevormd. Op basis van koolstof (ofwel “het moleculair kapitaal”) hebben deze processen een zeer hoge efficiëntie. Het biedt ook mogelijkheden om co-productie schema's op te zetten die economisch aantrekkelijk zijn. Tijdens vergassing wordt typisch ook CO₂ gevormd en dit leent zich uitstekend voor CO₂ afvangst om zo klimaat positief (dus met negatieve CO₂-emissies) te produceren. Ook hierbij wordt een directe link gelegd met CCU voor de productie van building blocks voor materialen.

3.2.4 Keten-innovaties

Innovatieopgave: Mobiliseren van voldoende, duurzame beschikbaarheid van biobased grondstoffen.

Ambitie:

- *In 2030 is voldoende duurzame biobased grondstof beschikbaar in combinatie met efficiënte conversie processen voor het realiseren van de benodigde producten voor de chemie.*
- *De ontwerpparameters voor uitbouw van duurzame beschikbaarheid zijn bekend voor de periode na 2030.*
- Sterk verbeterde eco-footprint van producten en processen.

Naast het ontwikkelen, demonstreren en opschalen van biobased producten is het mobiliseren van duurzame biobased grondstoffen de grote opgave. Wat daarbij ook van belang is dat veel biogebaseerde grondstoffen beschikbaar komen als residu/afval stroom, nadat de voeding of pharma-ingrediënten zijn afgescheiden.

Daarnaast is het, vanwege logistieke logica, belangrijk om kleinschalige (lokale en decentrale) verwerkingsconcepten voor biobased grondstoffen te ontwikkelen. Op deze schaal is het goedkoper om reststromen te mobiliseren voor verdere verwerking tot een tussen- of eindproduct. Verder is het sluiten van kringlopen (mineralen, water etc.) eenvoudig te realiseren, zijn de benodigde initiële investeringen lager, de risico's kleiner, het draagvlak bij betrokken stakeholders groter en derhalve een succesvolle marktimplementatie kansrijk.

In analogie met bovenstaande is ontwikkeling van nieuwe circulaire businessmodellen voor biobased producten en ontwikkeling van methodieken om de footprint van producten en processen te bepalen. Huidige LCA-analyses honoreren de CO₂ die is opgeslagen in biobased producten niet eenduidig.

Wat tot slot van groot belang is voor de duurzaamheid van biograndstoffen is duurzaam en efficiënt landgebruik voor de productie van de biograndstoffen. Om die reden heeft de ontwikkeling van een duurzame biograndstofketen een cross-disciplinaire aanpak nodig. De vraag naar feedstock vanuit de industrie en het aanbod vanuit de land- en bosbouw vinden elkaar onvoldoende.

Binnen Nederland zijn er regionaal verschillende "bio-clusters" actief waarbij Universiteiten, Hogescholen, NGO's, kennisinstellingen en bedrijfsleven zich hebben georganiseerd. Kenmerkend is dat de clusters de transitie naar een duurzame economie willen versnellen. Hierbij is de samenwerking over de gehele keten essentieel. Zo ontstaat er slagkracht die typisch niet door één bedrijf of entiteit kan worden gedragen. Zo is er in Nederland bijvoorbeeld "Chempport Europe" met focus op

circulaire polymeren, biomassa, waterstof en koolstofdioxide. Het cluster bevindt zich in noord Nederland (Delfzijl, Emmen, Groningen).

Een ander voorbeeld is de Stichting Circular Biobased Delta (CBBDD). Er is een focus op groene chemie en circulariteit en faciliteert de samenwerking tussen het bedrijfsleven, provincies, waterschappen, gemeenten en kennis- en onderwijsinstellingen van Noord-Brabant en Zeeland. Er zijn ook internationale banden met Vlaanderen en Noordrijn-Westfalen. In dezelfde regio is ook het "Centre of Expertise Biobased Economy (CoE BBE)" actief. Het CoE BBE is een samenwerkingsverband tussen Avans Hogeschool en HZ University of Applied Sciences. Hier ligt de focus met name op de koppeling van bedrijfsleven en de studenten om samen te innoveren, experimenteren en investeren.

In Delft ligt het "Biotech Campus". Dit is een open innovatiecampus die onderdak biedt aan startups, tech- en serviceproviders, en (MKB-)bedrijven op het gebied van industriële biotechnologie. Op de campus wordt samenwerking en kennisoverdracht tussen bedrijven en kennisinstellingen actief gestimuleerd. Een ander voorbeeld is het Brightlands Chemelot Campus in Limburg waar meer dan 100 bedrijven en 1000 studenten zijn samengebracht om hoogwaardige materialen, duurzame processen en biomedische oplossingen te creëren voor een duurzamere wereld.

Binnen al deze initiatieven worden verschillende technologieën ontwikkeld en worden complete waardeketens samengebracht. De grootste gemene deler is het gebruik van bio-grondstoffen, hierbij aangetekend dat bio-grondstoffen heel divers zijn. Daarnaast is de beschikbaarheid van lokale, Nederlandse, bio-grondstoffen beperkt. Het ligt daarom voor de hand dat (extra) bio-grondstoffen zullen moeten worden geïmporteerd.

3.2.5 Randvoorwaarden

Innovatieopgave: Onderzoek of en hoe inzet van biobased grondstoffen een versterkende betekenis heeft voor people, planet en profit en bijdraagt aan de realisatie van maatschappelijke behoeftes.

Ambitie: De inzet van biobased grondstoffen voor de verschillende economische functies is gebaseerd op de grootte van ecologische effecten en de eisen die de samenleving heeft geformuleerd voor deze inzet. De samenleving heeft vertrouwen dat een circulaire economie kan worden vervuld met de bijdrage van biobased grondstoffen.

Van groot belang bij het welslagen van de introductie van biogebaseerde producten is de acceptatie van deze producten door de consument. In de transitie van fossiele producten naar biogebaseerde producten is het bijvoorbeeld erg belangrijk om de verborgen (niet betaalde) kosten van fossiele producten

zichtbaar te maken om de duurzaamheid van biogebaseerde producten duidelijk te kunnen maken. Het is om die reden van groot belang om volledige en eenduidige productinformatie te hanteren om acceptatie en gedrag van consumenten te beïnvloeden. Dit moet door brancheverenigingen worden ingezet en door de overheid op worden toegezien en worden ondersteund.

Om introductie van biogebaseerde producten in een continue setting mogelijk te maken is het ontwikkelen van duurzame waardeketens, gebaseerd op duurzame en circulaire business modellen zeer belangrijk. Financiering en de productiekosten zijn daarvoor cruciaal. De opschaling en marktintroductie brengt hoge investeringen en risico's met zich mee. Dit zal moeten worden ondervangen, bijvoorbeeld met behulp van subsidie instrumenten of een overheid die risicodragend aan projecten deelneemt. Het is duidelijk dat de financieringsbehoefte van de transitie groot is en voor een langere periode nodig is. Banken, pensioenfondsen, verzekeraars, vermogensbeheerders, etc. zullen duurzamer moeten gaan investeren. Het zou hierbij goed zijn als de klimaatimpact wordt meegewogen in de overwegingen.

Daarnaast zullen in veel gevallen de productiekosten van biogebaseerde producten duurder zijn dan het fossiele alternatief. Dit komt deels doordat de maatschappelijke kosten als gevolg van de klimaatverandering niet in de huidige prijzen zijn meegenomen. Daarnaast kost het tijd voordat nieuwe routes compleet geoptimaliseerd, dan wel verder opgeschaald zijn. Ook bij deze vormen van markt-falen moet de overheid instappen met subsidies of andere instrumenten (zoals CO₂ beprijzen).

Nederlandse agri-food en chemiebedrijven en buitenlandse chemiebedrijven gevestigd in Nederland zijn, onder invloed van een ecosysteem waarin samen met kennispartijen en kennis- en ketenorganisatie kan worden samengewerkt, zeer actief op het ontwikkelen en in de markt zetten van biograndstoffen en producten. Nederland is goed aangesloten op internationale ontwikkelingen en is om die reden, in vergelijking met andere landen, goed ontwikkeld. Er is momenteel sprake van versnippering van kennis die efficiency van ontwikkeling en toepassing nadelig beïnvloed. Bijvoorbeeld het platform Groene Chemie Nieuwe Economie (GCNE) en het Nationaal Groeifonds initiatief BioBased Chemicals moet hier verandering in brengen.

In de keuze welke innovaties relevant zijn voor biograndstoffen is het belangrijk om de innovatie in het perspectief van de hele keten te kunnen plaatsen, zodat de innovatie evenwichtig kan worden uitgevoerd. Dit is een complexe beoordeling waar experts van diverse disciplines moeten worden betrokken. In deze zelfde context is ook benodigde energiebehoefte belangrijk om mee te nemen (energie beschikbaarheid).

Om beleidskeuzes voor de ondersteuning van duurzame waardeketens bij overheidsinstanties en -organisaties inzichtelijk te maken is het nodig dat impactmodellen worden ontwikkeld waarbij gedrag en acceptatie voor duurzame producten worden meegenomen.

Verder ontstaat door de transitie ook een verschuiving op de arbeidsmarkt. Het aandeel in de bestaande (fossiele) sector zal afnemen terwijl nieuwe kansen en groei zal ontstaan rondom de nieuwe technologieën. Hier zal in het onderwijs op moeten worden ingespeeld en is het belangrijk om *learning communities* op te zetten. Daarnaast zullen verschillende sectoren (zoals landbouw, voeding en de chemiesector) beter moeten samenwerken om tot goede waardeketens te komen.

3.3 CCU

Dit deelprogramma bestaat uit de volgende subthema's:

- a Afvangen, ontsluiten en opwerken van koolstofbronnen (incl. gasreiniging en -scheiding)
- b Mineralisatie van CO₂
- c Conversie van CO₂ en CO naar platformchemicaliën
- d Product-innovatie
- e Keten innovatie
- f Randvoorwaarden

Omdat CCU een paraplu concept is waarbij de CO₂ van diverse bronnen kan komen en waarbij producten voor diverse doeleinden gebruikt kunnen worden (neem bijvoorbeeld methanol wat als product maar ook als tussenproduct kan worden gebruikt) is het belangrijk om in de keuze voor een technologie het juiste perspectief te beschrijven. Alleen dan is het mogelijk om een juiste beoordeling van de technologie te maken.

3.3.1 Afvangen, ontsluiten en opwerken van koolstofbronnen

Innovatieopgave: Het afscheiden en zuiveren van CO₂ en CO uit de bron voor verdere conversie naar producten.

Ambitie: Het op een zo efficiënte mogelijke wijze verkrijgen van zuivere CO₂ en CO van puntbronnen en de lucht en water op industriële schaal.

Om te kunnen komen tot effectieve CCU-waardeketens is het ten eerste belangrijk dat de duurzame (waar mogelijk biogene) CO₂ en/of CO wordt ontsloten en gezuiverd. Deze stap kan ook integraal met een later conversie plaatsvinden, zogenaamde geïntegreerde afvang en conversie; ook reactieve afvang valt hieronder. Deze worden onder "Conversie van CO₂ en CO naar platformchemicaliën" beschreven.

De beschikbaarheid van CO₂ en CO bestaat uit 1) onvermijdbare

emissies zoals industriële emissies uit de cement- en staalindustrie, 2) afvalgasen uit afvalverbranding en vergassing, 3) emissies uit voedselproductie, biorefineries en biogas installaties en uiteindelijk 4) CO₂ uit lucht en water. Voor de onvermijdbare emissies geldt dat deze ingezet kunnen worden als deze in het totaal van emissies technisch en qua kosten gunstiger zijn dan de andere emissies.

De CO₂ of CO uit alle onder 1-4 genoemde bronnen bevat bijna altijd de verkeerde verhouding (energie/koolstof), is in een te lage concentratie voor effectieve zuivering en/of conversie en/of bevat veel onzuiverheden. Om daadwerkelijk ingezet te kunnen worden als grondstof moet er dus een zuiveringslag plaatsvinden. De belangrijkste technieken hiervoor zijn in volgorde van maturiteit:

- Onvermijdbare industriële emissies
- Pre-combustion CO₂-afvang
- Post-combustion CO₂-afvang
- Restgasen van biologische oorsprong
- Biogas capture
- CO₂ uit lucht en water

De technologische uitdagingen en technieken voor het afvangen van CO₂ zijn voor de eerste vijf van deze technieken veelal hetzelfde.

Onvermijdbare industriële emissies

Het productieproces van staal is, met ~7% van de CO₂ emissies, de grootste CO₂-emissiebron. Innovaties kunnen een sterke CO₂ reductie opleveren. Echter geen van de voorgestelde processen zal volledig CO₂ neutraal kunnen worden. Het restgas uit een staalfabriek bevat nog veel energie en is daarom, na zuivering en reiniging bijzonder geschikt om omgezet te worden in een chemisch product. Dit geldt voor zowel de hoogovenroute als de DRI route met aardgas en waterstof. Naast staalproductie kunnen ook andere industriële puntbronnen gebruikt worden als CO₂ bron.

Er zijn in Nederland diverse grote industrie locaties waar onvermijdbare industriële emissies worden gevormd. Bij TataSteel is in 2020 gestart met project wat het afvangen van CO₂ voor de productie van materialen. Dit betreft een tweede fase in dit project, welke in 2027 wordt ingezet. Hierbij moet 4 Mton CO₂ per jaar worden gereduceerd. Dit is een wezenlijke bijdrage aan de totale verlaging van 19,4 Mton CO₂ in 2030. Deze activiteit is een eerste grote stap van Tata om met de bestaande faciliteiten de CO₂ voetdruk te beperken, naast de plannen om over te stappen op H₂ als energiedrager, welke pas later en met nieuwe faciliteiten zal worden gerealiseerd.

Pre-combustion CO₂-afvang

Pre-combustion scheidingstechnieken richten zich op het efficiënt scheiden van energie-inhoud en koolstofinhoud. In

extrema wordt zuiver CO₂ en H₂ geproduceerd. Dit kan uit verschillende energiehoudende industriële stromen, inclusief afvalstromen, reststromen en tussenproducten:

- synthesesgas
- producten van vergassing
- verschillende staalgasen

Commercieel verkrijgbaar zijn absorptieprocessen, maar geavanceerde hogetemperatuur processen zijn in ontwikkeling. Op hoge temperatuur is de scheiding efficiënter en kan deze bovendien met katalytische conversie worden gecombineerd. Belangrijke ontwikkelingen zijn:

- Verhogen van de maturiteit (TRL 5/6/7 naar TRL9)
- Valideren levensduur materialen
- Opzetten van value chains (materiaalleveranciers, technologieleveranciers, EPC, eindgebruikers)
- Kostenreductie door opschaling en optimalisatie efficiëntie
- Omgaan met voor het proces specifieke contaminanten
- Geïntegreerde afvang en conversie van CO, CO₂.

Rond de laatste twee van deze ontwikkelingen, liggen nog belangrijke uitdagingen.

In Nederland zijn o.a. TNO en TU/e actief op de ontwikkeling van “chemical looping” technologie, wat zowel voor pre- als post-combustion CO₂ afvang kan worden gebruikt. Daarnaast is Air Liquide actief met de ontwikkeling van “pressure-swing adsorption” technologie. Ook Shell Global Solutions ontwikkeld pre-combustion afvang van CO₂. Carbon Clean Solutions ontwikkeld en levert pre-combustion CO₂ capture technologie aan energiecentrales en industrie. Dit zijn slechts een aantal voorbeelden van bedrijven en onderzoeksgroepen actief op dit gebied.

Post-combustion CO₂-afvang

Op dit moment wordt in de waste-to-energy sector in Nederland post-combustion afvang met behulp van amines toegepast. Implementatie in andere sectoren wordt overwogen.

Onderzoek moet zich richten op:

Kosteneffectieve beheersing van emissies van amine en vluchtige afbraakproducten;

Verlaging van oplosmiddelverliezen door degradatie te beheersen;

Proces elektrificatie;

Intercompany geïntegreerde CO₂-afvangfaciliteiten voor het verlagen van de kosten van afvang op kleine schaal.

Als één van de eersten in de wereld heeft Twence in 2014 een proefinstallatie voor afvang van CO₂ uit rookgasen opgestart. Nu in 2022 wordt een commerciële installatie gebouwd die vloeibaar CO₂ aan de glastuinbouw gaat leveren. De installatie is gebaseerd op een CO₂ afvang principe van Aker Carbon Capture. Met deze installatie wordt 100.000 Mt CO₂/jaar gereduceerd. Het toepassen van deze techniek bij de andere AVI's in Nederland,

uitgaande van een aantal van 15 in Nederland in 2022, levert mogelijk het 10-voudige aan reductie op.

Restgassen van biologische oorsprong

Door het overschot aan zuurstof in biologische grondstoffen komt er bij de verwaarding hiervan CO₂ vrij. Bij afvalverbranding, en bierproductie is dit in de afvalgassen, bij biogas is dit als mengsel met methaan, en bij de productie van ethanol als zuiver gas. In sommige gevallen kan deze stroom direct geconverteerd worden in een chemische verbinding, soms is slechts de verwijdering van zwavelhoudende verbindingen nodig. Het overschot aan CO₂ kan ook worden opgeslagen (BECCS of BiCRS).

Biogas capture

Het afvangen van CO₂ uit biogas (upgraden) kan worden bereikt door verschillende technologieën, zoals m.b.v. membranen, via cryogene scheiding of d.m.v. absorptie op basis van amine. Onderzoek moet zich richten op:

Verlaging van proceskosten door ontwikkeling van materialen (bijv. membranen, oplosmiddelen).

Verbeteren van de business case door verbetering van procesintegratie met voorbehandeling van het biogas en nabehandeling van zowel CO₂ als methaan (bijv. H₂S, N₂ en O₂ verwijdering).

CO₂ uit lucht en water

Water en lucht bevatten CO₂ in sterk verdunde vorm en zijn een duurzame koolstofbron als het kan worden toegepast. CO₂ in de lucht is actief als broeigas CO₂ in het water als zuur, en deze zijn in dynamisch evenwicht. Het afvangen van CO₂ uit lucht wordt gedaan met oplosmiddelen waarin CO₂ zeer specifiek en efficiënt oplost; Direct Air Capture (DAC). De verkregen CO₂ kan gebruikt worden als grondstof (CCU) voor het of kan direct worden opgeslagen (DACCS), waarbij sprake is van negatieve emissie. Voor het energie-efficiënt afvangen van CO₂ uit lucht en water is onderzoek nodig naar:

- Materiaal (solvent/sorbent) ontwikkeling;
- Doorbraak technologie zoals MCDI;
- energie-efficiëntie, including both lower energy demand, and electrification of the solvent/sorbent regeneration step;
- procesontwikkeling en opschaling, with focus of key costly components such as the solvent/air contactor;
- Systeemanalyse ten aanzien van afvanglocatie, lokale beschikbaarheid hernieuwbare energie, koppeling met transport en opslag, integratie met CO₂ gebruik.

De ontwikkeling van DAC staat nog in de kinderschoenen en wordt nationaal en internationaal (bron IEA: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>) verder ontwikkeld waarbij nu de ontwikkeling nog op TRL<6 bevindt. Momenteel wordt er wereldwijd 0,01 Mt/jaar CO₂ geproduceerd met DAC met de verwachting dat dit zal stijgen tot 60 Mt/jaar in 2030.

Onder andere TNO, TU/e en TU Delft werken aan de ontwikkeling van DAC, evenals de bedrijven Carbyon, Carbon Clean Solutions, Climeworks, en Shell Global Solutions. Op het gebied van water capture wordt aan de TUD op laag TRL onderzoek gedaan door de groep van David Vernass.

3.3.2 Mineralisatie van CO₂

Innovatieopgave: Het grootschalig commercieel toepasbaar maken van CO₂ in bouwmaterialen.

Ambitie: Beschikbaarheid van substantieel deel van de nieuwe bouwmaterialen gemaakt uit CO₂.

CO₂ kan ook opgeslagen worden in producten middels mineralisatie. Hiervoor zijn verschillende routes mogelijk:

- Mineralisatie van residuen
- Mineralisatie van ertsen
- Mineralisatie naar carbonaten

Er is op het gebied van mineralisatie nog veel onbekend met betrekking tot de technologische uitdagingen (vaste stof handling, kinetiek, toepassingen gevormde producten) en bevinden zich nog op een laag TRL (2-5). Deze ontwikkeling krijgt wereldwijd veel aandacht omdat deze oplossingen leiden tot negatieve emissies omdat CO₂ voor lange(re) tijd wordt vastgelegd.

In Nederland wordt hiernaar met name onderzoek gedaan door TNO, TU/e, TU Delft en Universiteit Twente waarbij o.a. wordt gekeken naar carbonaat precipitatie en mineralisatie door microorganismen en bij bedrijven als HVC en SCW systems in Alkmaar. Ook wordt in de Brick Valley door een aantal grote baksteenproducenten gewerkt aan het vastleggen van CO₂ in baksteen, waarbij het, afhankelijk van de herkomst van de CO₂, mogelijk is om CO₂-negatieve bakstenen te maken. Verder zijn twee van de drie wereldwijd actieve bedrijven op dit gebied aanwezig in Nederland.

Mineralisatie van residuen

Dit kan met een reeks van (alkalische) mineralen plaatsvinden, enerzijds met residu materialen, zoals staalslakken, vliegassen, red mud, anderzijds met het gebruik van ertsen. De residu materialen hebben in het algemeen een beperkte CO₂ vastlegging (zowel vanwege de beperkte beschikbaarheid als de capaciteit per ton materiaal). De voordelen zijn wel dat deze materialen in het algemeen reactiever zijn als ertsen, al geproduceerd worden op locaties met CO₂ emissies, en dat de omzettingstap ervoor zorgt dat de product eigenschappen verbeteren. Het bedrijf Carbon8 heeft in Engeland een aantal operationele installaties waar de vliegassen van een afvalstof omgevormd worden tot een verkoopbaar aggregaat. Dus i.p.v. een afvalstof wordt het product een (bescheiden) te vermarkten materiaal.

Mineralisatie van ertsen

Ertsen zijn minder reactief vergeleken met de bovengeschetste residue materialen. Maar zijn wel beschikbaar in nagenoeg ongelimiteerde hoeveelheden. De CO₂ opname is ook hoger en de gevormde producten hebben een hogere waarde. De businesscases kunnen verbeterd worden door:

- Een CO₂ prijs (CO₂ wordt definitief vastgelegd, dus ETS ligt voor de hand).
- Juridische oplossingen zodat omvorming van afvalstof naar een grondstof mogelijk wordt.
- Meer fundamenteel begrip van de reactiekinetiek.
- Innovatie bij de toepassingen (constructie, papier).

Een probleem is wel dat de technologieontwikkelaars niet afkomstig zijn uit de sector zelf en zodoende slecht aansluiting kunnen vinden in de keten. Daarnaast is het lastig voor de kleine bedrijven met technologie om aansluiting te vinden bij het grote bedrijfsleven.

Mineralisatie naar Carbonaten

Mineralisatie is het proces van (alkalische) mineralen die reageren met het CO₂ (koolzuur) tot carbonaten, hierbij wordt de CO₂ permanent gebonden. Dit proces kent als beperkingen de relatief trage reactie, het feit dat de gevormde eindproducten in het algemeen in andere sectoren gebruikt worden en het trage innovatie tempo van de bouwindustrie. Maar vooral de onbekendheid. Anderzijds legt het proces wel definitief CO₂ vast en past zodoende bij zowel CCU-innovatie als klimaatbeleid, vanwege de bijdrage aan negatieve emissies. En vanuit een business case zijn er revenuen te verwachten van zowel de CO₂ vastlegging als de verkoop van de gevormde eindproducten. Om die reden wordt onder andere door baksteen fabrikant Vandersanden, opererend in de Brick Valley, een project gestart voor de ontwikkeling van CO₂-negatieve stenen, waarbij CO₂ wordt vastgelegd in de baksteen.

3.3.3 Conversie van CO₂ en CO naar platformchemicaliën

Innovatieopgave: Het op schaal verkrijgen van hoogwaardige platformchemicaliën op basis van CO₂ en CO tegen acceptabele kosten.

Ambitie:

- *Significante verbetering in CO₂- en CO- conversie technologieën m.b.t. ketenrendement, energie- en conversie-efficiency op industriële schaal.*
- *Beschikbaarheid van flexibele processen waarbij omgegaan kan worden met variabele beschikbaarheid van energie (elektriciteit, H₂) in transitie naar alleen duurzame bronnen.*
- *Beschikbaarheid van katalysatoren en/of reactoren die om kunnen gaan met onzuiverheden.*

Om CO₂ om te zetten in chemische bouwstenen en producten

is in volgorde van maturiteit een vijftal technologieroutes in ontwikkeling:

- Biokatalytische conversie
- Thermo-katalytische conversie
- Elektrochemische conversie
- Plasma-gebaseerde conversie
- Foto-katalytische conversie

De impact op CO₂-reductie in 2030 van bovenstaande routes voor de productie van chemische bouwstenen zal zeer beperkt zijn, omdat er dan nog niet voldoende duurzame elektriciteit en waterstof in Nederland beschikbaar zal zijn. Ook zullen een belangrijk deel van de hierboven beschreven technieken nog niet commercieel beschikbaar zijn. Echter, omdat de inzet van CO₂ als grondstof richting 2050 een belangrijke bijdrage zal moeten leveren aan verduurzaming van industrie en mobiliteit, is het van belang om in te zetten op het versneld ontwikkelen van de meeste kansrijke routes naar hogere TRL-niveaus om de CO₂-reductie- en circulariteitsdoelen te behalen.

Biokatalytische conversie

Hierbij wordt direct licht (zonlicht, eventueel LED) gebruikt om middels (biologische) fotosynthese conversie van CO₂ te bewerkstelligen te doen. Er zijn twee verschillende varianten:

- Vastlegging van CO₂ door algen en wieren. Na oogst kunnen via extractie de gewenste producten worden gewonnen. In feite is dit een biogebaseerde grondstof route, deze route wordt daarom in dit deelprogramma daarom niet verder uitgewerkt.
- Genetische modificatie van bacteriën, waarbij de bacteriën als katalysator gebruikt worden. Dit is in analogie met fermentatie. Producten worden rechtstreeks geproduceerd in het reactor medium, waarbij opzuivering specifiek voor het product moet worden opgezet.

Voor de vastlegging van CO₂ via algen is in Nederland AlgaeParc, als onderdeel van WUR, toonaangevend. Hier wordt tot op TRL9 gewerkt aan technologische oplossingen. De productie van algen is ook al jaren op commerciële schaal, voor de productie van algen als voedingssupplementen voor mensen en dieren (veevoer en visvoer). In Nederland zijn er diverse bedrijven actief in dit segment, zoals AlgaeHolland, Ingrepco, Algae Innovations Netherlands BV, Phycom en Lgem/Synalgae. Daarnaast kunnen via bioraffinage van algen specifieke grondstoffen (eiwitten, vetten/vetzuren, koolhydraten), bij gewasbescherming en -bemesting en ook als biobrandstoffen worden geproduceerd.

De biokatalytische omzetting van CO₂ via cyanobacteriën is in Nederland op pilotschaal bewezen voor de productie van melkzuur. Het betreft hier de rechtstreekse productie van melkzuur, onder invloed van licht. De meeste ontwikkelingen bevinden zich wereldwijd op pilot/demo schaal (TRL 6-8). In

Nederland wordt hier door TU Delft, WUR en TU/e en DSM onderzoek aan gedaan.

Thermo-katalytische conversie

Platform chemicaliën zoals olefinen (bijv. ethyleen en propyleen), methanol en DME kunnen uit CO₂ gemaakt worden door CO₂ te reduceren, waarbij de zuurstof gebonden wordt aan waterstof. Enkelvoudige reductie geeft CO, wat vervolgens met meer H₂ kan worden omgezet in synthetische brandstoffen en platform chemicaliën. Tussen de verschillende reactie stappen wordt het overtollige water afgescheiden. Bijvoorbeeld via Fisher-Tropsch synthese van CO₂ kan een grote diversiteit aan koolwaterstoffen worden gemaakt met thermo-katalytische conversie. Algemeen geldt dat de keuze van de katalysator, het reactor ontwerp en de procesuitvoering bepaald wat voor producten kunnen worden en met welke efficiëntie.

Directe omzetting van CO₂ is ook mogelijk door proces intensivering. In dat geval worden de opeenvolgende reacties in één reactorreactie uitgevoerd, die weliswaar efficiënter is maar meer water (H₂O) produceert. In een dergelijk een-staps proces is daarom geïntegreerde scheiding cruciaal. Voor alle routes geldt dat de prijs en beschikbaarheid van waterstof bepalend is voor de business case, terwijl de footprint van CO₂ en H₂ moet meegenomen worden in het bepalen van de overall ecologische footprint van het beoogde eindproduct.

Wereldwijd wordt aan diverse routes gewerkt. Ontwikkelingen bevinden zich gemiddeld genomen op pilot/demo schaal, waarbij flankerend toegepast onderzoek wordt verricht op het gebied van efficiency-verbeteringen en procesintensivering (TRL 5-7). Procesintensivering, in de vorm van een combinatie van reactie en in-situ water afscheiding, speelt een essentiële rol bij het ontwikkelen en opschalen van efficiënte processen voor katalytische conversie. Op dit vlak spelen TU/e, TU Delft, WUR en U Twente een rol. Daarnaast is het ontwikkelen van zeer specifieke en efficiënte katalysatoren van groot belang. In Nederland wordt hier o.a. aan TU Delft, Universiteit Utrecht en bij Catalytic Engineering groep van de Universiteit Groningen aan gewerkt.

De grootste uitdaging op dit deelonderwerp is voldoende beschikbaarheid van goedkope duurzame waterstof. Dit is een randvoorwaarde voor snelle opschaling van de katalytische route. Deze katalytische processen hebben in het algemeen een lage conversiegraad door thermodynamische beperkingen.

Elektrochemische conversie

In dit proces wordt direct elektriciteit wordt gebruikt om CO₂ te reduceren in een electrolyzer. Hoe hoger de benodigde reductiegraad, hoe meer elektriciteit nodig is. In principe zijn de 6- en 8-electron reducties (bijvoorbeeld naar ethyleen, methanol en methaan) minder efficiënt waardoor de kosten

van elektriciteit volledig bepalend zijn voor de business case en is het vaak voordeliger om voor katalytische conversie te gaan. 2-electron reducties (bijvoorbeeld naar mierenzuur, oxaalzuur en koolmonoxide) zijn een stuk efficiënter, zeker bij lage elektriciteitsprijzen, en daarvoor geldt dat de kosten voor de installaties bepalend wordt. Er zijn diverse routes in ontwikkeling, waaronder ook meerstapsprocessen en combinaties met thermokatalyse.

Er zijn diverse routes in ontwikkeling, waaronder ook meerstaps-processen en combinaties met thermokatalyse. Voorbeeld daarvan is reactieve afvang, waarbij de afvang en omzetting praktisch gezien in 1 stap plaats vinden. De meeste ontwikkelingen bevinden zich wereldwijd in de fase van funderend en toegepast onderzoek en eerste de kleine pilots worden in fieldlabs geïmplementeerd (TRL 3-6). In Nederland bevindt dit onderzoek zich nog op lab-schaal (TRL 2-4) en wordt aan o.a. WUR, Universiteit Leiden, Universiteit Utrecht, TU Delft en TU/e onderzoek gedaan.

Doorontwikkeling en opschaling kan op de lange termijn resulteren in productie van energiedragers ende productie van voor monomeren/polymeren in 2050 in Nederland. Hierbij gaat het vooral om energiedragers zoals methanol en formic acid en om monomeren zoals oxaalzuur, glycolzuur en ethyleen glycol uit CO₂. Het ontwikkelen van CCU voor hoogwaardige monomeren is een springplank voor de productie van syngas uit CO₂ en water. De vereiste innovaties voor de directe elektrochemische route moet gericht zijn op kostenverlaging, zodat deze oplossingen kunnen gaan concurreren met andere productieroutes. Belangrijke aspecten hierin zijn het verlagen van de kapitaalskosten (CAPEX), de verhoging van de productie per elektrode-oppervlak door verhoging van de stroomdichtheid tot bijvoorbeeld 800 mA/cm² en verhoging van de productselectiviteit. Voor de elektrochemische routes wordt in een pilot fase gedacht aan relatief kleine hoeveelheden tot 1000 ton per jaar via een scale-out d.m.v. stacking van cellen versus conventionele scale-up.

Plasma-gebaseerde conversie

Hierbij wordt een plasma gebruikt om CO₂ rechtstreeks om te zetten in de gewenste producten. Hierbij kan doorontwikkeld worden op de bestaande ontwikkeling van plasma processen voor de conversie van methaan of restafval. Verschillende reacties zijn mogelijk, waaronder het splitsen van CO₂ in CO en O₂ als ook de reactie met andere gassen, zoals CH₄ (droge reforming van methaan), H₂ (hydrogenering van CO₂) of H₂O (kunstmatige fotosynthese), gericht op de productie van syngas en waardevolle oxygenaten zoals methanol, formaldehyde en mierenzuur. De voordelen van het plasma proces zijn onder meer milde reactie omstandigheden en gasactivering door energetische elektronen in plaats van warmte. Dit maakt thermodynamisch moeilijke reacties mogelijk.

Deze ontwikkeling bevindt zich wereldwijd nog in de prille onderzoeksfase, en vindt met name bij universiteiten plaats (TRL 1-3). In Nederland wordt hiernaar onderzoek gedaan bij DIFFER-TU/e. Een belangrijke uitdaging rond dit deelonderwerp is dat voor de research naar deze processen veelal gebruik wordt gemaakt van kleinschalige microgolf plasma reactoren; ontwikkelingen zijn nodig om deze plasma processen met voldoende efficiëntie en yield op bulkschaal mogelijk te maken. Bovendien zijn integratie stappen zoals scheidingsstappen nodig om het plasma proces te integreren in de bestaande chemische installaties.

Foto-katalytische conversie

Hierbij wordt CO₂ met water of groene waterstof omgezet tot gewenste producten (chemicaliën, brandstoffen) gebruik makend van katalysatoren en/of foto-elektrodes en zonlicht als duurzame energiebron. Essentiële componenten die zonlicht-gedreven conversies mogelijk maken zijn halfgeleider- en (plasmonische) metaalkatalysatoren en foto-elektrodes (materialen), transparante reactoren, zonlicht-concentratoren en bijbehorende optische componenten om (geconcentreerd) licht naar de reactor en katalysator/foto-elektrode te leiden (flux guide). Daarnaast zijn er sensoren nodig voor procesmonitoring (bv. temperatuur en lichtintensiteit), en moet er gewerkt worden aan oplossingen voor continue 24 uren productie. Dit kan bijvoorbeeld bestaan uit het gebruik van energie-efficiënte artificiële lichtbronnen (bv. LEDs) of andere technologieën om bij afwezigheid van zonlicht de reactie uit te voeren. Er zijn reeds efficiënte katalysatoren ontwikkeld en opgeschaald (TRL 5) die het mogelijk maken om met relatief kleine oppervlaktes (ca. 1 voetbalveld) CO₂ puntbronnen te bedienen tot een grootte van 1 Mt p.a.

Een van de beperkingen is de lage intensiteit van zonne-energie, van rond de 300W/m². Zelfs bij 24 uren daglicht komt dit uit op ongeveer 1 liter methanol per dag. Daarnaast is nog niet geheel duidelijk hoe deze technologie op grote schaal in de industrie is in te zetten en is eerder de verwachting dat dit decentraal uitgerold zou moeten worden. Technologisch zijn de grootste uitdagingen:

- vermijden/reduceren van gebruik van dure en schaarse materialen in katalysatoren en foto-elektrodes;
- ontwikkeling en validatie van transparante fotoreactoren;
- ontwikkeling en validatie van technisch, economisch en energetisch efficiënte concepten voor continue 24 uren productie;
- realiseren van eerste buitendemonstratoren (met natuurlijk zonlicht) voor de productie van CO/syngas (TRL 5-6);
- systeemintegratie/interactie met andere duurzame energie- en processtromen.

De hardware ontwikkeling (transparante reactor, sensoren) bevindt zich momenteel op TRL 4. Oplossingsrichtingen voor

continue 24 uren productie bevinden zich algemeen op TRL 3-4. Bij de ontwikkeling van dit soort processen zijn aspecten als economische haalbaarheid, schaalbaarheid en energie efficiëntie leidend. In Nederland wordt hier o.a. onderzoek naar gedaan door U Utrecht en bij de Photocatalytic Synthesis Group (PCS) aan U Twente.

3.3.4 Product-innovatie

Innovatieopgave: Het op grote schaal vanuit CCU kunnen produceren van hoogwaardige en te verkopen producten.

Ambitie: Productie en verkoop van producten die gebaseerd zijn op CO₂ en/of CO.

De daadwerkelijke waardecreatie en businesscases voor CCU-routes ontstaan pas als er producten in de markt kunnen worden gebracht die commercieel interessant zijn. Vaak moeten daarvoor nog meerdere technische hordes worden overwonnen en zal er productontwikkeling moeten plaatsvinden. De belangrijkste toepassingsgebieden voor CCU producten en de bijbehorende uitdagingen, in volgorde van complexiteit, zijn:

- Bouwmaterialen
- Brandstoffen
- Chemische ingrediënten en bouwstenen voor plastics
- Voedingsingrediënten

Bouwmaterialen

Via de eerder beschreven mineralisatieroute kunnen bouwmaterialen worden gefabriceerd. Om deze daadwerkelijk in de markt te krijgen zullen ze moeten voldoen aan de functionele eisen die gesteld worden in de bouw. Functionele testen en duurproeven zijn cruciaal om als volwaardig alternatief beschouwd te worden in de markt.

Bakstenenfabrikant Vandersanden en andere baksteenproducten, verenigd in de Brick Valley, zijn actief in onderzoek naar het in bakstenen vastleggen van CO₂. Ook bij TNO wordt onderzoek gedaan naar de mineralisatie van CO₂ voor de productie van bouwmaterialen (zie 3.3.2).

Brandstoffen

Met CCU technologie kunnen moleculen worden geproduceerd die fungeren als energiedrager, zoals methanol, DME, synthetische kerosine en formic acid. Alleen als die producten daadwerkelijk zijn bewezen in brandstofoepassing (bijv. in stucks, luchtvaart en scheepvaart), zowel wat betreft functionaliteit als wat betreft uitstoot en veiligheid, zal er genoeg vertrouwen ontstaan om die producten te kunnen vermarkten. Ontwikkelingen bevinding zich allemaal nog in de onderzoeksfase. Actieve onderzoeksgroepen bevinden zich bij TNO, Universiteit Utrecht, de TU/e, TU Delft en Universiteit Groningen.

Chemische ingrediënten en bouwstenen voor plastics

Via de verschillende chemische routes kunnen uiteindelijk chemische ingrediëntenbouwmaterialen en bouwstenen voor plastics worden gemaakt. De daadwerkelijke toepassing moet wel eerst bewezen worden voordat er een nieuw product, zoals een CO₂ neutraal schoonmaakmiddel of plastic in de markt gezet kan worden. Er zal dus in applicatietesten aangetoond moeten worden dat de platform chemicaliën voldoen aan functionele eisen, zoals zuiverheid, stabiliteit en toxiciteit. Hier bevinden de ontwikkelingen zich nog in een zeer pril onderzoeksstadium. Dezelfde partijen die actief zijn in de ontwikkeling naar brandstoffen zijn ook actief in de ontwikkeling van chemische ingrediënten en bouwstenen voor plastics.

Voedingsingrediënten

Voor de voedingssector gelden de meest strikte veiligheidseisen. CCU-gebaseerde voedingsproducten zullen moeten voldoen aan eisen, zoals zuiverheid, toxiciteit en inzetbaarheid. Voor marktintroductie zullen de beoogde producten moeten voldoen aan specifieke wetgeving en ook aan de specificaties die gesteld worden door de voedingssector. In het geval van gezondheidsclaims moet ook toestemming worden verkregen van de relevante gezondheidsdiensten. Algen worden al jaren toegepast in voeding, voedingssupplementen en cosmetica en ook in vee- en visvoeding. Dit betreft een gestaag groeiende markt.

De afweging tussen de strengere eisen wat betreft productie, veiligheid en samenstelling en de hogere prijs die gerekend kan worden zal de commerciële haalbaarheid bepalen. Er wordt onderzoek gedaan naar de productie van eiwitten (dierlijk voedsel) uit CO₂. Actieve onderzoeksactiviteiten zijn bij TU Delft en DSM.

3.3.5 Keten-innovatie

Innovatieopgave: Het opzetten van duurzame CCU-waardeketens.

Ambitie: In elk industrie-cluster is minstens één CCU-productieketen gerealiseerd. Realisatie van een koolstof-monitoringsysteem.

Om te komen tot commerciële uitrol van CCU-waardeketens is samenwerking cruciaal. Bedrijven uit zowel de chemische als de technologische waardeketen zullen individueel en samen moeten hebben bij implementatie. Daarbij moet o.a. gedacht worden aan clustermanagers, CO₂-emitters of DAC bedrijven, chemische industrie, EPC contractors, equipment suppliers, productontwikkelaars en brand owners.

Alles begint bij het spreken van dezelfde taal en het gebruiken van dezelfde uitgangspunten, maar ook een continue gesprek over rollen, businesskansen, businessmodellen en

technologise maturiteit is cruciaal. Niet alleen technologise innovatie, maar juist ook nieuwe manieren van samenwerken met behulp van bestaande technologie zullen leiden tot succesvolle productimplementatie. Om dit te bereiken moeten nationale en regionale communities worden opgezet waar waardeketenpartners elkaar kunnen ontmoeten, waar publieke projectresultaten kunnen worden besproken en waar ideeën over uitdagingen en kansen van CCU kunnen worden uitgewisseld. Dit moet leiden tot business samenwerkingen, die afhankelijk van de commerciële haalbaarheid kunnen besluiten om gezamenlijk hoog-TRL projecten in te dienen, zoals NIKI, DEI+ of SDE+. Om te komen tot een gebalanceerde ontwikkeling in Nederland is het belangrijk om specialisaties te verdelen over de te ontwikkelen clusters. Hiervoor is onderzoek nodig en dit moet ondersteund worden.

Voorbeelden van keteninnovaties in ontwikkeling zijn te vinden in industrieclusters als het Noordzee Kanaal Gebied, Chemelot en Chemport Europe. Het is op dit moment nog moeilijk in te schatten wat de CO₂ impact hiervan is, vooral omdat het een geïntegreerde mix van diverse technieken zal zijn. Onderzoek op dit gebied wordt uitgevoerd bij TU Delft, UU, Radboud Nijmegen en TU/e.

3.3.6 Randvoorwaarden: impact op systeemniveau, maatschappelijke inbedding

Innovatieopgave: Wegnemen van niet-technologise belemmeringen voor CCU.

Ambitie:

- *Prioritering van de juiste technologise ontwikkelingen die bijdragen aan het maatschappelijk belang (economise, ecologisch en sociaal).*
- Realisatie van beleid dat integrale, duurzame productieketens op basis van CCU stimuleert, gebaseerd op een track-systeem voor koolstof.

Ten aanzien van het ontwerp van circulaire ketens op basis van CO₂ zijn vier aspecten van belang om coherentie te onderzoeken:

- Duurzaamheid van de integrale CCU keten;
- Impact die toepassing van CCU heeft op andere sectoren;
- Beleidsontwikkeling; en
- Normen en maatschappelijke inbedding en de communicatie daarover.

De duurzaamheid van de integrale keten wordt niet alleen bepaald door de herkomst van CO₂, de duur van de vastlegging van CO₂ in producten en de energie-efficiëntie van het CCU proces. Ook de herkomst en footprint van de benodigde energie en grondstoffen eerder in de keten (o.a. waterstof), het beslag op kritische grondstoffen voor katalysatoren en de neveneffecten verderop in de keten zijn van belang (zoals het

uitsparen van aardgas voor CO₂-dosering bij tuinders). Het ontwerp van circulaire CCU ketens is daarom van belang.

Impact op andere sectoren

Grootschalige CCU processen kunnen ook een forse impact hebben op andere opties. Zo zal grootschalige productie van chemische bouwstenen leiden tot een forse additionele vraag naar duurzame elektriciteit en waterstof en gerelateerde infrastructuur. De inpasbaarheid en de afweging tussen de verschillende routes richting duurzaamheid is een systeemvraagstuk, en zal in nauwe samenhang met de andere MMIP's (7 en 8) beschouwd moeten worden.

Beleidsontwikkeling

CCU is nog een nieuw concept, waardoor de maatschappelijke inbedding nog in de kinderschoenen staat. Zo moet CCU nog een plek krijgen in beleid en instrumentarium. Daartoe is meer inzicht nodig in de duurzaamheid van de integrale CCU-ketens en de impact op andere systemen en infrastructuur (zie ook onder ontwerp voor circulariteit). In welke mate en onder welke voorwaarden is het verstandig om ontwikkeling en toepassing van CCU te stimuleren? Hoe telt het mee bij het halen van de

klimaatdoelen? In het instrumentarium is het van belang dat de kosten en baten niet altijd bij dezelfde schakels in de keten terecht komen, en dat geldt ook de ecologische voor- en nadelen.

Op Europees niveau staat CCU nadrukkelijk op de agenda. De EC probeert beleidsmatig de verhouding te vinden tussen de narratieven emissiereductie, decarbonisatie en recarbonisatie, CCS, CCU en negatieve emissies. Het volgen van deze ontwikkeling, het waar nodig invloed uitoefenen op het beleidsproces en het anticiperen op de verwachte consequenties van dat beleid is daarmee van belang voor beleidsontwikkeling in Nederland.

Normen, standaarden en maatschappelijke inbedding

Het is ook van belang dat producten op basis van CCU door de markt geadopteerd kunnen worden en dat ze passen en erkend worden in normen, regelgeving en aanbestedingsbeleid. De maatschappelijke inbedding vergt verder dat burgers en consumenten ook beter bekend worden met het concept CCU en dat er draagvlak voor deze route ontstaat. Objectieve en transparante communicatie is daarin belangrijk en daarmee relevant om vanuit de overheid ondersteund te worden.

4. Nederlandse innovatie-activiteiten

Om tot een klimaatneutrale industrie met hergebruik van grondstoffen en producten te komen, is er veel te doen. Het vorige hoofdstuk beschreef de innovatie-opgaven rond grondstoffen en producten in detail. Dit hoofdstuk benoemt de belangrijkste activiteiten die nodig zijn om deze innovatie-opgaven verder te brengen. Het gaat daarbij om de activiteiten die op korte termijn, in de komende vier jaar, nodig zijn.

Deelprogramma 1: Circulariteit

Subthema 1: Innovaties van plastics sorteren, voorbereidings-technieken (ontgeuren/wassen/ontkinten) en scheiden.

- Doorontwikkeling van technologie voorbereiden, sorteren en scheiding gericht op kosteneffectiviteit: oplosstrategieën, hardware, robotica, artificial intelligence en analyse technologieën, zoals snelle IR, NIR, DUV-RAMAN etc.
- Sluiten van waterkringlopen met warmte-, loog- en microplastics terugwinning.

Subthema 2: Conversie proces-innovaties.

- Ontwikkeling van nieuwe processen die in-line in een mechanische recycling lijn functioneren.
- Ontwikkelen van optimale procescondities: katalysator, terugwinnen van product, opzuiveren van product, specificaties input en digital twinning.
- Ontwikkeling van 2 commerciële installatie voor pyrolyse van plastics naar kraker feedstock realisatie 2029.
- Ontwikkelen van verschillende chemische recyclingtechnologieën voor moeilijk mechanisch te recyclen monostromen door middel van scheiden van polymeren van andere stoffen.
- Ontwikkelen van verschillende chemische recyclingtechnologieën specifiek om te depolymeriseren.
- Ontwikkeling van nieuwe technologieën naast de huidige bekende ontwikkelingen in chemische recycling.

Subthema 3: Product-innovaties.

- Ontwikkelen van processen en ontwerp voor nieuwe materialen en producten als alternatief voor multimateriaal multilaags en engineering plastic.

- Ontwikkelen van duurzame en te recycleren stabilisatoren en compatibilisatoren.
- Ontwikkelen van nieuwe composieten i.c.m. verwerkingsprocessen met recycleerbaarheid als doel.
- Ontwikkelen van materialen zonder ZZS.
- Het opzetten van demo plants voor minimaal 3 materialen/producten.
- Ontwikkelen van plastics en processen die microplastics tijdens afbraak of verwerking voorkomen.
- Het opzetten van demo plants voor minimaal 3 materialen/producten.

Subthema 4: Keten-innovaties.

- Opzetten van UPV's voor alle productketens en optimalisatie van bestaande.
- Sluiten van waardeketens door gebruik maken van nieuwe data tools waarmee inzicht in de keten van kwaliteiten en hoeveelheden ontstaat.
- Meer ontwikkelen en introduceren van statiegeld of closed-loop inzameling.
- Ontwikkelen van vraaggestuurde recycleerstandaarden.
- Het ontwikkelen van LCA's waarbij de hele keten dynamiek is meegenomen.
- Ontwikkelen van systemisch inzicht hoe nieuwe technieken in een nieuwe keten op elkaar aansluiten.
- Het ontwikkelen van beleidsinstrumenten om gereguleerde import mogelijk te maken
- Ontwikkelen van inzicht in optimale logistiek en verwerking.

Subthema 5: Randvoorwaarden.

- Ontwikkelen van duurzame productinformatie voor bedrijven en consumenten die helpen bij het beïnvloeden van gedrag en (bedrijfs)cultuur bij consument en medewerker.
- Ontwikkeling en acceptatie van nieuwe duurzame business modellen en transitie naar deze nieuwe modellen.
- Bij het ontwikkelen van impactmodellen gedrag en acceptatie elementen meenemen om inzicht te creëren in de samenhang tussen beleidskeuzes, bedrijfskeuzes en burgergedrag.
- Ontwikkeling van wetten en financiële prikkels ter bevordering van circulariteit.

Deelprogramma 2: Biogrondstoffen

Subthema 1: Innovaties op voorbehandeling, ontsluiting en zuivering.

- Ontwikkelen en optimaliseren van (per grondstof mogelijk verschillende) voorbehandelingstechnieken voor opwerking naar homogene, energiedichte en verder verwerkbare tussenproducten.
- Onderzoek naar mogelijkheden voor water en mineralenterugwinning, grondstoffractionering, optimalisatie laagwaardige grondstoffen.
- Ontwikkelen van laag energetische voorbehandelings, ontsluitings en/of zuiveringstechnieken.

Subthema 2: Conversieproces-innovaties.

- Thermochemische conversie naar productgas, (pyrolyse)olie voor chemie.
- Chemisch-katalytische en biotechnologische conversie; vergisting, biobased-grondstoffractionering en opwerking (o.a. naar PLA, PHA, FDCA, organische zuren, MEG, bio-aromaten).
- Conversie van polysacchariden (cellulose, zetmeel) en lignine naar hoogwaardige producten voor bijvoorbeeld was-en schoonmaakmiddelen en circulaire componenten voor de textiel /bouw sector.
- Bioraffinage: realisatie van drie bioraffinage complexen per 2030 voor coproductie van componenten voor chemie.
- Ontwikkelen van op demoschaal functionerend opwerkingsproces voor biobased koolstof met gewenste specificaties als reductiemiddel voor staalindustrie.

Subthema 4: Keten-innovaties.

- Onderzoek hoe cross-disciplinaire en cross-sectorale ontwikkeling van duurzame en sociaal eerlijke biobased-grondstof-waardeketens moeten worden ingericht. Hierbij focus op grondstofvoorziening binnen de Europese context.
- Vanwege de noodzaak om na 2030 steeds minder terug te vallen op de inzet van fossiele grondstoffen worden cascaderingsconcepten voor biobased grondstoffen, inclusief ontwerp voor adaptief instrumentarium verder uitgewerkt.
- Onderzoek naar de optimalisatie logistieke structuren (zowel in Nederland als in Europese context) voor de productie en inzet van biobased grondstoffen, inclusief ruimtelijke inpassing.
- Onderzoek naar methodieken om de ecologische footprint van biobased grondstoffen, producten en processen te bepalen. Huidige LCA-analyses honoreren de CO₂ die is opgeslagen in biobased producten niet eenduidig.

Subthema 5: Randvoorwaarden.

- Ontwikkelen van kennis hoe gedrag en acceptatie kunnen worden beïnvloed voor biogebaseerde producten
- Bij het ontwikkelen van impactmodellen gedrag en acceptatie elementen meenemen om inzicht te creëren in de samenhang tussen beleidskeuzes, bedrijfskeuzes en burgergedrag

Deelprogramma 3: CCU

Subthema 1: Het afvangen, ontsluiten en opwerken van CO₂ en CO bronnen (incl. gasreiniging en -scheiding).

- Doorontwikkeling, opschaling en piloting van kansrijke CO₂ en CO. afvangtechnologieën en zuiveringstechnieken, inclusief DAC.

Subthema 2: Mineralisatie van CO₂.

- Verhoging van efficiency en reactiesnelheid van mineralisatieprocessen.
- Vaststelling functionaliteit van gemineraliseerde producten in commerciële toepassingen.

Subthema 3: Conversie van CO₂ en CO naar platformchemicaliën.

- Doorontwikkeling, opschaling en piloting van processen voor de productie van platformchemicaliën.
- Verhogen energie en CO₂ conversie efficiency middels bijv. robuuste katalisatoren, reactor design of reactive capture (afvang en omzetting in 1 stap).
- Verlagen kapitaalskosten (CAPEX).

Subthema 4: Product-innovatie.

- Ontwikkelen en vermarkten van CCU gebaseerde brandstoffen, plastics, additieven en voedingsingrediënten.

Subthema 5: Keten-innovatie.

- Ontwikkeling van koolstof monitoring systemen, technologie onafhankelijke duurzaamheids vergelijking, businessmodel ontwikkeling.

Subthema 6: Randvoorwaarden.

- Onderzoek naar niet-technologische factoren:
- beschikbaarheid van infrastructuur voor CCU ontwikkeling en opschaling.
- economie: beprijzing, businesscases, etc.
- ecologie: LCA, land en water impact, end-of-life, etc.
- maatschappelijk: normen, acceptatie.
- Ontwikkeling van beleidsinstrumenten ter stimulering en monitoring van CCU producten op impact.

6. Samenhang op hoofdlijnen

Circulariteit van kunststoffen heeft overlap met de KIA Circulaire Economie. In dit MMIP worden de innovaties rond het industriële proces behandeld, en vanuit dat perspectief ook de effecten op de keten. In de KIA-CE ligt de nadruk meer op de keten en op vertrouwen, gedrag en acceptatie in die keten. Er wordt nadrukkelijk samenwerking gezocht met de KIA-CE.

Gebruik en conversie van biograndstoffen heeft een raakvlak met de KIA landbouw, water, voedsel, waar de productie van biograndstoffen een plek heeft. In dit MMIP richten we ons voor biograndstoffen op de industriële conversieprocessen en producten op basis van biogene koolstof.

7. Stakeholders/actoren

Hieronder staat in een overzicht beschreven welke de belangrijkste stakeholders en actoren zijn in het innovatielandschap in Nederland, naar deelprogramma (tabel 6.1).

Internationaal

Internationaal gezien is er voor MMIP 6 het trilateraal verband van Vlaanderen, Nordrhein-Westfalen en Nederlands waar gewerkt wordt aan een regionale strategie voor de chemische industrie, met broeikasgasemissiereductie en grondstoffentransitie als belangrijke speerpunten.

Circulariteit

Voor Circulariteit van kunststoffen zijn CEFLEX, EllenMcArthur Foundation (EMF), Alliance to End Plastic Waste (AEPW) en Circular Plastics Alliance (CPA; onderdeel van EU) belangrijke industrie gedreven organisaties met eigen onderzoeksprogramma's. Daarnaast zijn de volgende internationale branche-organisaties relevant: Plastic Europe,

Plastics Recycling Europe, VinylPlus, European Plastic Converters, WEEE Forum en EERA. Tevens zijn Duitsland (met bedrijven als BASF, Clariant, Covestro en Evonic), België (met bedrijven als Solvay en Ravago) en Frankrijk (met bedrijven als Total en Michelin) belangrijke trekkers in de EU op het gebied van nieuwe wetgeving en systeemdenken.

Biograndstoffen

In Europa spelen op het gebied van onderzoek en gebruik van biogebaseerde grondstoffen voor materialen spelen Finland (met onderzoek op o.a. University of Helsinki, Aalto University, VTT en bedrijven als Neste, UPM en Stora Enso), het VK (met onderzoek op o.a. University of York, University of Bath en Imperial College London), Duitsland (met o.a. Fraunhofer Institute for Chemical Technology en Technical University of Munich en bedrijven als BASF, Bayer, Coverstro en Merck) en Italië (met bedrijven als Novamont en Bio-on) een belangrijke rol.

Tabel 6 Innovatielandschap per deelprogramma

Circularity			Biograndstoffen			CCU		
Universiteiten en kennisinstellingen	Clusters en programma's	PPS organisaties en valorisatie partijen	Universiteiten en kennisinstellingen	Clusters en programma's	PPS organisaties en valorisatie partijen	Universiteiten en kennisinstellingen	Clusters en programma's	PPS organisaties en valorisatie partijen
U Twente	Brightlands Chemelot Campus	Fieldlab Verpakkingen	U Twente	Brightlands Campus Greenport Venlo	ISPT	U Twente	Chemport vInnovation Center	ISPT
WUR	Chemie Campus Groningen	DPI	WUR	Aachen-Maastricht Institute for Biobased Materials	Wetsus	WUR	FLIE Rotterdam	VoltaChem
U Maastricht	Elastomer Competence Centre	ISPT	U Maastricht	Biotech-campus Delft	Biorizon	RUG	Brightlands Chemelot Campus	Brightsite
TU Delft	Circular Design Group	Polymer Science Park	TU Delft	Chemie Campus Groningen	Brightsite	TU Delft	Biotech campus Delft	Investa Alkmaar
U Utrecht	Circulair Friesland	Brightsite	U Utrecht	Biobased Campus Limburg		TU Eindhoven	Groene chemie nieuwe economie	
RU Groningen	Texplus		RU Groningen	Biobased Delta		TNO	CBBC	
TU/e	Cluster Advanced Materials Oost NL		TNO	Groene Chemie Nieuwe Economie		Windesheim	Noordzee Kanaalgebied	
NTCP	Circular Smart Industry		Saxion	TI-COAST		Hanze Hogeschool	Smart Delta Resources	
TNO	Plastic Pact		Windesheim	Chemport Europe		NHL Stenden	Groningen Seaports	
Saxion	Circotracks		Hanze Hogeschool	Centre of Expertise Biobased Economy		U Maastricht		
Windesheim	TPRC		VanHall Larenstein	Circular Biobased Delta		UvA		
Hanze Hogeschool	TI-COAST							
NHL Stenden	NGF CP.NL							

CCU

In Europa spelen op het gebied van onderzoek en ontwikkeling van CCU technologie Duitsland (met onderzoek op o.a. Technical University of Munich en University of Stuttgart en bedrijven als Covestro, Sunfire GmbH, Carbon Upcycling Technologies, Ineratec GmbH), het VK (met onderzoek op o.a. Imperial College London, University of Sheffield, University of Cambridge en University of Edinburgh en bedrijven als Carbon Clean Solutions Ltd, LanzaTech en Eonic Technologies) een belangrijke rol.

Digitalisatie

Op het gebied van digitalisatie is er een groot Europees initiatief rond data voor de circulaire economie. Dit is het Bellagio proces (mede ondersteund door Nederland): "Monitoring progress in Europe's circular economy" is een initiatief van het Italiaanse Instituut voor Milieubescherming en Onderzoek (ISPRA) en het Europees Milieuagentschap (EEA), dat tot doel heeft de belangrijkste principes en gebieden voor toekomstig werk te consolideren om de monitoring van de circulaire economie te verbeteren. Dit proces draagt bij aan de doelstellingen van Europa's nieuwe actieplan voor de circulaire economie, een centraal onderdeel van de Europese Green Deal, waarin wordt opgeroepen tot betere statistieken om de vooruitgang op weg naar circulariteit te monitoren. Deze monitoring moet betrekking hebben op de onderlinge verbanden tussen circulariteit, klimaatneutraliteit en de ambitie om geen vervuiling te veroorzaken.

Daarnaast moeten indicatoren voor het gebruik van hulpbronnen, met inbegrip van het verbruik en de materiaalvoetafdruk, verder worden ontwikkeld.

Bellagio pleit ervoor dat een robuust monitoringsysteem voor de circulaire economie verschillende soorten data moet bevatten:

- Materiaal- en afvalstroomindicatoren om veranderingen te monitoren gedurende de gehele levenscyclus van het materiaal, met inbegrip van resource efficiëntie.
- Milieuvoetafdrukindicatoren om over de volledige levenscyclus van producten en materialen,
- Economische en sociale impact indicatoren

6. Omgevingsanalyse en -factoren

De oriëntatie van de deelprogramma's is grotendeels technisch, waarbij de economische kant eveneens van groot belang is, aangezien verdere kostenreductie een belangrijk doel blijft.

Daarnaast is er een groeiend besef en behoefte om innovaties te bezien en te implementeren als onderdeel van een keten en is er groeiende behoefte en noodzaak om op keten-niveau innovaties op te zetten die ondersteuning geven aan logistieke uitdagingen of het eco-systeem ondersteunen. Deze kunnen o.a. te maken hebben met regelgeving of beschikbaarheid van data.

Ook zijn socio-economische invloeden van groot belang voor het welslagen van innovaties. Deze zijn uitgebreid beschreven in de "randvoorwaarden" als onderdeel van de deelprogramma's. In het deelprogramma Circulariteit speelt gedrag, als onderdeel van sociale innovatie een belangrijke rol. Zo kan sociale innovatie een belangrijke rol spelen bij het verbeteren van inzicht wat de rol van iedere speler is in de keten en kunnen consumenten daarmee geïnspireerd/overtuigd worden welk gedrag bijdraagt aan circulariteit.

Vanwege het toenemende belang wordt in onderstaande paragraaf Digitalisering als doorsnijdend thema specifiek beschreven.

Daarnaast wordt per deelprogramma beschreven wat het belang is van de industriële omvang, belang en innovatiepotentie.

6.1 Digitalisering

Digitalisering en het gebruik van *big data* zijn doorsnijdende thema's voor veel innovatieprogramma's, ook voor MMIP 6. Hieronder eerste een algemene beschrijving wat wordt verstaan onder digitalisatie en wat de trends en wordt ver ingegaan op specifiek voor MMIP relevante digitalisatie stappen.

Het World Economic Forum (13) spreekt over een digitale backbone die nodig is voor de circulaire economie waarbij het gaat om toegang en delen van data en het realiseren van n-n interoperabiliteit: bedrijven moeten toegang krijgen tot betrouwbare data over producten, de gerelateerde maak processen, locatie, gebruiksinformatie etc (zie tabel 7.1.1) en het moet voorkomen worden dat digitale platformen worden gedomineerd door een enkele partij. Dit vraagt dus om ontwikkelingen zowel t.a.v. wetgeving, groeiend bewustzijn over het belang en de waarde van data, nieuwe technologieën om data te kunnen delen en ook standaardisatie. Een backbone die open delen faciliteert en vendor lockin voorkomt.

Algemene trends op het gebied van digitaal

- Toegenomen connectiviteit van assets
- Nieuwe mogelijkheden van tracing van producten
- Initiatieven met datasafehouses
- Initiatieven met product paspoorten en product vingerafdrukken
- Groeiende volume en variëteit van data over producten, processen etc maar achterblijvend standaardisatie
- Meer smart assets

- Decentralisering van computing (edge computing)
- Toegenomen focus op cybersecurity
- Snelle digitale technologie ontwikkeling van met name van AI
- Nieuwe (Europese) wetgeving rond dataopslag en ethische AI.

Om stappen te maken is onderzoek nodig om de volgende vragen te beantwoorden:

- Welke informatie is nodig om de missie te realiseren
- Wie is de eigenaar van data en hoe kan deze ontsloten en gedeeld worden, inclusief afspraken over bijbehorende standaarden.
- Weegt de duurzaamheids impact van de digitale technologie op tegen de winst van de toepassing ervan in de circulaire keten? Digital technologie heeft zelf een hoge materiaal footprint en zorgt ook voor een toename van CO₂ uitstoot.

Digitalisatie in MMIP 6

Barrières om digitale technologie en data te gaan gebruiken binnen een circulaire economie bestaan uit:

- Ontbrekende en ook nieuwe Wetgeving zoals voor gebruik van (open) data, dataopslag, responsible AI
- Het nog ontbreken van mogelijkheden om data te delen met behoud van vertrouwelijkheid:
- Ontbrekende standaardisatie: hiervoor moeten voortgebouwd worden op initiatieven als PCDS: Product Circularity DataSheets: naast een standaard is een IT systeem nodig om de data te delen, een methode om de datakwaliteit te kunnen vast stellen en vervolgens is er een behoefte aan spelers die hier een businessmodel om heen kunnen bouwen.
- Engineerprocess: een ontwerpproces dat de gebruiker centraal stelt (human centred design) en voldoende transparantie kan geven over gebruikte algoritmen
- Cyber en data security
- Volgen van moleculen ipv eindproducten is lastig
- Onvoldoende digitale skills bij betrokken onderzoekers

Voor de circulaire economie is de coördinatie van materiaal en informatiestromen van cruciaal belang, Dit betreft zowel data over de samenstelling van het product als data over de locatie en het gebruik van product. Deze data maakt het mogelijk om de logistieke flow te optimaliseren.

Deze data zal ook helpen om nieuwe businessmodellen te ontwikkelen waaronder digitale platformen en marktplaatsen ten behoeve van hergebruik, refurbishment etc.

Digitaal product paspoort

Een Digitaal Productpaspoort (DPP) is een methode om informatie over een product digitaal vast te leggen. Het belangrijkste doel hiervan is om een gemakkelijk toegankelijke, gecentraliseerde informatiebank te bieden. De informatie van de DPP is afhankelijk van het product. Een DPP geeft belangrijke informatie geven over de materialen in het product (MSDS o.a), de productiestappen van uitgangsmateriaal tot eindproduct,

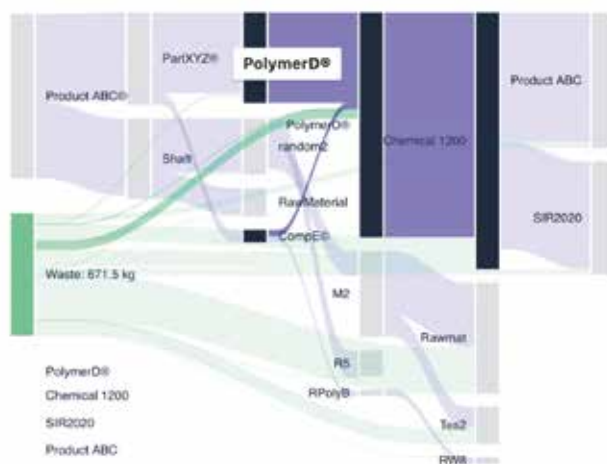
Tabel 7

Data	Technologie	Niet technologische ontwikkelingen
<ul style="list-style-type: none"> • Materiaalsamenstellings data • End-to-end traceability: Real time Logistieke process en routing ; data over (EOL) locatie • Process data • Asset health data • Duurzaamheidsdata over product, productieproces en lifechain (LCA) • Financiële data • Legal data 	<ul style="list-style-type: none"> • Cyber physical systems • Robotisering • AI • Blockchain • Advanced process control • Smart maintenance • Digital twins • Connectivity • Communication protocols • Big Data • Near Field Communication 	<ul style="list-style-type: none"> • Nieuwe marktplaatsen op basis van data uitwisseling wel of niet ondersteunt met ledgertechnologien (Secntrade Eg • Servitisation • Ontwikkeling van product paspoorten en product vingerafdrukken wel of niet in combinatie met Near Field Communication

Figuur 3



www.terex.com/zenrobotics, plastic sorteer robot: waarbij AI wordt ingezet voor het sorteerproces



Voorbeeld traceability info (www.circularise.com)

toepassing, percentage gerecycled materiaal in gerelateerd product. Veel van deze informatie is al beschikbaar (Bron: Retek). Dit zou echter een gecentraliseerde locatie zijn voor alle informatie die nodig is in de hele waardeketen. Het idee daarvan is om dichterbij een circulaire economie te komen.

Alle in Tabel 7.1.1. genoemde aspecten zijn relevant voor de ondersteuning, effectiviteit en/of veiligheid van nieuwe technologieën of systemen in MIP6. Met name inzicht op systeemniveau, wat zeer belangrijk is in een industrieel systeem in transitie en nog veel te weinig wordt onderkent en meer door de overheid (ministeries, uitvoeringsorganisaties) zou moeten worden georganiseerd, kan verkregen worden door inzet van digitalisatietools. Een goed voorbeeld daarvan is het Carbon Transition Model wat door Kalavasta, in samenwerking met ISPT en industrie, is ontwikkeld.

Voorbeelden waar digitalisatie een grote rol spelen binnen dit MMIP zijn het gebruik van AI voor het verbeteren van het sorteren dan wel scheiden van complexe stromen voor het verkrijgen van hoge kwaliteit uitgangsmateriaal. Dit speelt met name bij plastics en biograndstoffen, waarbij het snel en accuraat kunnen uitlezen

en verwerken van (met name chemische) data of dataprofielen de output van een sorteer- of scheidingsproces aanzienlijk kan verbeteren en/of verhogen. In een dergelijk systeem is de inzet van robots eenvoudiger en effectiever dan in een niet-gedigitaliseerd systeem. Ook kan door het koppelen van data in en keten en het ontwikkelen van algoritmes modelmatig inzicht worden verkregen van de dynamiek in een dergelijke keten. Binnen MMIP 6 wordt daarom gebruik gemaakt van ontwikkelingen op het gebied van highperformance computing (HPC), robotisering (figuur 7.1.1), autonomie, digital twins, patroonherkenning, data-driven design, machine learning, kunstmatige intelligentie etc., die ook voor andere sectoren van belang zijn. Dit gebeurt deels door het direct in de projecten betrekken van de benodigde expertise (Dutch Digital Delta, kennisinstellingen, bedrijven), deels door het aansluiten bij andere programma's (kennistransfers) zoals bij Sleuteltechnologie ICT. Gebruik en uitwisseling van data vereist innovaties en oplossingen voor cybersecurity voor een veilig systeem. Cybersecurity is een onderwerp dat bij uitstek ook meer centraal kan worden opgepakt. Binnen de Topsector Energie wordt dit onderwerp daarom breed geadresseerd in het doorsnijdende thema digitalisering.

6.2 Human Capital Agenda (HCA)

Belangrijk voor de ontwikkeling van competenties binnen de grondstof en product transitie en systeem transitie van lineair naar circulair is dat er vele verschillende actoren en organisaties met diverse kennisprofielen en competenties nodig zijn. Dit wordt duidelijk gemaakt in de innovatie systeem analyse van M. Hekker. Innovatie wordt ook sterk beïnvloed door instituties (regels). Het is de totale constellatie van organisaties/ actoren + instituties die het verloop van innovatieprocessen bepalen daarbij zijn interacties allesbepalend; en leren gebeurt bij uitstek door interactie. De gehele constellatie (structuur) kan je mappen

En bevat 7 sleutelprocessen:

- 1 Experimenteren door ondernemers
- 2 Kennisontwikkeling
- 3 Kennisuitwisseling
- 4 Richting geven aan het zoekproces
- 5 Markt formatie
- 6 Mobiliseren van middelen
- 7 Tegengaan van weerstand

Ten behoeve van kennisdiffusie is het van belang dat er een goede connectie is tussen de plekken waar kennis wordt ontwikkeld (kennisinstituten, innovatieprojecten) en waar kennis gebruikt moet gaan worden. Innovatie moet dus gekoppeld worden aan PPS netwerken waar werken leren en innoveren samenkomen.

Technical	Core	Innov-Action
Critical understanding of circular Economy	Ethics in Circular Economy	Adaptability and flexibility
Critical understanding of circular business models		Problem solving
Critical understanding of Sustainability	Vision in Circular Economy	Teamwork and collaboration
Systems thinking	Motivation for Circular Economy	Assertive and empathic communication
Design thinking	Lateral Thinking	Activating a change
Participative project management		Working in complex environments and situations

Skills behoefte voor de circulaire economie

Bepaling van een skillsframework voor professionals binnen de circulaire economie kan kennisinstituten en aanbieders van trainingen en leeractiviteiten faciliteren bij het opzetten en reviewen van hun aanbod en curricula. Banen in de circulaire economie worden wel omschreven als *circular jobs*.

De benodigde skills volgen een T-shape. Waarbij een professioneel diepgaande expertise op een specialistisch gebied combineert met algemene kennis en vaardigheden over diverse disciplines.: de horizontale lijn. Duurzaamheid en circulair economie moeten meer worden opgenomen in de horizontale lijn samen met basisskills tav digitalisering en duurzaamheid en sociale en human skills. Er zijn vanuit Europa al frameworks beschikbaar¹ zodat een framework passend bij deze MMIP versneld gemaakt kan worden.

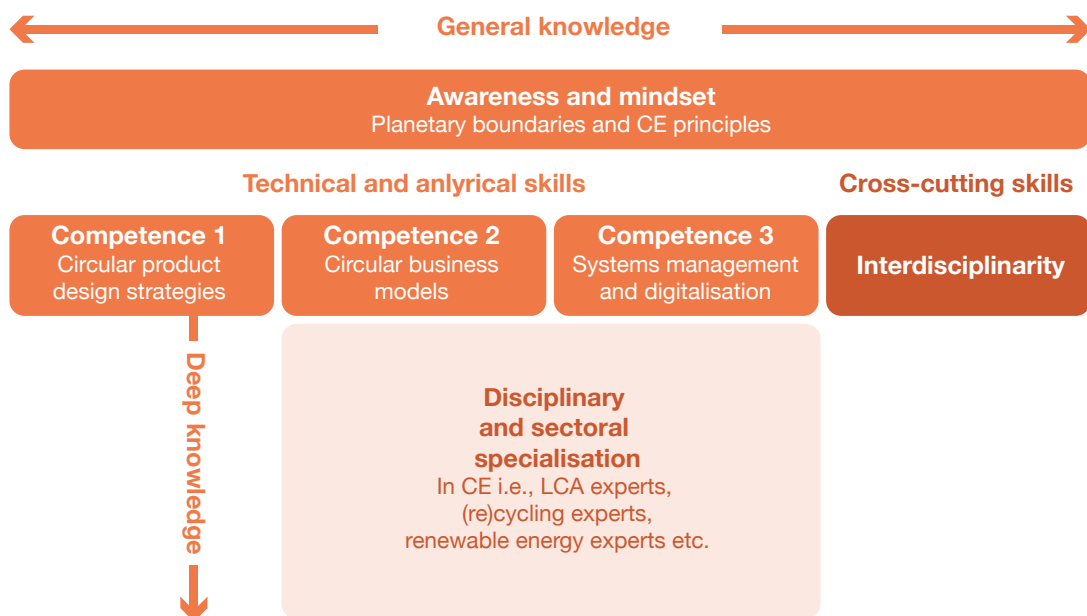
Ook de circulaire economie heeft te maken met de tekorten op de arbeidsmarkt zoals die bestaan voor de hele technische sector. Tekorten aan arbeidskrachten worden door steeds meer ondernemers gezien als voornaamste belemmering bij de bedrijfsvoering. Ruim 8 op de 10 werkenden in technische beroepen en ICT-beroepen zijn man (14). Hier ligt dus een uitdaging

¹ Zie Circular Economy Competence Framework for Young People

T-shape profiel voorbeeld

Bron: Towards a Circular Economy Skills and Competences for STEM professionals.

Model of the Circular Economy CEC framework



Roadmap communicatie

Om de zoektocht en formatie van de markt verder te faciliteren is het aan te bevelen om de MMIP document om te zetten in een compacte en visuele roadmap per thema die de Theory of Change concept volgt en daarmee de droom, de lange termijn doelen en de korte termijn doelen alsook indicatoren die daarbij passen communiceert en daarmee richting en eenduidigheid verschaft

6.3 Omgevingsanalyse en -factoren Circulariteit

Nederland heeft grote belangen in de kunststofindustrie. Er zijn in totaal ongeveer 1500 bedrijven actief, waar ongeveer 59.000 mensen werken en deze hebben een gezamenlijk een omzet van ongeveer €25 miljard.

Nederland scoort internationaal goed als het gaat om circulariteit van kunststoffen en zijn, naast Duitsland, Zweden en Frankrijk, voortrekker op zowel collecteren/sorteren, als verwerken, opzuiveren en hergebruik van plastics en/of grondstoffen voor plastics.

Nederland heeft een goede infrastructuur voor implementatie van technologie. Door het honoreren van het Programma CircularPlastics.NL (CP.NL) door de commissie National Groeifonds worden al deze partijen betrokken bij een nationaal

en allesomvattend innovatieprogramma wat start in 2023 en loopt tot 2032. Dit moet een enorme boost geven aan de circulariteit van plastics. Door het opzetten van Plastic Pact.NL en het aangaan van een alliantie in Europa (CPA) is tevens het internationale perspectief en samenwerking goed belegd.

6.4 Omgevingsanalyse en -factoren Biograndstoffen

Nederland is goed gepositioneerd voor de verwerking van biobased grondstoffen. Nederland heeft uiterst competitieve havens, een sterk agrifood cluster, koplopers in de chemische industrie op het vlak van biobased en recycling en een sterke logistieke sector. Nederlandse bedrijven behoren tot de mondiale voorhoede op het gebied van duurzaamheid en innovatie. Nederland heeft een goede infrastructuur voor implementatie van technologie. In tabel 6.1 is een goed overzicht van spelers in het innovatieveld.

De inzet van biobased grondstoffen is zeker de komende decennia een belangrijke snel opschalbare optie. De transitie naar een circulaire economie speelt zich af op alle geografische schaalniveaus. Nederland is zowel een grote importeur als exporteur van biobased grondstoffen en voedsel. Op alle niveaus zijn majeure veranderingen nodig. Dat kan alleen als er intensief in en tussen ketens wordt samengewerkt en er sprake is van integraliteit.

6.5 Omgevingsanalyse en -factoren CCU

CCU is een relatief jong onderzoeksgebied. Wereldwijd vindt de meeste activiteit plaats in de VS en West-Europa. Binnen Europa vinden de meeste projecten plaats in Duitsland waar met (veel) overheidsgeld grote langdurige programma's zijn opgezet, met Nederland als goede tweede (15). CO₂-levering aan de glastuinbouw vindt al jaren plaats. Met name de chemische industrie, de staalindustrie en AVI's zijn actief op CCU. Rondom mineralisatie en toepassing in bouwmaterialen kent Nederland ook meerdere start-ups en MKB-bedrijven.

De positie van CCU in beleid staat nog niet vast. Er vindt dan ook nog geen sturing plaats op bepaalde CCU-routes, ook worden nog geen randvoorwaarden meegegeven waaraan ontwikkelingen getoetst kunnen worden. Omdat CCU een breed onderzoeksgebied is met vele verschillende technologie routes, bestaat hiermee het risico op versnippering van onderzoek. Naast het voorkomen van versnippering is ook van belang dat Nederland genoeg langdurige competitieve voordelen heeft ten opzichte van andere landen, om bedrijven te verleiden investeringen in Nederland te doen.

Een aantal routes is met succes gedemonstreerd in Nederland. De aanwezigheid van de staalindustrie biedt kansen om CO en CO₂ uit de staalgassen te valoriseren, waarschijnlijk in combinatie met CCS.

Veel routes zijn bijzonder energie-intensief en vereisen de beschikbaarheid van duurzame elektriciteit tegen lage kosten. In algemene zin gesteld, lijken de elektrochemische routes op dit moment meer perspectief te hebben dan de chemisch-katalytische routes die veel duurzame H₂ nodig hebben. Aangezien de ontwikkelingen nog pril zijn, maar wel in snel tempo toenemen, dient deze afweging in de loop der tijd doorlopend getoetst en bijgesteld te worden.

CCU is nog geen focusgebied van instrumentarium gericht op marktontwikkeling (DEI en SDE++).

Er bestaat hierdoor een afbreukrisico. CCU kan qua volume geen vervanging zijn van CCS. De kosten voor technologieontwikkeling zijn hoog, en beschikbaarheid van goedkope duurzame elektriciteit kan een belangrijke showstopper zijn voor implementatie in Nederland. Voorkomen moet worden dat de hype die nu ontstaan lijkt, zich straks tegen CCU keert als de successen zich niet meteen aandienen. Gedegen systeemanalyses kunnen de legitimiteit van CCU toetsen en (zeer waarschijnlijk) versterken. Daarbij moet ook worden aangegeven op welke termijn en met welke toepassing de technologie het meeste oplevert.

7. Communicatie, leren en disseminatie

Zowel de circulaire (plastic) keten, het biograndstoffen veld en het CCU veld ontwikkelen zich snel en worden tegelijkertijd uitgerold. De ecosystemen veranderen snel. Daarom is extra aandacht voor communicatie, leren en disseminatie essentieel, bij voorkeur via platformen.

Circulariteit

Het CP.NL kan hiervoor dienen. Daarbij is het nodig circulaire kunststoffen goed te verankeren in de leerlijnen MBO, HBO en universiteit. Op HBO niveau is dit goed opgepakt bij NHL Stenden, Saxion en Windesheim, waar speciale lectoraten zijn opgezet. Ook heeft de Univeriteit van Maastricht geïnvesteerd in een leerstoel circulair plastics. Dit moet in de komende jaren verder worden uitgebreid.

Tevens zijn er binnen MOOI-projecten eisen voor het opzetten van learning-communities. O.a. binnen het InReP project wordt daar invulling aan gegeven. Dit moet structureel en centraal ondersteund worden om succesvol te blijven.

Biograndstoffen

Het platform Groene Chemie, Nieuwe Economie of het initiatief BioBased Chemicals om te komen tot een NGF-programma zou een goede plek kunnen zijn voor het opzetten van een kennis en disseminatie netwerk voor biograndstoffen (van MBO tot en met Universiteiten). Het gaat om brede kennisopbouw bij opleidingen en bij bedrijven (van MKB tot multinationals). Dit vraagt om een investering in het ontsluiten van kennis en specifieke modules in onderwijsprogramma's.

CCU

Het initiatief FutureCarbon.NL wat moet resulteren in een NGF-programma zou een goede plek zijn voor het opzetten van een kennis en disseminatie netwerk voor CCU (van MBO tot en met Universiteiten).

8. Financiering en randvoorwaarden

8.1 Nationaal Groeifonds programma's

Deelprogramma circulariteit van plastics zal voor een belangrijk deel worden uitgevoerd in met financiering van het nationaal groeifonds programma Circular Plastics NL. De programmalijnen P2 Characterization, sorting and washing en P3-6 Recycling (mechanical, chemical, thermochemical) zijn van groot belang voor dit deelprogramma. Voor de eerste fase van 4 jaar voor Circular Plastics NL is 124 M€ publieke financiering beschikbaar.

Deelprogramma biograndstoffen raakt aan het voorstel Biobased Circular, dat in ronde 3 werd ingediend. Dit voorstel legt het accent op koolhydraatrijke grondstofstromen voor op biopolymeren gebaseerde producten en applicaties. Diverse circulaire waardeketens worden in dit voorstel beoogd. Door dit voorstel ligt er potentieel een sterke basis onder de biograndstoffen die nodig zijn om een netto koolstofneutrale kringloop van grondstoffen en producten mogelijk te maken.

Deelprogramma CCU heeft met Future Carbon NL een belangrijke landingsplaats gevonden. Future Carbon NL heeft 675 M€ publieke financiering aangevraagd, waarvan 300 M€ voor onderzoek en ontwikkeling en 375 voor demonstraties. Het voorstel heeft een kern van industriële eindgebruikers met koolstof waardeketens, en een brede basis van onderzoek en technologieleveranciers.

Deze drie programma's in het nationaal groeifonds dekken een groot deel van MMIP 6 af, maar zijn ook specifiek in hun aanpak. Dat betekent dat naast deze programma's ook generieke regelingen nodig zijn, en dat er een belangrijke rol ligt voor TKI's om nieuwe partijen te verbinden aan de consortia van deze programma's.

Bovendien kennen programma's in het Nationaal Groeifonds een lange aanlooptijd, ook na toekenning. De verwachting is dat de eerste projecten in 2024/'25 kunnen starten. De komende twee jaar voorzien andere regelingen daarom in het broodnodige projectvolume, dat de springplank kan vormen voor de grotere programma's van het Nationaal Groeifonds.

8.2 Subsidieregelingen

Nieuwe technologie-concepten of -opties op laboratoriumschaal kunnen een plek vinden in de NWO (KIC en NWA) calls, in de TSE-regelingen (TSE-industrie, MOOI) en in de PPS-toeslag. Voor deelprogramma circulariteit van plastics zal dit met name gaan om nieuwe conversietechnologie en sorteer- en scheidingsmethodieken. Voor biograndstoffen leggen we ook de nadruk op conversietechnologie en scheidingstechnologie. Voor CCU zien we veel aandacht voor (elektro)katalyse.

De DEI+ en VEKI-regelingen bieden ruime mogelijkheden voor demonstratieprojecten op het gebied van circulariteit van plastics en CCU. Onze verwachting is dat het volume van pilot- en demonstratieprojecten voor deze deelprogramma's de komende 4 jaar verder kan toenemen.

Scope 3 emissiereductie heeft nog geen plek gevonden in de subsidies voor uitrol (HER+ en SDE++). Dit past op bij de huidige praktijk van sturen op directe CO₂-emissies (scope 1). Als er Europees en vervolgens nationaal ruimte komt voor sturen op ketenemissies, dan kan er ook in de uitrol ruimhartig gestimuleerd worden op deze deelprogramma's.

8.3 Randvoorwaarden

Belangrijke randvoorwaarden voor het verduurzamen van de industrie zijn CO₂-beprijzing en stabiel beleid dat perspectief biedt voor investeringen in duurzame processen. De CO₂-beprijzing is Europees geregeld via ETS en nationaal via een CO₂-heffing. De voorgenomen CBAM geeft Europese bedrijven zekerheid ten opzichte van fabrieken in andere werelddelen. De CO₂-prijs is een reële drijfveer geworden voor scope 1 emissiereductie. Voor scope 3 maatregelen helpt deze nog niet.

In het coalitieakkoord is afgesproken om maatwerkafspraken te maken met de bestaande grote uitstoters van CO₂. Dit komt stap voor stap tot stand en lijkt een zinvolle manier om grote bedrijven de zekerheid te bieden die nodig is voor diepe investeringen naar een klimaatneutrale toekomst. Daarnaast kan het zinvol zijn om vergelijkbare afspraken te maken met bedrijven die opkomende ketens en producten leveren, en daarmee onderdeel kunnen worden van de duurzame industriële toekomst. Deze bedrijven dragen niet bij aan de huidige uitstoot, en zijn daarmee geen onderdeel van het probleem. Ze kunnen echter wel een belangrijk onderdeel van de toekomst zijn. We verwachten dat dit met name van belang kan zijn voor de deelprogramma's biograndstoffen en CCU.

We voorzien een belangrijke rol voor roadmaps en beleidsnotities, om een richting te schetsen in een systeem met vele opties en routes. Rond grondstoffen en producten is er sprake van een 'veel op veel' relatie, waardoor het moeilijk onderscheid maken is wat wel en wat geen bijdrage levert voor een klimaatneutrale en circulaire industrie. Voorbeelden zijn de diverse manieren om plastics te recyclen op verschillende niveaus van kwaliteit en/of energie-inhoud. Ook voor biograndstoffen en CCU zijn er vele ketens en producten. We hechten daarom belang aan het nationaal plan energiesysteem en de rol van de industrie daarin. En we zien meerwaarde in een beleidsnotitie op het gebied van CCU, die de contouren moet schetsen waarbinnen we innovaties kunnen sturen.

Referenties

- 1: The Circular Economy for Plastics 2022, PlasticsEurope
- 2: Transitieagenda Kunststoffen, 2022;
file:///D:/Users/rkorstanje/Downloads/roadmap-kunststoffen_transitieagenda-kunststoffen_1.pdf
- 3: CE Delft, mei 2019;
https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/CE_Delft_2T13_Plasticgebruik_en_plastic_afval_verwerking_NL_DEF.pdf
- 4: De circulaire economie voor plastics Nederland 2020, PlasticsEurope NL
https://plasticseurope.org/nl/wp-content/uploads/sites/6/2022/07/PlasticsEurope-National_Onepager_NETHERLANDS.pdf
- 5: Afvalfonds Verpakkingen, 2022;
www.afvalfondsverpakkingen.nl/nl/uw-verpakkingen
- 6: Afvalfonds Verpakkingen, 2020;
www.afvalfondsverpakkingen.nl/nl/onze-recycleresultaten
- 7: Waste Management december 2019;
www.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.012
- 8: Bio-based Building Blocks and Polymers;
Nova Institute 2022
- 9: Why reducing microplastics is essential and achievable;
TNO ,2022
www.tno.nl/en/sustainable/circular-plastics/microplastics-unknown-risks/reducing-microplastics/
- 10: Markets and the Future of the Circular Economy;
Siderius, Zink, 2022
- 11: www.bio-based-solutions.eu
- 12: www.ecoinvent.org
- 13: How digitalization can help build a circular economy ecosystem | World Economic Forum (weforum.org)
- 14: CBS q3 2022
- 15: Literatuuronderzoek door L. Termeer in opdracht van Platform Biobased Circular Business

