

People. Planet. Polymer.

Een Wereld te Winnen

Vincent S.D. Voet

*Professorship Circular Plastics
Academy Technology & Innovation
NHL Stenden University of Applied Sciences*

Januari 2024

Samenvatting

Plastics zijn veelzijdige materialen die ons helpen om gezond, veilig en warm te blijven. Van een hartkatheter en autogordel tot isolatie in de spouwmuur, een wereld zonder kunststoffen is moeilijk voor te stellen. Dit succes heeft echter ook een keerzijde. In feite zijn polymeren – het hoofdbestanddeel van alle plastics – zo goed ontworpen dat ze niet kapot te krijgen zijn. Dat is een ideale eigenschap tijdens het gebruik, totdat het op de vuilnisbelt blijft liggen of in het milieu terecht komt.

Om die reden zijn plastics momenteel onderwerp van een controversieel debat. Waar fabrikanten ons wijzen op de unieke voordelen die kunststoffen met zich meebrengen, roepen steeds meer consumenten en milieuorganisaties op tot een compleet verbod. Zowel de stelling om door te gaan met onbeperkt produceren en gebruik, als de radicale verwerping van plastics, is vanuit wetenschappelijk oogpunt niet realistisch of haalbaar.

Kunststoffen zullen de komende decennia een essentiële rol blijven vervullen in onze maatschappij. Daarom is het noodzakelijk om minder grondstoffen te gebruiken, de levensduur van producten te verlengen en op een hoogwaardige manier te recyclen. Dit vraagt om een cross-sectorale aanpak. Samen met studenten, docenten en bedrijven zet het lectoraat Circular Plastics zich in voor innovaties op het gebied van biopolymeren, recycling en circulair ontwerp. Een circulaire plastics economie is daarbij geen doel op zich, maar een middel om grondstoffengebruik terug te brengen binnen de draagkracht van de planeet.



This is an open access article under the CC BY-NC license.

People. Planet. Polymer.

Een Wereld te Winnen

"A new world will be won not by those who stand at a distance with their arms folded, but by those who are in the arena." – Nelson Mandela

Polymeren zijn echte alleskunnners. Deze veelzijdige moleculen zijn het hoofdbestanddeel van plastics, ook wel kunststoffen genoemd. Veel producten die we dagelijks gebruiken zijn gemaakt van plastics. Ze helpen ons gezond, mobiel, veilig en warm te blijven met toepassingen in de gezondheidszorg, transportsector, voedingsmiddelenindustrie, elektronica en textiel.¹ Tegenwoordig kunnen we ons geen wereld voorstellen zonder deze materialen. Maar halverwege de vorige eeuw gebruikten we nauwelijks kunststoffen. Hun beschikbaarheid was vrij beperkt, evenals het aantal mogelijke toepassingen. Hoe zijn kunststoffen getransformeerd van zo zeldzaam naar alomtegenwoordig?

Opkomst van het nieuwe goud

Over het algemeen bestaan kunststoffen uit grote moleculen – de polymeren – gemengd met additieven zoals weekmakers, kleurstoffen of vlamvertragers die de eigenschappen van het eindproduct verbeteren. De polymeerwetenschap wordt beschouwd als een relatief nieuw vakgebied. Toch wordt het materiaal al vele eeuwen toegepast. Meer dan 3000 jaar geleden speelden de Maya's in Midden-Amerika hun *pokatok* balspel al met een bal gemaakt van natuurlijk rubber. In feite maakt dit hen de eerste kunststofproducenten in de geschiedenis. Pas in 1840 patenteerde Charles Goodyear in de Verenigde Staten de vulkanisatie van rubber met behulp van zwavel. Na deze ontdekking werd rubber al snel gebruikt voor meerdere toepassingen, waaronder banden en schoeisel. Het eerste synthetische polymeer, niet afkomstig van planten of dieren maar van fossiele grondstoffen (ruwe olie), werd in 1907

uitgevonden door Leo Baekeland. Zijn fenolhars was uniek vanwege de hardheid en hittebestendige eigenschappen en kreeg de naam Bakeliet, naar zijn uitvinder.

In 1920 publiceerde Hermann Staudinger een postulaat getiteld 'Über Polymerisation', waarin hij stelde dat polymeren moleculen zijn met een hoge molaire massa, samengesteld uit een groot aantal kleine bouwstenen. Het fundamentele begrip van deze nieuwe materiaalklasse, die Staudinger macromoleculen noemde, leidde tot de ontwikkeling van een grote verscheidenheid aan nieuwe synthetische kunststoffen. Dit moment wordt om die reden vaak beschouwd als het begin van de hedendaagse polymeerwetenschap.² Een paar decennia later ontving Staudinger een Nobelprijs voor zijn pionierswerk.

Populaire kunststoffen zoals polyethyleen (PE), polyvinylchloride (PVC), polystyreen (PS) en polyamide (PA) kwamen in de jaren dertig op de markt. De enorme vraag aan militair materieel tijdens de Tweede Wereldoorlog leidde tot een verdere toename van de productie. Tegelijkertijd werden andere polymeren ontwikkeld, waaronder polyester (PET) en polytetrafluorethyleen (PTFE), beter bekend onder de merknaam Teflon.

Synthetische polymeren, toegepast in kunststoffen, rubbers en vezels, werden in de tweede helft van de twintigste eeuw steeds populairder. Meer en meer producten vonden hun weg naar de markt. De polyethyleen draagtas deed zijn intrede, piepschuim werd een commercieel succes, evenals Tupperware, ontwikkeld door Earl Silas Tupper die op slimme wijze zijn luchtdichte voedselcontainers promoveerde via een netwerk van huisvrouwen. Eind jaren vijftig patenteerde LEGO zijn koppeling-ontkoppelingssysteem en onthulde Mattel de eerste Barbiepop. Later werden acrylverven ontwikkeld en drankflessen van PET

geïntroduceerd. Eind jaren zeventig waren kunststoffen wereldwijd de meest voorkomende materiaalsoort.

Productie blijft stijgen

Tegenwoordig worden kunststoffen in zeer grote volumes geproduceerd. Na een stagnatie aan het begin van de Covid-19 pandemie, steeg de wereldwijde plasticproductie naar een recordvolume van 400 miljoen ton in 2022.³ Deze enorme berg aan materiaal staat gelijk aan het gewicht van 7500 Titanics, of circa 40.000 Eiffeltorens. Kunststoffen hebben de snelst groeiende productie van alle bulkmaterialen wereldwijd.⁴ Het moge duidelijk zijn, we leven op een planeet vol plastics.

1. Leven op planet polymer

Een vloek of een zegen?

Het bovengenoemde succes van plastics heeft ook een keerzijde. In feite zijn deze materialen zo goed ontworpen, dat ze niet kapot te krijgen zijn. Althans, niet op moleculair niveau. Veel synthetische kunststoffen gaan honderden jaren mee, vaak veel langer dan nodig voor de daadwerkelijke toepassing. Dat is fijn tijdens het gebruik, maar niet als het op de vuilnisbelt blijft liggen. Nog zorgwekkender is het deel dat in ons ecosysteem terecht komt, zoals de (micro)plastics die hun weg naar de oceanen vinden. Een fenomeen dat bekend staat als de plastic soep.⁵

De nadelige gevolgen van plastic voor het milieu leiden tot een steeds sterker wordende oproep tot vervanging van plastics naar alternatieve materialen in producten zoals verpakkingen. De hashtag *#plasticfree* heeft inmiddels ruim 5 miljoen posts op Instagram, en is een voorbeeld van deze tendens.⁶ Herbruikbare materialen zoals glas, papier en metaal worden daarbij als duurzamer alternatief gepromoot. Daarentegen bezitten plastics unieke eigenschappen, terwijl de besproken alternatieven ook hun impact op het milieu hebben. Laten we daarom eerst de belangrijkste voor- en nadelen van

plasticgebruik op een rij zetten, op basis van de feiten.

Klimaat, milieu en grondstoffen

De kunststofsector is verantwoordelijk voor 4,5% van het wereldwijde emissie van broeikasgas.⁷ Het uitstoten van broeikasgassen vindt plaats tijdens de productie van plastics, het fabriceren van kunststofproducten, maar ook bij de verbranding van plastic afval. Daarmee spelen kunststoffen een significante rol bij klimaatverandering gekoppeld aan de opwarming van het aardoppervlak.

Daarnaast komen plastics in het milieu terecht, gedurende de productie-, gebruik- als afdankfase. Jaarlijks belanden miljoenen tonnen kunststof in de oceaan. Volgens de Ellen MacArthur Foundation staat dit gelijk aan de inhoud van één vuilniswagen per minuut.⁸ Volgens een recent verschenen studie dreef in 2020 ongeveer 3,2 miljoen ton plastic in de oceanen.⁹ Ondanks het feit dat dit minder is dan in eerdere berekeningen, is dit nog steeds reden tot grote zorgen. De fragmentatie van plastics in kleinere deeltjes, zogenaamde micro- en nanoplastics, kan resulteren in nadelige gezondheidseffecten voor mens en dier. Onlangs hebben onderzoekers de aanwezigheid van kleine plasticdeeltjes aangetoond in menselijk bloed,¹⁰ maar er is op het moment van schrijven slechts beperkt bewijs over de exacte gevolgen van dergelijke waarnemingen voor de menselijke gezondheid.¹¹

Onze levensstijl vraagt 3.6 Aarde's.

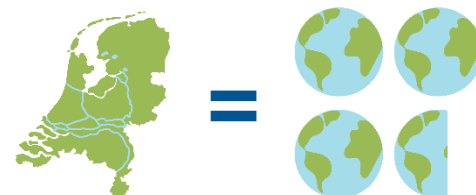


Fig. 1. Dutch Overshoot Day op 12 april 2023.¹²

Op 12 april 2023 was het *Earth Overshoot Day* in Nederland. Op deze dag hadden we net zoveel van planeet aarde onttrokken, als de aarde in

1 jaar kan genereren.¹² Met andere woorden: wanneer de hele wereld zou leven als Nederlanders, dan zouden 3,6 aardes nodig zijn (Fig. 1). We gebruiken dus meer grondstoffen dan de aarde ons geeft, en we teren in op onze reserves. Earth Overshoot Day benadrukt de noodzaak van de grondstoffentransitie, om de planeet ook voor toekomstige generaties leefbaar te houden. De groeiende kunststofsector consumeert een aanzienlijke hoeveelheid (fossiele) grondstoffen. Naar verwachting zal de petrochemische sector in 2050 verantwoordelijk zijn voor bijna de helft van de wereldwijde groei van de vraag naar olie.¹³ De groeiende consumptie van plastics zorgt mede voor grondstoffenschaarste, wat tevens leidt tot leveringsproblemen in de kunststofindustrie.

Een veelzijdig lichtgewicht

Kunststoffen hebben bijzondere eigenschappen waardoor ze kunnen worden gebruikt in een breed palet aan toepassingen. Naast bekende toepassingen in kleding, voedselverpakkingen en kinderspeelgoed, vinden we ze ook terug in hoogwaardige producten zoals ruimtevaartuigen, mobiele telefoons, waterzuiveringsinstallaties en medische implantaten zoals kunstmatige hartkleppen.

Hun veelzijdigheid is toe te wijzen aan het feit dat de eigenschappen van polymeren kunnen wijzigen door chemische of fysische modificaties.¹ Door toevoeging van weekmakers, bijvoorbeeld, verandert de flexibiliteit. Het moleculair verknopen van polymeerketens leidt doorgaans juist tot een stijver materiaal. Kleur kan gemakkelijk worden aangebracht door middel van kleurstoffen. En door verschillende bouwstenen (monomeren) te combineren kunnen zogenaamde copolymeren worden gemaakt waarmee bijvoorbeeld chemische resistentie of hittebestendigheid naar behoefte kan worden aangepast. Een bekend voorbeeld hiervan is ABS, het kunststof dat LEGO tot een daverend succes heeft gemaakt. Dit alles creëert een waardevolle “gereedschapskist” voor

polymeerwetenschappers om kunststof geschikt te maken voor de gewenste toepassing.

Aan de ene kant eist plasticconsumptie dus zijn tol op klimaat en milieu, maar tegelijkertijd kan het gebruik ook een positieve milieu-impact hebben.

Door hun lichte gewicht kan de toepassing van kunststoffen, in plaats van bijvoorbeeld metalen, het brandstofgebruik en dus broeikasgasemissies verminderen.¹⁴ Het gebruik van koolstofvezel-versterkte polymeren in de carrosserie van auto's verlaagt de milieu-impact in vergelijking met het toepassen van zwaarder staal.¹⁵

Daarnaast kunnen plasticverpakkingen een belangrijke rol spelen in het verlengen van de houdbaarheid van voedingsmiddelen. Een komkommer verpakt in plastic is vijf keer zo lang houdbaar, wat aantoonbaar zorgt voor minder groenteafval in de supermarkt. Toch leidt het gebruik van verpakkingen in algemene zin niet persé tot minder voedselverspilling, omdat plastics vaak ook voor andere redenen worden toegepast (esthetisch effect, differentiatie tussen producten, etc.).¹⁶

We zullen dus per geval moeten beoordelen welk materiaal de laagste milieu-impact heeft in een bepaalde toepassing, waarbij toch de noodzakelijk functie behouden blijft.

Hoe verder

Kunststoffen spelen een essentiële rol in het maatschappelijk welzijn en zijn tevens een belangrijk onderdeel van onze economische welvaart. Gezien de unieke eigenschappen van plastics is de verwachting dat dit in de komende decennia niet anders zal zijn. De effecten van plasticconsumptie op klimaat en milieu zijn echter verontrustend.

Een drastische “oplossing” zou zijn om plastics in zijn geheel te verbannen, en terug te keren naar het gebruik van hout, keramiek, glas en metaal. Een dergelijk scenario zou echter kunnen leiden tot een verdubbeling van energieverbruik en

uitstoot van broeikasgassen, en ernstige economische schade.¹⁷

In plaats daarvan moeten we duurzaam en circulair gebruik van kunststoffen stimuleren. Om deze reden werkt het lectoraat Circular Plastics van NHL Stenden aan de omschakeling naar een circulaire kunststofeconomie, waarin fossiele grondstoffen worden uitgebannen en vervangen door hernieuwbare of recyclebare materialen.

2. Het nieuwe normaal

Circulariteit is een feit

Het is lastig om het concept van een circulaire economie toe te schrijven aan een enkele oorsprong of initiatiefnemer. In de jaren 70 kreeg het principe van circulariteit meer aandacht, onder andere dankzij het baanbrekende rapport 'The Limits to Growth'

van de Club van Rome.¹⁸ In 1982 publiceerde Walter Stahel zijn paper 'The Product-Life Factor', waarin hij voor het eerst de term *closed-loop economy* introduceerde.¹⁹ Ellen MacArthur beschrijft haar visie op de *circular economy* op basis van drie principes: elimineer afval en vervuiling, houdt producten en materialen in een kringloop, en regenereer de natuur.^{8,20} Volgens de Verenigde Naties kan dit aanzienlijk bijdragen aan de uitvoering van de 2030 Agenda voor Duurzame Ontwikkeling, vertaald naar zeventien *Sustainable Development Goals* (SDG's).²¹ Een circulaire economie draagt bij aan het behalen van SDG 7 (betaalbare duurzame energie), 8 (goede banen en economische groei), 11 (duurzame steden en gemeenschappen), 12 (verantwoorde consumptie en productie), 13 (klimaatverandering tegengaan), en 14 en 15 (beschermen van leven op land en in zee). Het is duidelijk dat de transitie van lineair naar circulair een gezamenlijke inspanning vereist van bedrijven, beleidsmakers en kennisinstellingen.

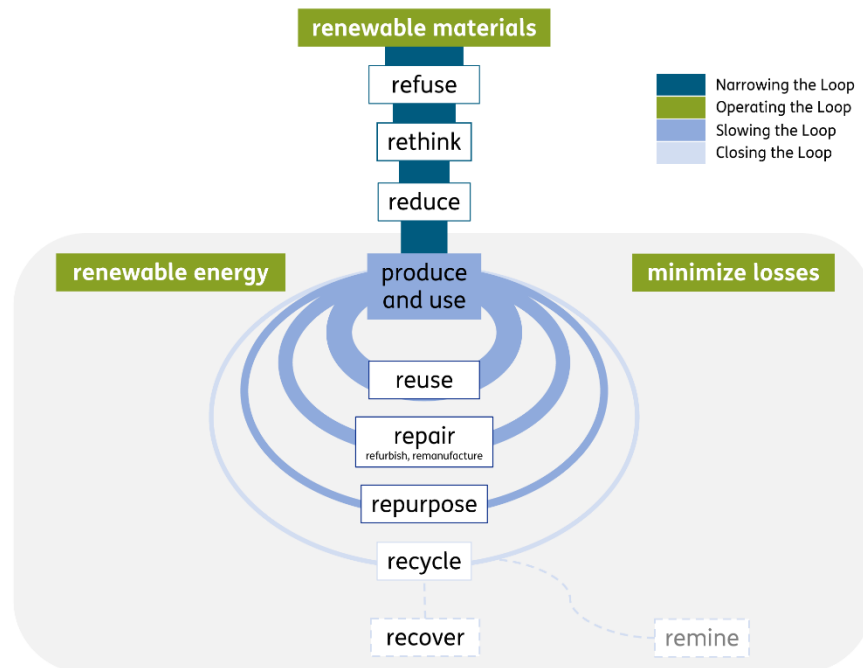


Fig. 2. Kader voor een circulaire economie voor plastics, gebaseerd op de R-ladder.¹⁶

Tijd voor actie

Met de *Green Deal* lanceerde de EU in 2019 een routekaart voor een duurzaam Europa. Dit omvat onder andere een actieplan voor de circulaire economie, waarvan de uitvoering moet leiden tot het bereiken van klimaatneutraliteit in 2050 en economische groei losgekoppeld van het gebruik van grondstoffen, waarbij tegelijkertijd het concurrentievermogen van de EU op de lange termijn wordt gewaarborgd.²² Een concrete actie die hieruit voortkomt is de zogenaamde *single-use plastic* (SUP) richtlijn, om aanwezigheid van wegwerpplastics – zoals bekers, bakjes en flesjes – in het milieu sterk te verminderen.²³

Wat opvalt is dat agenda's rondom circulaire economie en klimaat meer en meer aan elkaar worden gekoppeld. Dat is een goede ontwikkeling, maar dat neemt niet weg dat er ook een belangrijk verschil is. Waar circulaire economie draait om het reduceren en vervangen van fossiele grondstoffen, redeneert de klimaatagenda voornamelijk vanuit het perspectief van het verlagen van broeikasgasemissies.²⁴ Om de verschillende doelstellingen te verwezenlijken is het van belang dat in beide dossiers tegelijkertijd wordt gewerkt aan beide invalshoeken: emissies én grondstoffen.

Ook de Nederlandse overheid omarmt het circulaire denken en streeft naar een volledige circulaire kunststofketen in 2050. In het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE)¹² wordt door de staatssecretaris gesteld dat de circulaire economie onmisbaar is om de klimaatdoelen te halen. Om de hoge ambities te verwezenlijken zijn specifieke maatregelen geformuleerd voor de transitie naar circulaire kunststoffen (plastic verpakkingen, plastic in de bouw, landbouwplastic), als één van de vijf meest impactvolle productieketens. Het programma benoemt vier strategieën om grondstoffengebruik circulair te maken.

1. Vermindering van grondstoffengebruik (*narrow the loop*)

2. Vervanging van grondstoffen: van primair naar secundair of biobased²⁵
3. Levensduurverlenging (*slow the loop*)
4. Hoogwaardige verwerking (*close the loop*)

Door aan deze vier knoppen te draaien is het mogelijk het grondstoffengebruik terug te brengen binnen de draagkracht van onze planeet, dus van 3,6 naar 1 Aarde. In feite is dit een vereenvoudigde weergave van de R-ladder,²⁶ zoals die (onder andere) wordt toegepast in het model voor een toekomstbestendige kunststofeconomie door TNO en Fraunhofer (Fig. 2).¹⁶ Deze ladder weerspiegelt de mate van circulariteit. Door de hoogste R-strategieën eerst toe te passen (in de volgorde: *Refuse, Rethink, Reduce, Re-use, Repair, Repurpose, Recycle, Recover*) besparen we normaliter meer grondstoffen. Het toepassen van biobased (*renewable*) grondstoffen, indien er toch behoefte is aan nieuwe materialen, schaaft dit model onder een overkoepelende O-strategie (namelijk: *operating the loop*).

Noordelijke provincies onderschrijven de ambitie om in het komende decennium een toonaangevende circulaire regio te zijn met een voorbeeldfunctie in Europa.^{27,28} De Regionale Innovatie Strategie voor Slimme Specialisatie (RIS3) is daarbij een belangrijke innovatiestrategie, en de ontwikkeling 'van lineair naar circulair' één van haar speerpunten.²⁹ In Noord-Nederland bestaat een uniek ecosysteem om van de circulaire en biobased transitie een succes te maken.³⁰ Een sterke agrosector, twee chemische clusters in Groningen en Drenthe, de Eemshaven, een Nationaal Test Centrum voor Circulaire Plastics in Friesland, een innovatief MKB, opschalingsfaciliteiten en meerdere kennisinstellingen verenigd onder de vlag van de Universiteit van het Noorden.³¹ Alle partners dragen bij aan de beschikbaarheid van (bio)grondstoffen, chemicaliën, polymeren en hoogkwalitatieve recyclingmethodes voor de circulaire regio, hetgeen nauwe domein-overstijgende samenwerking bevordert.³²

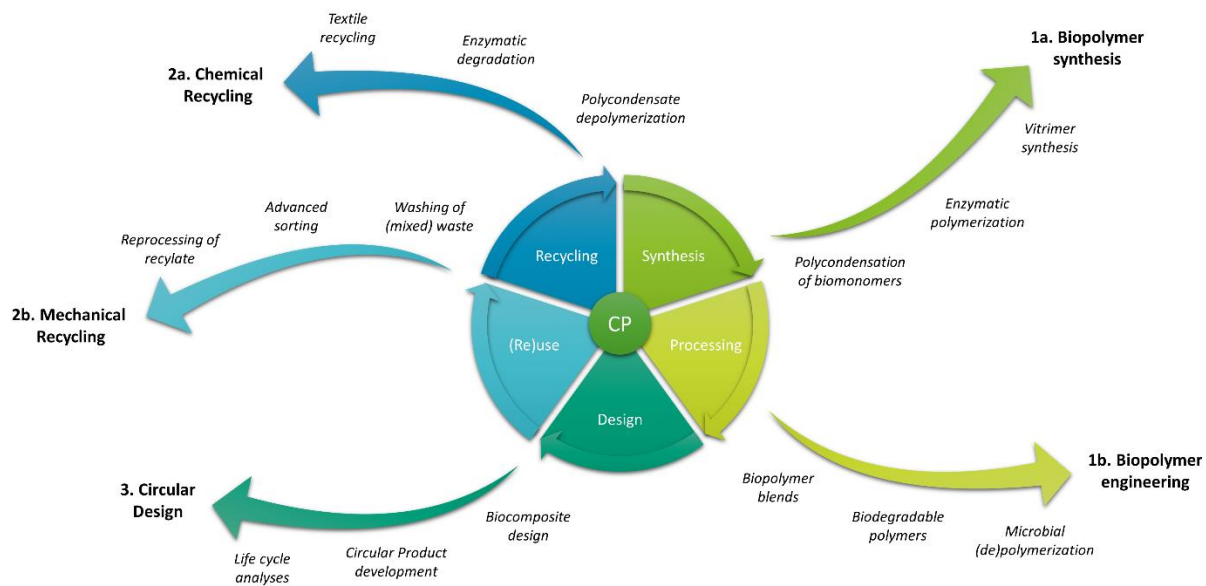


Fig. 3. Roadmap met onderzoekslijnen lectoraat Circular Plastics.

Oplossingen op maat

De toenemende vraag naar circulaire kunststoffen in hoogwaardige toepassingen vraagt om een cross-sectorale aanpak. Een dergelijke transitie heeft alleen kans van slagen wanneer politiek, wetenschap, industrie én burgers samenwerken. Dit impliceert ingrijpende veranderingen op diverse niveaus.

Passend beleid is een uitstekende aanjager van de circulaire transitie. Wetgeving kan bijvoorbeeld een cruciale rol spelen om het percentage recycleat in producten te verhogen, of om de milieueffecten van een product mee te wegen in de kostprijs. Daarbij zijn levenscyclusanalyses (LCA) een goed gereedschap. Nieuwe businessmodellen moeten zich niet alleen richten op rethink en reduce, maar ook op refuse.¹⁶ Daarnaast is voorlichting essentieel om alle belanghebbenden te helpen bij het maken van daadwerkelijk duurzame keuzes. Zo moet de focus verschuiven van de ontwikkeling van nieuwe producten naar het gebruik van bestaande producten, middels bijvoorbeeld refurbishment. Tot slot vraagt een circulaire kunststofeconomie ook om

herontwerp en ontwikkeling van verbeterde materialen (duurzame polymeren) en procestechologieën (voor hergebruik, reparatie en recycling).

Praktijkgericht onderzoek binnen het hoger onderwijs heeft op dit vlak een cruciale rol te vervullen. Het onderzoek dat wordt uitgevoerd in lectoraten kan oplossingen bieden voor complexe maatschappelijke opgaves, zoals de circulaire transitie van kunststoffen. Hierin is co-creatie tussen onderwijs, onderzoek en de beroepspraktijk kenmerkend.³³

Het lectoraat Circular Plastics van NHL Stenden zet zich via toegepast onderzoek én onderwijs in voor duurzame productie, gebruik en hergebruik van kunststoffen. Op die manier levert het een belangrijke bijdrage aan de Europese en landelijke doelstellingen rondom circulariteit en duurzaamheid.³⁴ De inhoudelijke focus van het lectoraat is opgebouwd rond drie sterk samenhangende speerpunten:

1. Biopolymeren (synthese en engineering)
2. Recycling (chemisch en mechanisch)
3. Circulair ontwerp

De keuze voor deze drie programmalijnen leidt tot een compleet aanbod van kennis en innovatie voor de circulaire transitie: van circulaire productontwikkeling (narrowing the loop), tot hernieuwbare grondstoffen (operating the loop) en hoogwaardige verwerking (closing the loop). Dit alles op het grensvlak van de domeinen chemie, engineering en ontwerp. De speerpunten zijn uitgewerkt in een vijftal onderzoekslijnen, met bijbehorende onderzoeksthema's, weergegeven in Figuur 3.

3. Wanted: "Dead or Alive"

Toekomstbestendige plastics

De missie van het lectoraat Circular Plastics is om de transitie naar een toekomstbestendige economie voor plastics in Noord-Nederland te stimuleren. De ontwikkeling van duurzame materialen en processen voor kunststoffen kunnen bijdragen aan verantwoord en minder grondstoffengebruik. Wat dat betreft is er een wereld te winnen: onze planeet. Bij de ontwikkeling van circulaire innovaties zijn we geïnspireerd door diezelfde planeet en haar wonderbaarlijke natuur.

In de volgende paragrafen worden drie innovaties nader toegelicht: van polymeren gemaakt uit suikers, tot zelfhelende kunststoffen en natuurlijke recyclefabrieken. Deze ontwikkelingen zijn tot stand gekomen in co-creatie met het onderwijs en bedrijfsleven in (Noord-)Nederland.

I. Vitrimeren: een helend karakter

Kunststoffen zijn op te delen in ruwweg twee categorieën: thermoplasten en thermoharders. De meeste polymeren, zoals PE en PET, zijn thermoplastisch. Het voordeel van deze materialen is dat ze geschikt zijn voor recycling. Door te verwarmen treedt immers vloeï op, waardoor het plastic een nieuwe vorm kan aannemen. Thermoharders nemen ruim 10% van de kunststofmarkt in. Deze materialen zijn doorgaans sterk en weerbaar, waardoor ze kunnen worden toegepast in hoogwaardige

applicaties zoals coatings, composieten en lijmen. Helaas zorgt de moleculair verknoopte structuur ervoor dat ze niet of nauwelijks kunnen worden gerepareerd of gerecycled wanneer dat nodig is.³⁵

Om de levensduur van dit type kunststoffen te verlengen is een aanpassing op moleculair niveau nodig. Door dynamische knooppunten in te bouwen die onder specifieke omstandigheden (temperatuur, licht, druk) met elkaar kunnen uitwisselen, is vervorming en dus (her)verwerking op macroscopisch niveau toch mogelijk.³⁶ Vitrimeren, zoals deze nieuwe klasse polymeren ook wel genoemd worden, bezitten daardoor in feite de eigenschappen van thermoplasten én thermoharders, afhankelijk van de omstandigheden.

Het lectoraat Circular Plastics heeft onlangs samen met een consortium van bedrijven en kennisinstellingen een vitrimeer ontwikkeld op basis van hernieuwbare grondstoffen zoals vanilline en vetzuren.³⁷ Dit materiaal blijkt uitstekend toepasbaar als inkt voor 3D printers. Dankzij de dynamische knooppunten in de geprinte objecten is het mogelijk om scheuren en breuken te herstellen (Fig. 4), hetgeen onmogelijk is in traditionele thermoharders.

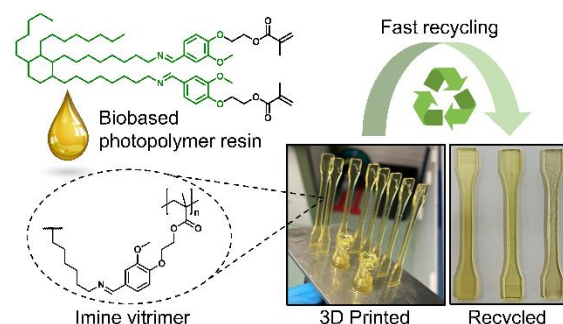


Fig. 4. Repareerbare en recyclebare thermoharders, ontwikkelt voor de 3D printmarkt.³⁷

Het zelfherstellende vermogen van vitrimeren doet denken aan dat van natuurlijke materialen, zoals bot, huid en plantaardig weefsel. Door producten te repareren kan de levensduur aanzienlijk worden verlengt. Dit vertraagt de vraag naar nieuwe grondstoffen. Het is een cruciale strategie in de circulaire economie voor plastics.³⁸

II. Enzymen: natuurlijke versnellers

Eén van de laatste R-strategieën is recycleren. Wanneer hergebruiken, repareren of herbestemmen niet langer een optie is, richten we ons op kunststofrecycling. Nederland is de koploper in Europa. Inmiddels wordt 45% van het plastic afval in ons land ingezet voor recycling. Bijna 30% wordt daadwerkelijk omgezet in recycleaat dat nieuw plastic kan vervangen.³⁹ Ondanks het feit dat ingezameld kunststofafval niet meer wordt aangeboden op de stortplaats, wordt het merendeel (55%) nog steeds verbrand. Om de kringloop volledig te sluiten is een mix van recyclingmethodes nodig.⁴⁰ De keuze voor een technologie hangt vervolgens af van de kwaliteit en uniformiteit van de afvalstroom in kwestie.

In het geval van een mono-stroom, zoals ingezamelde statiegeldflessen, verdient mechanische recycling de voorkeur in verband met lagere (milieu)kosten. Daarbij wordt het plastic omgesmolten tot een nieuw granulaat, waaruit direct nieuwe producten kunnen worden gemaakt. Aanwezige vervuilingen kunnen echter moeilijk worden verwijderd en zullen zich opbouwen in het recycleaat, waardoor onder andere verkleuringen kunnen optreden en de kwaliteit van het product per recyclecyclus afneemt.

Voor meer vervuilde of complexe afvalstromen, zoals textiel, biedt moleculaire (of: chemische) recycling een uitkomst. Tijdens dit proces worden de polymeerketens in plastics afgebroken tot kleinere bouwstenen: monomeren of oligomeren. Het voordeel van deze technologie is dat herpolymerisatie van de gezuiverde bouwstenen leidt tot schone polymeren van hoge kwaliteit. Dit maakt in principe oneindige recycling mogelijk, al zijn specifieke condities nodig om het proces succesvol te laten verlopen en is het niet geschikt voor alle type polymeren.⁴¹ Deze vorm van recycling wordt met name toegepast voor polycondensaten zoals polyester (PET).

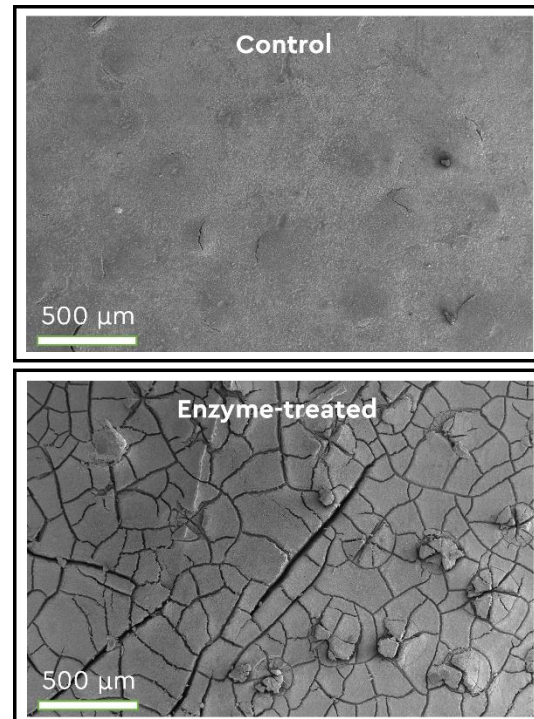


Fig. 5. Succesvolle toepassing van enzymen voor degradatie van (bio)polymeren, gevisualiseerd met electronenmicroscopie.⁴⁴

De eerste stap in moleculaire recycling, waarbij de polymeren worden afgebroken tot monomeren of oligomeren, wordt depolymerisatie genoemd. Het is in feite een omgekeerde polymerisatie, mogelijk gemaakt doordat polycondensaties zogenaamde evenwichtsreacties zijn. Waar tot nu toe vaak traditionele katalysatoren werden gebruikt om dit proces te versnellen, is het ook mogelijk om de hulp in te schakelen van de katalysatoren die de natuur ons gegeven heeft, en die actief zijn overal om ons heen, tot in ons eigen lichaam: enzymen.^{42,43}

Onze onderzoeksgroep zet enzymen in om verschillende mengsels van polyesters af te breken (Fig. 5). De depolymerisatie vindt plaats onder milde omstandigheden en in afwezigheid van schadelijke stoffen. Door de selectiviteit van het enzym, *Humicola insolens* cutinase, breekt het ene type polyester (PBAT) sneller af dan het andere type (PLA).⁴⁴ Dit maakt enzymatische recycling een veelbelovende methode die onderdeel uit kan maken van de benodigde mix van recyclingtechnologieën.

III. Biopolymeren: vrij van fossiel

Als er ondanks alle inspanningen om een gesloten kunststofkringloop te bewerkstelligen, toch substantieel behoefte is aan nieuwe materialen, dan is het van belang dat hiervoor hernieuwbare grondstoffen worden gebruikt. Volgens de ISO-norm 14021 is dat “materiaal dat samengesteld is uit biomassa van een levende bron en dat doorlopend kan worden hernieuwd”.⁴⁵ Met andere woorden, het zijn grondstoffen waarvan de voorraad net zo snel kan worden hernieuwd als verbruikt, zoals bijvoorbeeld suikerbiet, hennep, maïs, zeewier, algen en raapzaad. Het nova-Institute heeft deze definitie verder opgerekt. Zij beschrijven twee additionele bronnen voor *renewables*. Naast de biosfeer, kan hernieuwbaar koolstof ook gewonnen worden uit de technosfeer (recycling van reeds bestaande kunststoffen) en de atmosfeer (uit direct CO₂ gebruik).⁴⁶

Fossiele grondstoffen – uit de geosfeer – zijn niet hernieuwbaar, ondanks het feit dat deze ontstaan zijn uit dierlijke- en plantaardige resten. Dat komt doordat het miljoenen jaren oud is, waardoor het geen deel meer uitmaakt van de koolstofcyclus, en dus vrijkomt als extra CO₂ tijdens de productie van kunststof of verbranding van afval.²⁵ Daarom is het noodzakelijk om in de nabije toekomst de productie van nieuwe polymeren los te koppelen van fossiele grondstoffen.⁸

De hybride onderzoeksgroep HyBRit, een samenwerkingsverband tussen Rijksuniversiteit Groningen (RUG) en NHL Stenden, werkt aan de synthese van biopolymeren op basis van hernieuwbare grondstoffen (Fig. 6). Voorbeelden zijn vitrimeren gebaseerd op appelzuur,⁴⁷ en de synthese van polyesters op basis van 2,5-bis-(hydroxymethyl)furan (BHMF).⁴⁸ Zowel appelzuur als BHMF worden gewonnen uit suikers.

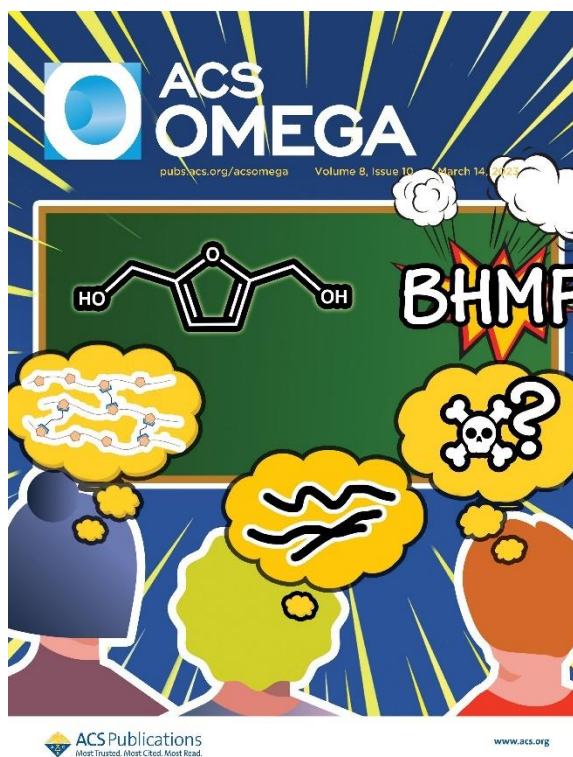
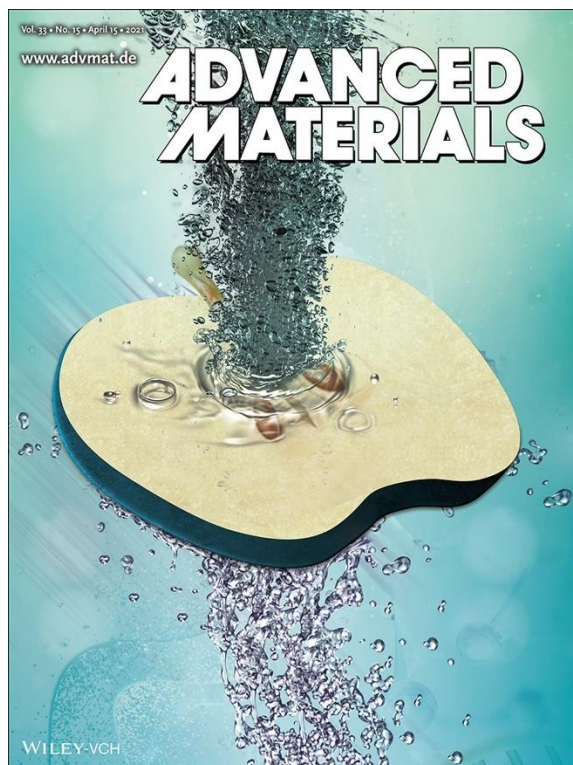


Fig. 6. Voorpagina's van de tijdschriften Advanced Materials (boven) en ACS Omega (onder) die het onderzoek van HyBRit presenteren.^{47,48}

De substitutie van fossiele- door biograndstoffen grijpt met name in op het terugdringen van broeikasgasemissies. Een duurzaam scenario voor producten aan het einde van hun levensduur blijft noodzakelijk om accumulatie van plastics in het milieu een halt toe te roepen. Naast de eerder genoemde oplossingen, is voor bepaalde toepassingen biologische afbreekbaarheid ook een passend scenario.

Polyhydroxyalkanoaat (PHA) is een veelbelovend biopolymeer dat zowel hernieuwbaar als bioafbreekbaar is.⁴⁹ De productie van PHA vindt plaats in microben. Wanneer er een overvloed aan voedsel is, zoals vetten en suikers, kunnen bacteriën PHA maken en opslaan. In feite fungeert PHA voor de bacterie als reservestof, dat weer kan worden gebruikt als koolstof- en energiebron in tijden van schaarste. Dit maakt PHA dus zowel produceerbaar als afbreekbaar door de natuur.

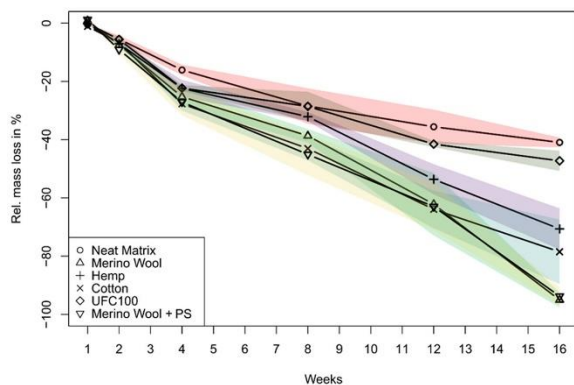


Fig. 7. De relatieve gewichtsafname van natuurvezel-versterkt PHA in de bodem.⁵¹

De biologische degradatie van PHA materialen is door onze onderzoeksgroep veelvuldig in kaart gebracht.⁵⁰ Daarbij zijn verschillende variabelen onderzocht, zoals materiaaldikte, omgevingstemperatuur, medium, en de inmenging van additieven of andere afbreekbare plastics. Onlangs is de afbraak van PHBH, een specifieke klasse van PHA, in aanwezigheid van verschillende natuurvezels vergeleken (Fig. 7).⁵¹ Wol blijkt de desintegratie van PHBH het meest te versnellen.

Ondanks het bioafbreekbare karakter, is het niet gewenst dat alle producten van PHA na gebruik

worden afgebroken tot CO₂ en water. PHA is echter, als thermoplast en lid van de polyesterfamilie, geschikt om toegepast te worden in verschillende R-strategieën.⁵² Het kan daarom een belangrijke speler worden in de transitie naar een circulaire kunststofeconomie.

4. Context is King

Discipline-overstijgend leren

Om de transitie van lineair naar circulair te laten slagen, heeft de maatschappij van de toekomst professionals nodig die niet alleen kennis kunnen beheersen, maar ook kunnen (co)creëren.⁵³ Studenten hebben belang bij een discipline-overstijgende omgeving waarin zij zich actief kunnen ontwikkelen door over de grenzen van hun eigen specialisme samen te werken aan hetzelfde doel.⁵⁴

"I never teach my pupils, I only attempt to provide the conditions in which they can learn." – Albert Einstein

Einstein was niet alleen een briljante wetenschapper, maar ook een begenadigd leraar. Waarom? Omdat hij studenten wist te betrekken. Hoe? Door te faciliteren in plaats van doceren.⁵⁵ Het gaat niet zozeer om het overdragen van inhoud, maar om het creëren van een (actieve) leeromgeving waarin de student die inhoud tot zich kan nemen. We moeten streven naar betrokken studenten die niet werken om te voldoen aan de verwachtingen van de docent, maar om zichzelf te ontwikkelen. Dat klinkt logisch, maar gebeurt nog onvoldoende.

Een actieve leeromgeving heeft een positieve invloed op de houding en resultaten van studenten.⁵⁶ Zo hebben STEM studenten (*science, technology, engineering, mathematics*) anderhalf keer minder kans om te falen wanneer zij in een 'actief klaslokaal' hebben geleerd.

In het hoger onderwijs zijn de afgelopen decennia diverse leermethodes ontwikkeld, zoals *problem-based* en *challenge-based learning*, met het doel om studenten op te leiden

tot innovatieve, kritische, zogenaamde *T-shaped professionals*.⁵⁷ NHL Stenden werkt sinds een aantal jaar met *Design-Based Education* (DBE) als onderwijsconcept. DBE kenmerkt zich door iteratieve processen waarbij de *design-thinking* cyclus wordt doorlopen en de student leert door te werken aan praktijkvragen uit het beroepenveld, in zogenaamde ateliers.⁵⁸

Greenwise Campus

In Noord-Nederland wordt hard gewerkt aan circulaire oplossingen voor kunststof. In de Greenwise Campus bundelen kennisinstellingen, bedrijven en overheden hun krachten. Het delen van kennis en faciliteiten vergroot immers de kans op succes. Dit netwerk vormt een uitdagende omgeving voor studenten en onderzoekers, en is een ideale broedplaats voor nieuwe kennis, innovatie en ondernemerschap.

Binnen deze campus zet de hybride onderzoeksgroep *Biopolymer and Recycling Innovations* (HyBRit) zich in voor de vergroening van de chemie.³¹ HyBRit is een uniek samenwerkingsverband, waarin de vakgroep Macromolecular Chemistry & New Polymeric Materials (RUG) en het lectoraat Circular Plastics

(NHL Stenden) staf, studenten en faciliteiten delen. Door samen te werken buiten de traditionele grenzen van kennisinstellingen en expertise is de onderzoeksgroep in staat de kloof tussen wetenschappelijke ontdekkingen en toepassingen te overbruggen. Zij ontvingen hiervoor de NWO Team Science Award in 2022.

Plastic Soup? Close the Loop!

Binnen deze context ontwikkelt het lectoraat Circular Plastics samen met technische opleidingen nieuw onderwijsaanbod. In de recent ontworpen onderwijseenheid 'Plastic Soup? Close the Loop!' worden studenten met achtergrond Chemie, Biologie en Engineering uitgedaagd om kunststofvervuiling tegen te gaan.

WILDLANDS Adventure Zoo in Emmen streeft er naar om zo min mogelijk afval te produceren, en dat op een zo circulair mogelijke manier te verwerken. Als opdrachtgever in deze cursus vragen zij onze studenten om advies voor reductie van de kunststofafvalstroom in het park, en om tot voorstellen te komen voor inzameling en duurzame verwerking naar grondstof voor nieuwe producten.

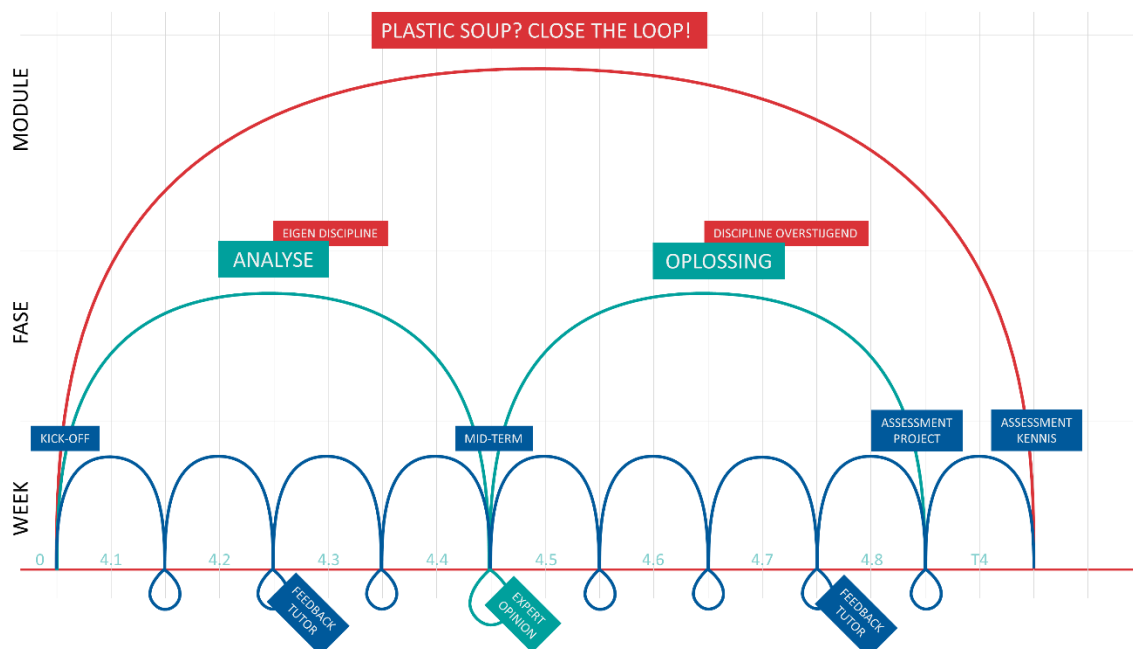


Fig. 8. Een leerboegschema visualiseert het leerpad in de onderwijseenheid *Plastics Soup? Close the Loop!*

De onderwijseenheid is opgedeeld in twee fases, zichtbaar in het leerbogenschema (Fig. 8). In de Analyse-fase brengen studenten in monodisciplinaire teams de afvalstromen van het park in kaart, op locatie. De bevindingen worden bediscussieerd met de opdrachtgever tijdens de mid-term presentaties. Vervolgens worden de studenten in opleiding-overstijgende groepen ingedeeld en start de Oplossing-fase. Door de verschillende expertises samen te brengen in een actieve leeromgeving worden studenten gestimuleerd om concrete oplossingen te ontwikkelen voor WILDLANDS. Ze worden daarbij ondersteund door docenten uit de opleidingsteams en experts uit het lectoraat.

De discipline-overstijgende samenwerking tussen studenten met gezamenlijke leeruitkomsten verbetert het probleemoplossend vermogen van studenten⁵⁷ en leidt tot een meer inclusieve manier van denken.⁵⁴ Actief leren wordt bevorderd door te werken aan een vraagstuk in de daadwerkelijke beroepscontext.⁵⁹ Dit in plaats van een geforceerde kennismaking in de passieve setting van bijvoorbeeld een stagemarkt. Oftewel, niet de inhoud, maar context is leidend. Dat is immers in het 'echte' leven ook zo.

5. Een wereld te winnen

Samen is niet alleen

Planet Polymer is onderwerp van controversieel debat. Fabrikanten wijzen ons op de veelzijdigheid en daaraan gekoppeld de unieke voordelen die kunststoffen met zich meebrengen. Tegelijkertijd roepen steeds meer consumenten, aangevoerd door actiegroepen, op tot een compleet verbod. Zowel de stelling om door te gaan met onbeperkt produceren en gebruik, als de radicale verwerping van plastics is vanuit wetenschappelijk oogpunt niet realistisch en niet haalbaar.

Het lectoraat Circular Plastics is ervan overtuigd dat kunststoffen in de komende jaren een belangrijke rol blijven spelen in onze maatschappij. Dit kan echter alleen door het

bewerkstelligen van circulaire productie, gebruik en hergebruik. Bijvoorbeeld door grondstoffengebruik te verduurzamen en verminderen, de levensduur van producten te verlengen en hoogwaardige recycling. Een enthousiast team van onderzoekers zet zich daarom in voor de ontwikkeling van duurzame polymeren en nieuwe processen om plastics een tweede leven te geven. Dit vraagt om een cross-sectorale aanpak, en dit doen wij in nauwe samenwerking met studenten, docenten, onderzoekers, overheden en het bedrijfsleven in Noord-Nederland, binnen de context van de Greenwise Campus.

Een toekomstbestendige en circulaire economie voor plastics is geen doel op zich, maar een middel om grondstoffengebruik terug te brengen binnen de draagkracht van onze planeet. Want een ding is zeker, er is op dat gebied een wereld te winnen.

Dankwoord

De totstandkoming van dit position paper is het resultaat van intensieve samenwerking tussen verschillende partijen.

De auteur dankt allereerst de collega's van het lectoraat Circular Plastics en de onderzoeksgroep HyBRIt voor het enthousiasme en volharding waarmee ze aan ons onderzoek werken. Zonder jullie waren er geen tastbare resultaten om te delen. Datzelfde geldt voor de docenten en studenten Life Science en (Polymer) Engineering, van eerstejaars BSc tot MSc afstudeerders. Het is inspirerend om met jonge mensen te werken die de transitie van lineair naar circulair samen willen vormgeven.

Ook een woord van dank aan alle partners van onze onderzoeksgroep: van industrie en overheden tot andere kennisinstellingen. Samen stellen we uitdagende vragen en gaan vervolgens op zoek naar een antwoord. De ontwikkeling van de Greenwise Campus is een veelbelovende stap naar intensivering van onze samenwerking.

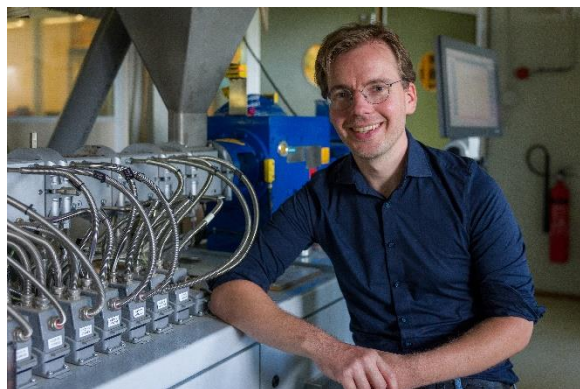
Het management van onze academie, vertegenwoordigd door Jooske Haije, Femke Tamminga en Harm-Jan Bouwers, wordt bedankt voor hun volledige steun. Samen met andere collega's creëren jullie de beste omgeving waarin we ons onderzoek en onderwijs blijvend kunnen ontwikkelen.

Dr. Rudy Folkersma, dr. Jan Jager en prof. dr. Katja Loos worden in het bijzonder bedankt als kritische lezers van de eerste versie van dit manuscript. Jullie feedback heeft de boodschap verduidelijkt en versterkt. Maar bovenal is het een plezier om dagelijks met jullie samen te werken, en te kunnen sparren over alle wetenschappelijke en niet-wetenschappelijke thema's die ons bezighouden.

Tot slot wil ik ook het thuisfront bedanken. Elsemarie, jouw onvoorwaardelijke steun is een grote stimulans in mijn werk. Maar veel belangrijker, thuiskomen is dankzij jou, Siem en Lara elke dag een cadeau.

Over de auteur

Vincent Voet, PhD



Vincent studeerde Scheikunde aan de Rijksuniversiteit Groningen. Zijn masteronderzoek deed hij op het Lawrence Berkeley Lab in Californië (USA). In 2015 promoveerde hij cum laude op zijn onderzoek naar het maken van nieuwe kunststoffen voor digitale dataopslag in het Zernike Institute for Advanced Materials (RUG). In 2017 ontving hij de Challa Polymeer Prijs voor het beste proefschrift binnen zijn vakgebied. Na zijn promotie werkte

hij een jaar in Lesotho (Zuid-Afrika) aan de Paray School of Nursing in Thaba Tseka. Daar doceerde hij de module Science aan verpleegkundestudenten, en ontwikkelde hij het curriculum voor General Nursing.

Sinds 2016 werkt hij bij het lectoraat Circular Plastics (voorheen Duurzame Kunststoffen) van NHL Stenden Hogeschool, eerst als Research Lecturer en tegenwoordig als lector. Als lector is Vincent nauw betrokken bij het onderzoek en onderwijs op het gebied van nieuwe biopolymeren en (moleculaire) recycling van plastics en textiel. Hij heeft een passie voor het opleiden van de volgende generatie technologen. In 2022 ontving hij een Comenius Teaching Fellowship voor onderwijsontwikkeling waarbij discipline-overstijgend samenwerken centraal staat. De afgelopen jaren begeleidde hij ca. 30 BSc en MSc scripties, en momenteel is hij co-promotor van 9 PhD studenten. Hij publiceerde meer dan 20 artikelen in internationale wetenschappelijke tijdschriften en werkt samen met een groot aantal industriële partners om de transitie naar een circulaire kunststofeconomie te versnellen.

Samen met hoogleraar Katja Loos van de vakgroep Macromolecular Chemistry & New Polymeric Materials, en collega lector Rudy Folkersma, zette hij de eerste hybride onderzoeksgroep (HBO en WO) van Nederland op. De initiatiefnemers van HyBRit ontvingen daarvoor de NWO Team Science Award. De ontwikkeling van een recyclebaar biomembraan werd door de KIJK publieksjury betiteld als het Beste Tech-idee van 2021. In 2022 werd Vincent benoemd tot Rising Star door het wetenschappelijke tijdschrift ACS Materials, voor zijn onderzoek naar circulaire kunststoffen voor 3D printers. Onlangs eindigde hij in de top 3 van de verkiezing voor Wetenschapstalent 2023 georganiseerd door New Scientist.

Literatuur

- ¹ V.S.D. Voet, J. Jager, R. Folkersma. *Plastics in the Circular Economy*. 1st ed., De Gruyter: Berlin, Germany, 2021.
- ² G. Challa, A.J. Schouten, K. Loos. *Inleiding in de Polymeerchemie*. 3rd ed., University of Groningen, the Netherlands, 2010.
- ³ Plastics Europe. *Plastics – the Fast Facts*, 2023.
- ⁴ R. Geyer, J. Jambeck, K. Law. *Production, Use, And Fate Of All Plastics Ever Made*. *Sci. Adv.* 3, 25-29, 2017.
- ⁵ Plastic Atlas. *Facts and Figures about the World of Synthetic Polymers*. 2019.
- ⁶ www.instagram.com/explore/tags/plasticfree, geraadpleegd op 15 augustus 2023.
- ⁷ L. Cabernard, S. Pfister, C. Oberschelp, S. Hellweg. *Growing environmental footprint of plastics driven by coal combustion*. *Nat Sustain* 5, 139-148, 2022.
- ⁸ Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company. *The New Plastics Economy - Rethinking the Future of Plastics*, 2016.
- ⁹ M.L.A. Kaandorp, D. Lobelle, C. Kehl, H.A. Dijkstra, E. van Sebille. *Global mass of buoyant marine plastics dominated by large long-lived debris*. *Nature Geoscience* 16, 689-694, 2023.
- ¹⁰ H.A. Leslie, M.J.M. van Velzen, S.H. Brandsma, A.D. Vethaak, J.J. Garcia-Vallejo, M.H. Lamoree. *Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood*. *Environ. Int.* 163, 107199, 2022.
- ¹¹ World Health Organization. *Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health*, 2022.
- ¹² Rijksoverheid. *Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030*, 2023.
- ¹³ International Energy Agency. *The future of petrochemicals - Towards more sustainable plastics and fertilisers*, 2018.
- ¹⁴ M.F. Ashby. *Materials and the Environment, Eco-informed Material Choice*. 3rd ed., Butterworth-Heinemann, 2021.
- ¹⁵ J.R. Dufloy, J. De Moor, I. Verpoest, W. Dewulf. *Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing*. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 58, 9-12, 2009.
- ¹⁶ TNO and Fraunhofer Umsicht. *From #plasticfree to future-proof plastics*. 2023.
- ¹⁷ TNO. *Don't waste it – Solving the Dark Side of Today's Plastics*, 2020.
- ¹⁸ D.H. Meadows, L. Dennis, J. Randers, W.W. Behrens. *The limits to growth: A report to the Club of Rome*, 1972.
- ¹⁹ W.R. Stahel, *The Circular Economy in the European Union: History of the Circular Economy*, Springer Nature, Switzerland, 2020.
- ²⁰ SystemIQ. *ReShaping Plastics: Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe*, 2022.
- ²¹ United Nations. *Evaluation for Agenda 2030 - Providing Evidence on Progress and Sustainability*, 2017.
- ²² European Commission. *Circular Economy Action Plan – For a Cleaner and More Competitive Europe*, 2020.
- ²³ European Parliament. *Directive on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment*, 2019.
- ²⁴ Transitieteam Kunststoffen. *Adviesroute naar een Circulaire Economie voor Kunststoffen*, 2022.
- ²⁵ S. van Veldhoven, E.D. Wiebes. *Brief Regering: Duurzaamheidskader Biograndstoffen*, 2020.
- ²⁶ J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer. *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*, 2017.
- ²⁷ Provincie Drenthe. *Groene Economische Agenda*, 2021.
- ²⁸ Vereniging Circular Friesland. *Samen Werken aan een Circulair Friesland*, 2022.
- ²⁹ SNN. *Research- en Innovatiestrategie voor Slimme Specialisatie (RIS3) voor Noord*, 2021.
- ³⁰ Chemport Europe. *Changing the Nature of Chemistry*, 2019.
- ³¹ Universiteit van het Noorden. *Drivers of Transition: Kennisagenda of Hoofddlijnen*, 2021.
- ³² J.A. Thomann, A. Heeres, E. Bekkering. *The Northern Netherlands: Transformation of a gas-producing region into a forerunner in the biobased circular transition*, *Journal of Business Chemistry* 20, 46-59, 2023.
- ³³ Vereniging Hogescholen. *Gelijke Kansen voor de Hogeschoolstudent*, 2023.
- ³⁴ NHL Stenden. *Businessplan Circulaire Kunststoffen*, 2023.
- ³⁵ W. Post, A. Susa, R. Blaauw, K. Molenveld, R.J.I. Knoop. *A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications*. *Polymer Reviews* 60, 359-388, 2020.

- ³⁶ G.M. Scheutz, J.J. Lessard, M.B. Sims, B.S. Sumerlin. *Adaptable Crosslinks in Polymeric Materials: Resolving the Intersection of Thermoplastics and Thermosets*. Journal of the American Chemical Society 141, 16181-16196, 2019.
- ³⁷ J. Stouten, G.H.M. Schnelting, J. Hul, N. Sijstermans, K. Janssen, T. Darikwa, C. Ye, K. Loos, V.S.D. Voet, K.V. Bernaerts. *Biobased Photopolymer Resin for 3D Printing Containing Dynamic Imine Bonds for Fast Reprocessability*. ACS Appl. Mater. Interfaces 15, 22, 27110-27119, 2023.
- ³⁸ V.S.D. Voet. *Closed-Loop Additive Manufacturing: Dynamic Covalent Networks in Vat Photopolymerization*, ACS Mater. Au 3, 1, 18-23, 2023.
- ³⁹ Plastics Europe. *The Circular Economy for Plastics: A European Overview*, 2022.
- ⁴⁰ Afvalfonds verpakkingen. *Visiedocument Chemische en Fysische Recycling*, 2023.
- ⁴¹ B. Shojaei, M. Abtahi, M. Najafi. *Chemical recycling of PET: A stepping-stone toward sustainability*, Polym. Adv. Technol. 31, 2912, 2020.
- ⁴² K. Loos, *Biocatalysis in Polymer Chemistry*. Wiley-Vch, 2011.
- ⁴³ J. Benninga, J. Jager, V.S.D. Voet, R. Folkersma, K. Loos. *Enzymatic Recycling of Polyurethanes*. ACS Books, 2023, accepted for publication.
- ⁴⁴ J. Benninga, V.S.D. Voet, R. Folkersma, K. Loos. *Enzymatic depolymerization of (bio)polyester blends*. Conference Poster IUPAC-CHAINS, 2023.
- ⁴⁵ International Organization for Standardization. *ISO Standard 14021:2016*, 2021.
- ⁴⁶ Nova Institute. *Renewable Carbon - Key to a Sustainable and Future-Oriented Chemical and Plastic Industry*, 2020.
- ⁴⁷ C. Ye, V.S.D. Voet, R. Folkersma, K. Loos. *Robust Superamphiphilic Membrane with a Closed-Loop Life Cycle*, Advanced Materials 33, 2008460, 2021.
- ⁴⁸ C. Post, D. Maniar, V.S.D. Voet, R. Folkersma, K. Loos. *Biobased 2,5-Bis(hydroxymethyl)furan as a Versatile Building Block for Sustainable Polymeric Materials*, ACS Omega 8, 8991-9003, 2023.
- ⁴⁹ W. Zhou, D.I. Colpa, H. Permentier, R.A. Offringa, L. Rohrbach, G.W. Euverink, J. Krooneman. *Insight into polyhydroxyalkanoate (PHA) production from xylose and extracellular PHA degradation by a thermophilic Schlegelella thermodepolymerans*. Resources, Conservation & Recycling 194, 107006, 2023.
- ⁵⁰ E. Keller, C. van Noordenne. *Circularity and End of Life of PHA*. Conference Presentation Go!PHA PHA Recycling, 2023.
- ⁵¹ V. Röhl, C. van Noordenne-Bos, H. Wieland, N. Graupner, M. Rottmann-Meyer, J. Müssig. *Effect of Different Natural Fibers on Mechanical and Disintegration Properties of Compostable Biobased Plastics*. Journal of Natural Fibers 20, 2248383, 2023.
- ⁵² D.H. Vu, D. Akesson, M.J. Taherzadeh, J.A. Ferreira. *Recycling strategies for polyhydroxyalkanoate-based waste materials: An overview*. Bioresource Technology 298, 122393, 2020.
- ⁵³ Vereniging Hogescholen. *Professionals voor morgen – Strategische Agenda*. VH, Den Haag, 2019.
- ⁵⁴ J.Y. Park, J.B. Son, *Transitioning toward Transdisciplinary Learning in a Multidisciplinary Environment*, International Journal of Pedagogies and Learning 6, 82, 2010.
- ⁵⁵ T. Costa, *Learning through Experience and Teaching Strategies outside the Classroom at Design University Studies*, Social and Behavioral Sciences 196, 35, 2015.
- ⁵⁶ S. Freeman, S.L. Eddy, M. McDonough, M.K. Smith, N. Okoroafor, H. Jordt, M.P. Wenderoth, *Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics*, P.N.A.S. 111, 8410, 2014.
- ⁵⁷ S.E. Gallagher, T. Savage, *Challenge-based learning in higher education: an exploratory literature review*, Teaching in Higher Education, 2020. DOI:10.1080/13562517.2020.1863354.
- ⁵⁸ R.B. Bakker, C.G.F. Sinia, *Strategisch Onderwijsbeleid 2019-2024: Ons kompas voor onderwijsinnovatie*, NHL Stenden, Leeuwarden, 2018.
- ⁵⁹ A. Armellini, *Active Blended Learning: Definition, Literature Review, and a Framework for Implementation*, 2021. DOI:10.4018/978-1-7998-7856-8.ch001.