

DUURZAME CIRCULAIRE CHEMIE ALS NIEUWE EINDTERM IN DE DERDE GRAAD SO

Aantal woorden: 6787

Femke Buys

Studentennummer: 01404044

Promotor(en): Prof. dr. Katrien Strubbe, dr. Hans Vanhoe

Verkorte Educatieve Masterproef (9SP) voorgelegd tot het behalen van de graad van de Educatieve Master in de "Wetenschappen en technologie"

Academiejaar: 2020 – 2021, Educatieve Masteropleiding

Inhoudsopgave

Lijst van afkortingen.....	2
Lijst van figuren.....	3
Lijst van tabellen	4
Abstract	5
Inleiding.....	6
Onderzoeksdesign.....	10
Inhoud eindterm	11
<i>Inleiding: Verschillende economische modellen.....</i>	<i>11</i>
Lineaire economie (Take-make-waste principe)	13
Circulaire economie (Cradle-to-cradle principe).....	17
<i>Chemie binnen de verschillende economische modellen</i>	<i>23</i>
Lineaire chemie.....	23
Circulaire chemie	30
Bronnen	40
Bijlagen.....	45

Lijst van afkortingen

SO = Secundair onderwijs

PET = Polyethyleentereftalaat

HDPE = Hoge dichtheid polyetheen

C2C = Cradle-to-cradle

GC = Groene chemie

PS = Polystyreen

LDPE = Lage dichtheid polyetheen

PLA = polymelkzuur

PBAT = Polybutyraat (adipaat tereftalaat)

PBS = Polybutyleensuccinaat

PHA = Polyhydroxyalkanoaat

PE = Polyetheen

PVC = Polyvinylchloride

CC = circulaire chemie

Lijst van figuren

Figuur 1. Take-make-waste principe ⁶	11
Figuur 2. Mechanisch recyclageproces van bijvoorbeeld PET-flessen ¹⁴	14
Figuur 3. Eco-efficiënt vs eco-effectief ⁸	17
Figuur 4. Het verschil tussen biologische en technische cyclus in het cradle-to-cradle principe ⁸	19
Figuur 5. Wegwerpservies van suikerriet ²⁴ Figuur 6. Suikerriet ²⁵	20
Figuur 7. Cradle-to-cradle logo ²⁶	21
Figuur 8. Schoonmaakproducten met C2C-certificering ²⁷ Figuur 9. Slippers van Lidl met C2C-certificering ²⁸	22
Figuur 10. Herman Miller stoel ³³	22
Figuur 11. Productie styreen uit etheen en benzeen ¹⁷	23
Figuur 12. Productie styreen uit toluen en methanol ¹⁷	24
Figuur 13. Reactie tussen azide en alkyn ¹⁷	24
Figuur 14. Reactie om R ¹ – R ² verbinding te maken ³⁷	24
Figuur 15. Afvalzakjes van zetmeelblends ⁴⁰	25
Figuur 16. Polymerisatie van etheen ⁴²	26
Figuur 17. Overzicht productie van PE uit suiker ⁴⁵	26
Figuur 18. Twaalf principes van circulaire chemie ⁴⁶	30
Figuur 19. ChemCycling TM -cyclus ⁴⁷	31
Figuur 20. Pyrolyse-olie ⁴⁹ Figuur 21. Zott mozzarella verpakking ⁵⁰	32
Figuur 22. Productie van hydrochinon ¹⁷	32
Figuur 23. Nieuw proces voor productie van hydrochinon ¹⁷	33
Figuur 24. Ladder van circulariteit ⁵⁵	36

Lijst van tabellen

Tabel 1. Type onderwijsdoelen voor SO 3e graad ¹	6
Tabel 2. Onderwijsdoelen ⁵	8
Tabel 3. Twaalf principes van groene chemie ³⁴	28
Tabel 4. Twaalf principes voor circulaire chemie ⁴⁶	38

Abstract

In het academiejaar 2023-2024 zal een modernisering plaatsvinden van de derde graad secundair onderwijs. Bij deze modernisering worden nieuwe onderwijsdoelen geformuleerd. In de derde graad secundair onderwijs gaat dit vooral over eindtermen. Vele van deze eindtermen werden al behandeld in vorige versies van de onderwijsdoelen, ook zijn er enkele nieuwe eindtermen. Voor deze nieuwe eindtermen is nog geen educatief lesmateriaal beschikbaar. De leerkrachten zijn ook nog niet vertrouwd met deze onderwerpen.

Het doel van deze thesis is om één van de nieuwe eindtermen te bespreken. De eindterm die wordt besproken gaat over duurzame circulaire chemie. In deze eindterm komen veel verschillende onderdelen van circulaire chemie aan bod. De omvang van deze thesis zou te groot worden als deze allemaal zouden worden besproken. We beperken ons tot lineaire economie, circulaire economie en de daarbij horende strategieën voor een duurzame chemische industrie respectievelijk groene chemie en circulaire chemie. De onderwerpen worden besproken op een duidelijke en verstaanbare manier samen met verschillende voorbeelden. Deze thesis dient als een inleidend werk voor leerkrachten om hen vertrouwd te maken met dit onderwerp.

Aangezien de eindterm over duurzame circulaire chemie heel ruim omschreven is, kan deze thesis dienen als basiswerk en kan de eindterm in andere thesissen verder uitgewerkt worden.

Inleiding

In Vlaanderen stelt de overheid onderwijsdoelen op om kwaliteitsvol onderwijs te garanderen. Algemeen omvatten deze onderwijsdoelen basiscompetenties, eindtermen, eindtermen basisgeletterdheid, ontwikkelingsdoelen, cesuurdoelen, specifieke eindtermen, uitbreidingsdoelen en beroepskwalificaties die gelden in het basisonderwijs, secundair onderwijs, deeltijds kunstonderwijs, volwassenenonderwijs en/of hoger onderwijs.¹ In 2019-2020 werd in het eerste jaar van de eerste graad van het secundair onderwijs een modernisering van de onderwijsdoelen ingevoerd. De verdere modernisering van het secundair onderwijs wordt vanaf dan progressief – leerjaar na leerjaar – verder ingevoerd.² Uiteindelijk zal in 2023-2024 de modernisering van het eerste jaar van de derde graad plaatsvinden en in 2024-2025 deze van het tweede jaar van de derde graad.

We beperken ons in deze thesis tot de 3^e graad van het secundair onderwijs (SO). Na de modernisering zijn er in de 3^e graad SO drie verschillende onderwijsfinaliteiten te onderscheiden, namelijk de doorstroomfinaliteit, de dubbele finaliteit en de arbeidsfinaliteit. Men spreekt dus niet meer van aso, tso, kso en bso. De onderwijsdoelen die relevant zijn voor de 3^e graad zijn eindtermen, eindtermen attitude, specifieke eindtermen en beroepskwalificaties. In tabel 1 zijn de verschillende types onderwijsdoelen opgelijst met bijhorende finaliteiten waarin deze onderwijsdoelen terug te vinden zijn. Een overzicht van alle onderwijsdoelen is terug te vinden op onderwijsdoelen.be.³

Tabel 1. Type onderwijsdoelen voor SO 3e graad¹

Type onderwijsdoel	Statuut	Onderwijsfinaliteit
Eindterm	Te bereiken bij een leerlingengroep	Doorstroomfinaliteit Dubbele finaliteit Arbeidsfinaliteit
Eindterm, attitude	Na te streven	Doorstroomfinaliteit Dubbele finaliteit Arbeidsfinaliteit
Specifieke eindterm	Te bereiken bij een leerlingengroep	Doorstroomfinaliteit Dubbele finaliteit
Beroepskwalificatie	Te bereiken bij een leerlingengroep	Dubbele finaliteit Arbeidsfinaliteit

De onderwijsdoelen worden ingedeeld in 16 sleutelcompetenties (bijlage 1: sleutelcompetenties). Er wordt geen onderverdeling in vakken gemaakt. Eén van de sleutelcompetenties is duurzaamheid. In deze sleutelcompetentie komt een eindterm aan bod die vóór de modernisering nog niet in de onderwijsdoelen te vinden was. De eindterm luidt als volgt:

De leerlingen beargumenteren het belang van duurzame circulaire chemie binnen het duurzaamheidsvraagstuk.

Deze eindterm komt aan bod in zowel de doorstroomfinaliteit, dubbele finaliteit als arbeidsfinaliteit. Een overzicht van de inhoud van deze eindterm is terug vinden in tabel 2 voor de drie onderwijsfinaliteiten. De eindterm wordt voor de drie finaliteiten naast elkaar weergegeven en wordt omschreven met inbegrip van kennis, context en dimensie.

In de eindterm wordt de kennis geëxpliciteerd die nodig is voor het behalen van deze eindterm. De kenniselementen worden ingedeeld volgens de taxonomie van Bloom.⁴ De categorieën die bij de taxonomie van Bloom horen zijn feitenkennis, conceptuele kennis, procedurele kennis en metacognitieve kennis. Feitenkennis verwijst naar termen en begrippen. Conceptuele kennis omvat het begrijpen en inzicht hebben in classificaties, principes, theorieën en modellen. Procedurele kennis is de kennis van technieken, methoden en algoritmes. Metacognitieve kennis komt niet aan bod in deze eindterm. De eindterm moet gerealiseerd worden door gebruik te maken van context. De dimensie van de eindterm behoort tot de cognitieve dimensie met beheersingsniveau *evalueren*.⁵

Tabel 2. Onderwijsdoelen⁵

Aso, kso, tso > Finaliteit doorstroom > Duurzaamheid > Eindtermen	Kso, tso > Dubbele finaliteit > Duurzaamheid > Eindtermen	Bso > Finaliteit arbeidsmarkt > Duurzaamheid > Eindtermen
Inzicht ontwikkelen in de verschijningsvormen van energie, de wisselwerking tussen materie onderling en met energie alsook de gevolgen ervan.	Inzicht ontwikkelen in de verschijningsvormen van energie, de wisselwerking tussen materie onderling en met energie alsook de gevolgen ervan.	Inzicht ontwikkelen in de verschijningsvormen van energie, de wisselwerking tussen materie onderling en met energie alsook de gevolgen ervan.
6.20 De leerlingen beargumenteren het belang van duurzame circulaire chemie binnen het duurzaamheidsvraagstuk. <u>Met inbegrip van kennis</u> *Feitenkennis - Circulaire chemie *Conceptuele kennis - Duurzame chemie, circulaire chemie > Take-make-waste principe, cradle to cradle principe > Energie- en grondstoffengebruik > CO₂-neutrale productie	6.10 De leerlingen beargumenteren het belang van duurzame circulaire chemie binnen het duurzaamheidsvraagstuk. <u>Met inbegrip van kennis</u> *Feitenkennis - Namen van relevante grondstoffen voor productieprocessen *Conceptuele kennis - Duurzame chemie, circulaire chemie > Take-make-waste principe, cradle to cradle principe > Energie- en grondstoffengebruik > CO₂- neutrale productie	6.10 De leerlingen beargumenteren het belang van duurzame circulaire chemie binnen het duurzaamheidsvraagstuk. <u>Met inbegrip van kennis</u> *Feitenkennis - Namen van relevante grondstoffen voor productieprocessen *Conceptuele kennis - Duurzame energie- en grondstoffengebruik - Take-make-waste principe, cradle to cradle principe - CO₂- neutrale productie

> Innovatieve materialen en technieken - Herkomst, toepassingen, eigenschappen van grondstoffen in functie van recycleerbaarheid *Procedurele kennis - Systeemdenken <u>Met inbegrip van context</u> * De eindterm wordt met context gerealiseerd. <u>Met inbegrip van dimensies eindterm</u> Cognitieve dimensie: beheersingsniveau evalueren	> Innovatieve materialen en technieken - Herkomst, toepassingen, eigenschappen van grondstoffen in functie van recycleerbaarheid *Procedurele kennis - Systeemdenken <u>Met inbegrip van context</u> * De eindterm wordt met context gerealiseerd. <u>Met inbegrip van dimensies eindterm</u> Cognitieve dimensie: beheersingsniveau evalueren	- Herkomst, toepassingen, eigenschappen van grondstoffen in functie van recycleerbaarheid *Procedurele kennis - Systeemdenken <u>Met inbegrip van context</u> * De eindterm wordt met context gerealiseerd. <u>Met inbegrip van dimensies eindterm</u> Cognitieve dimensie: beheersingsniveau evalueren
---	---	--

Onderzoeksdesign

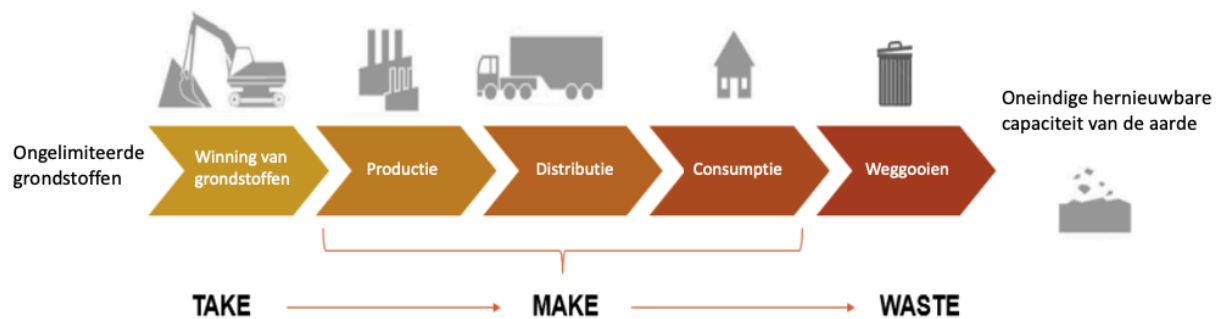
Het belang van circulaire chemie kwam als eindterm nog niet aan bod in de onderwijsdoelen vóór de modernisering. Hierdoor is de inhoud nog niet behandeld in educatief lesmateriaal. Het onderwerp “circulaire chemie” is een recent concept en is dus ook nog niet gekend bij de meeste leerkrachten. Het doel van deze thesis is om de inhoud van de eindterm te omschrijven en op een begrijpbare manier uit te leggen. Aangezien de eindterm heel ruim omschreven is, zullen we ons vooral focussen op het take-make-waste principe, cradle-to cradle principe en circulaire chemie.

Het opstellen van deze thesis, die een leidraad dient te worden voor leerkrachten in de derde graad, begon met opzoekingswerk rond de eindterm. Goede, recente bronnen werden verzameld voor de literatuurstudie over circulaire chemie. De bevindingen van deze studie werden in onderstaande tekst beschreven en samengevat. Relevante voorbeelden werden toegevoegd ter vervollediging en als verduidelijking voor de leerkrachten.

Inhoud eindterm

Inleiding: Verschillende economische modellen

Ons huidige economisch systeem is een lineair model van productie en consumptie. Producten worden geproduceerd vertrekkende vanuit grondstoffen, verkocht, gebruikt en weggegooid op stortplaatsen of verbrand. Een lineair economisch model is gebaseerd op het 'take-make-waste' patroon (Fig. 1). Een dergelijk economisch model kan enkel blijven bestaan als er ongelimiteerde hoeveelheden grondstoffen aanwezig zijn en als de aarde een oneindig hernieuwbare capaciteit heeft. Dit is natuurlijk niet het geval waardoor er nood is aan een ander, meer duurzaam economisch model.⁶



Figuur 1. Take-make-waste principe⁶

Dit duurzaam economisch model streeft naar een circulaire economie. Een circulaire economie is een economie waar geen afval bestaat. Er zijn heel wat definities te vinden van circulaire economie. Kirchherr et al.⁷ hebben een onderzoek uitgevoerd waarin 114 verschillende definities van circulaire economie werden vergeleken. Op basis hiervan hebben ze één allesomvattende definitie opgesteld. Deze definitie luidt als volgt:

"A circular economy describes an economic system that is based on business models which replace the 'end-of-life' concept with reducing, alternatively reusing, recycling and recovering materials in production/distribution and consumption processes, thus operating at the micro level (products, companies, consumers), meso level (eco-industrial parks) and macro level (city, region, nation and beyond), with the aim to accomplish sustainable development, which implies creating environmental quality, economic prosperity and social equity, to the benefit of current and future generations."

Een circulaire economie beschrijft dus een economisch systeem dat streeft naar circulariteit in tegenstelling tot een lineaire economie waar een end-of-life concept wordt gehanteerd. In plaats van het end-of-life concept gebruikt men bedrijfsmodellen die streven naar het reduceren, hergebruiken, recycleren en terugwinnen van materialen. Een circulaire economie situeert zich op verschillende niveaus. Het eerste niveau is het micro-level, dit niveau omvat de producten, bedrijven en consumenten. Het tweede niveau is het meso-level, dit niveau omvat industrie zones. Het laatste niveau is het macro-level, dit niveau omvat de stad, de regio, het land en alles op nog grotere schaal. Het doel van deze circulaire economie is het creëren van een duurzame ontwikkeling op vlak van milieu, economische groei en sociale gelijkheid voor de huidige en volgende generaties.

De definitie van Kircher et al. is te uitgebreid binnen het doel van de eindterm die hier wordt behandeld. Daarom zullen we ons binnen deze thesis focussen op het micro-level waarbij we circulaire chemie zullen bespreken binnen een circulaire economie.

Lineaire economie (Take-make-waste principe)

Zoals reeds vermeld wordt een lineaire economie gekenmerkt door het take-make-waste principe, een andere benaming hiervoor is cradle-to-grave, en kan dit economisch model enkel blijven bestaan als er ongelimiteerde hoeveelheden grondstoffen aanwezig zijn en als de aarde een oneindig hernieuwbare capaciteit heeft. Door de toenemende wereldbevolking en de daarbij horende toename in grondstofgebruik en negatieve milieu-impact, is het duidelijk dat dit economisch model geen duurzame aanpak is voor de toekomst.⁸

Het lineaire model heeft zowel ecologische als economische nadelen. Het *ecologische nadeel* van een lineaire economie is dat de productie van goederen ten koste gaat van de productiviteit van ecosystemen. Elk van de drie stappen bij een take-make-waste mentaliteit heeft een invloed op de ecologische systemen.⁹

- De winning van grondstoffen leidt tot hoog energie- en waterverbruik, de uitstoot van giftige bestanddelen en de verstoring van natuurlijke ecosystemen zoals bossen en meren.
- De productie heeft een hoog energie- en waterverbruik en toxische uitstoot tot gevolg.
- Het afval is verantwoordelijk voor de verstoring van natuurlijke gebieden en toxische uitstoot.

Een voorbeeld van dit laatste is de plastic soep. Wereldwijd wordt er zo'n 300 miljoen ton plastic per jaar geproduceerd. De meeste plasticen voorwerpen of materialen worden maar voor een korte periode gebruikt waardoor ze snel worden weggegooid. Een groot deel hiervan komt in de zee terecht met negatieve gevolgen voor het leven in de oceanen, zoals verstikking.⁹

De aanvoer van materialen in een lineaire economie heeft ook negatieve gevolgen voor de economie. Dit komt doordat prijzen van grondstoffen kunnen variëren, door schaarste aan materialen, politieke afhankelijkheid van bepaalde materialen en toenemende vraag.⁹

Bij het lineaire economisch model komen niet alle geproduceerde materialen uiteindelijk terecht in de natuur. Als we ons afval verzamelen en weggooien op een correcte manier dan kan het afval worden verbrand of gerecycleerd. Het recyclen is echter niet altijd een ideale oplossing, de producten zijn niet ontworpen om te recyclen waardoor het gerecycleerde

product een lagere waarde heeft dan het originele product. Dit wordt ook wel 'downcycling' genoemd.¹⁰

We nemen als voorbeeld om dit te illustreren kunststoffen. Hierin kunnen we een onderscheid maken tussen drie soorten kunststoffen: thermoplasten, thermoharders en elastomeren. Thermoplasten zijn plastische materialen die bij verwarmen vervormen en zelfs vloeibaar worden. Bij afkoeling wordt het materiaal terug stevig en hard. Thermoharders worden niet zachter bij verwarmen, ze blijven hard en star. Elastomeren kunnen zich zowel als thermoplasten als thermoharders gedragen afhankelijk van hun structuur.¹¹

Niet alle kunststoffen kunnen we recycleren, enkel de thermoplasten kunnen worden gerecycleerd. Voorbeelden van thermoplasten zijn plastic flessen, flacons,...¹² Deze materialen kunnen mechanisch worden gerecycleerd (Fig. 2). Het recyclageproces omvat 3 stappen:¹³

1. De plastic flessen worden in sorteercentra automatisch of met de hand uitgesorteerd.
2. Elke plastic fles wordt gewassen en daarna vernalen tot schilfers of verwerkt tot korrels.
3. Via diverse technieken worden de schilfers en korrels gesmolten en omgevormd, om er dan nieuwe producten mee te maken.



Figuur 2. Mechanisch recyclageproces van bijvoorbeeld PET-flessen¹⁴

De toepassingen waarvoor de gerecycleerde voorwerpen kunnen worden gebruikt, hangen af van het originele materiaal. Doorzichtige plastic flessen uit PET (PolyEthyleenTereftalaat) kunnen worden gerecycleerd tot nieuwe flessen, textielvezels, tapijten, vulling voor matrassen, jassen en slaapzakken,... Ondoorzichtige plastic flacons uit HDPE (HogeDensiteitPolyEthyleen) worden gerecycleerd tot opbergbakken, manden, kisten en rekken, bidons, leidingen, kabelgoten en buizen, pallets,... Het recycleren van PET-flessen en HDPE-flacons is een goede zaak, zowel op economisch als ecologisch vlak: er wordt minder energie verbruikt dan bij de productie van nieuw plastic en bovendien zijn er minder grondstoffen nodig. Het eindresultaat van deze recyclage is een kwaliteitsvol product dat later opnieuw kan worden gerecycleerd. In realiteit is dit jammer genoeg niet altijd zo. Om kwaliteitsvolle voorwerpen te bekomen moet men vertrekken vanuit zuivere PET-flessen en HDPE-flacons. In de praktijk worden PET-flessen soms bedrukt met een folie die bestaat uit een andere soort plastic dan PET waardoor deze flessen moeilijk te sorteren zijn. Vele andere plastic verpakkingen bestaan uit dunne laagjes van verschillende plasticsoorten, zogenaamde multilayers. Van deze plastic mengsels kunnen geen hoogwaardige materialen meer worden gemaakt. Deze plastics kunnen wel nog worden gerecycleerd tot tuinbanken, verkeerspaaltjes,.. die echter op hun beurt *niet* meer recycleerbaar zijn. Dit is een voorbeeld van zgn. *downcycling*.^{10,13,15,16}

Het is belangrijk te beseffen dat, ook binnen het lineaire model van take-make-waste, ingezet wordt op duurzaamheid. Dit gebeurt door meer en meer te streven naar meer eco-efficiëntie bij de lineaire flow van materialen doorheen een industrieel proces. Eco-efficiënte strategieën trachten de ecologische impact van bedrijfsactiviteiten te beperken. Het doel is om meer te produceren met minder grondstoffen en om minder afval te produceren of afval met een lagere toxiciteit. Op lange termijn zal een eco-efficiënte aanpak echter niet voldoende zijn voor een duurzame oplossing.

Ten eerste behandelen eco-efficiënte strategieën eerder de problemen in plaats van de bron van de problemen aan te pakken. Processen moeten dus niet volledig worden aangepast om meer eco-efficiënt te zijn: als een proces wordt geoptimaliseerd op een manier waarop het minder energie verbruikt voor de productie van dezelfde hoeveelheid van een bepaald product, is dit op korte termijn een eco-efficiënte verbetering. Wanneer echter op lange termijn de vraag naar het gevormde product toeneemt (bijvoorbeeld als gevolg van

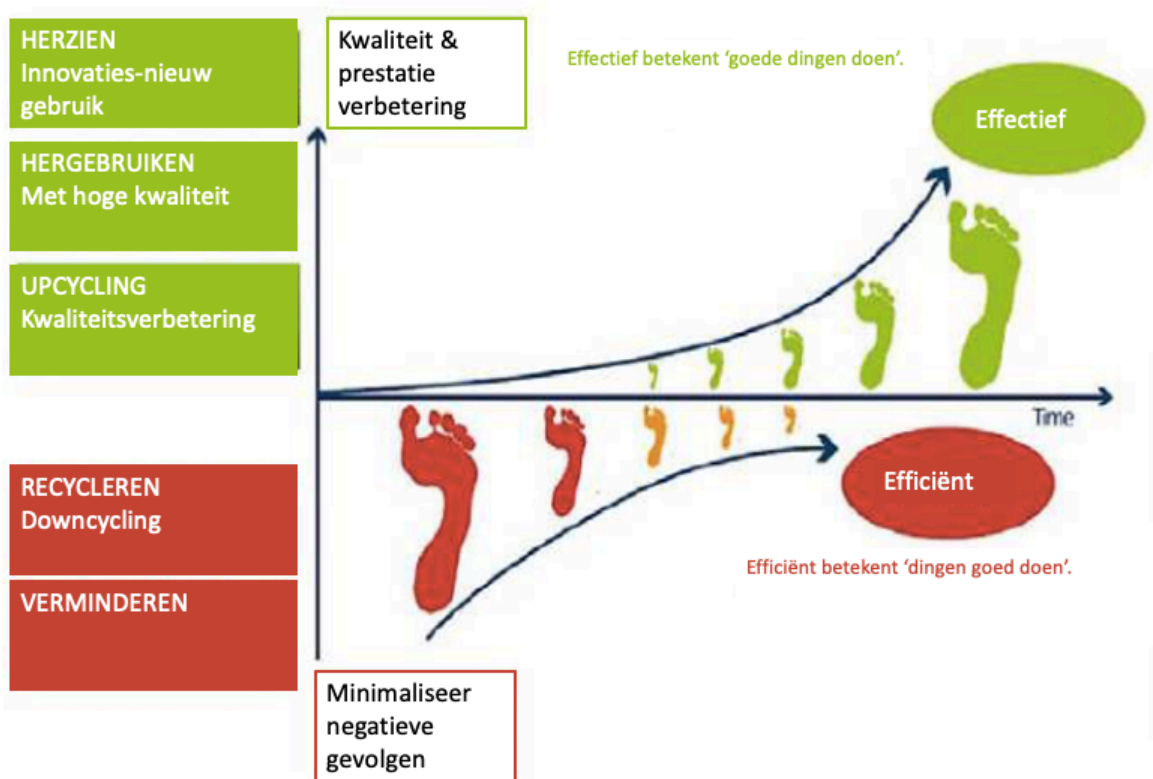
economische groei), zal er uiteindelijk meer worden geproduceerd en dus ook meer energie worden verbruikt. De absolute hoeveelheid energie die verbruikt wordt, is dus doorheen deze periode gestegen in plaats van gedaald ondanks de verbeteringen. De absolute hoeveelheid grondstof die nodig is voor het productieproces is dus doorheen deze periode gestegen in plaats van gedaald ondanks de optimalisatie. De absolute hoeveelheid grondstof die onttrokken wordt uit de omgeving en het afval en de vervuiling die in de omgeving terecht komen blijven dus toenemen in de tijd.

Ten tweede is eco-efficiëntie in strijd met de lange termijn visie van economische groei en innovatie. Het ultieme doel van eco-efficiënte processen is om geen afval uit te stoten, geen grondstoffen te verbruiken en geen negatieve impact te hebben op het milieu. In een groeiende economie is dit een onhaalbaar doel.

Als laatste is de eco-efficiënte aanpak niet 100% effectief om het toxiciteitsprobleem aan te pakken. Ook al wordt de uitstoot van giftige stoffen geminimaliseerd, er is nog steeds een uitstoot die een negatieve impact heeft op mens en omgeving. Accumulatie van deze uitstoot heeft nog steeds dramatische gevolgen voor gezondheid en milieu. ^{8,10}

Circulaire economie (Cradle-to-cradle principe)

In de literatuur gebruikt men de term 'eco-efficiënt' om een lineaire aanpak aan te duiden en 'eco-effectief' om te verwijzen naar een circulaire aanpak. Bij een eco-effectieve strategie verschuift de focus van een vermindering van de negatieve gevolgen naar een toename van de positieve invloed. Een eco-effectieve aanpak werkt aan de goede dingen, de correcte producten en diensten in tegenstelling tot de eco-efficiënte aanpak die er naar streeft om de slechte dingen minder slecht te maken. Dit kan worden geïllustreerd met volgende figuur (Fig. 3).⁸



Figuur 3. Eco-efficiënt vs eco-effectief⁸

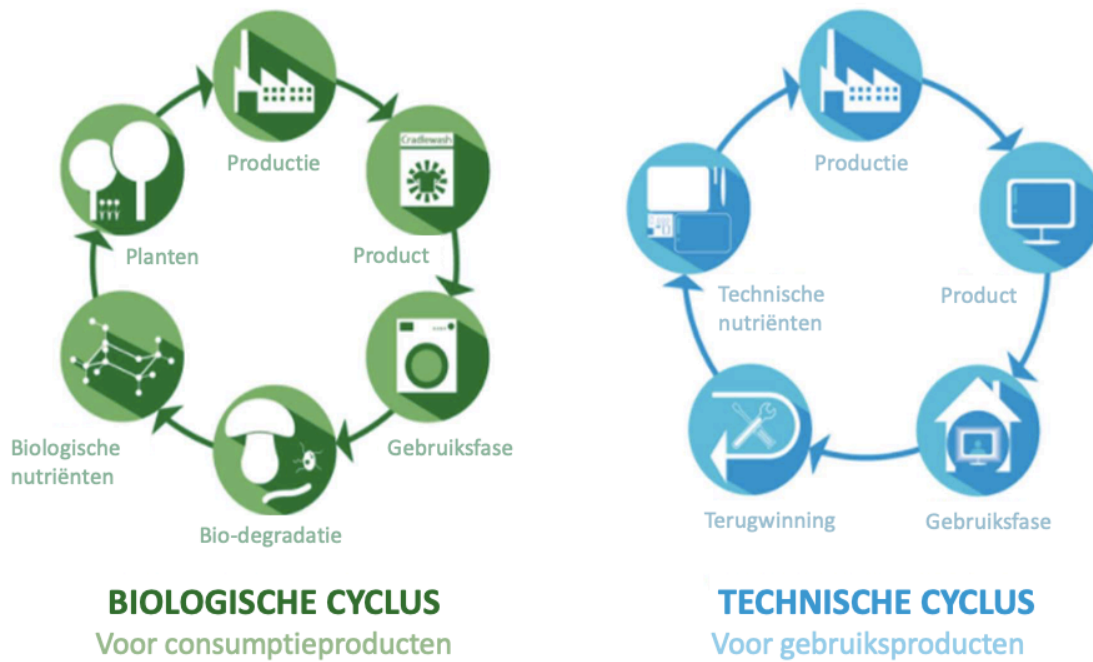
Een eco-efficiënte strategie zal bijvoorbeeld proberen om de toxiciteit van producten te verminderen door gekende toxische producten te vervangen.⁸

Bij de productie van styreen vertrekt men van benzeen en etheen. Benzeen is kankerverwekkend. Bij een eco-efficiënte aanpak vervangt men het proces dat benzeen nodig heeft door een proces dat styreen maakt uit tolueen en methanol waardoor de toxiciteit van de reactie sterk daalt.¹⁷

Een eco-effectieve aanpak streeft ernaar dat processen en materialen gedurende hun hele levensloop een positief effect hebben op de omgeving, ook op lange termijn. Het doel is niet om een cradle-to-grave flow te minimaliseren maar om een cyclisch, cradle-to-cradle (C2C) 'metabolisme' te genereren. De producten mogen geen waarde verliezen bij het doorlopen van een cyclus.^{8,18}

De Duitse chemicus Michael Braungart en de Amerikaanse architect William McDonough introduceerden een nieuwe ontwerpfilosofie die gebaseerd is op de overgang naar een eco-effectieve aanpak, namelijk cradle-to-cradle. In hun boek, "Cradle to Cradle: remaking the way we make things" beschreven ze drie ontwerp-principes die de basis vormen voor een overgang van een eco-efficiënte naar een eco-effectieve strategie. Deze principes zijn gebaseerd op de natuur en de biologische metabolismen.⁸

Het eerste principe is '**afval is voedsel**': alles kan weer een voedingsstof zijn voor iets anders. Bij het take-make-waste principe leidt het recyclen van producten vooral tot downcycling: het oorspronkelijke materiaal wordt omgevormd naar een toepassing met een lagere waarde. In tegenstelling hiermee mag de grondstof bij het cradle-to-cradle principe geen waarde verliezen bij hergebruik in een nieuwe toepassing. We spreken hier over 'upcycling': het oorspronkelijk product wordt in de nieuwe toepassing even goed of zelfs beter ingezet of verwerkt. Bij dit principe zijn er twee cycli te onderscheiden waarin materialen kunnen circuleren: het biologisch metabolisme en het technisch metabolisme (Fig. 4).^{10,19-21}



Figuur 4. Het verschil tussen biologische en technische cyclus in het cradle-to-cradle principe⁸

De biologische cyclus

Materialen die de biologische cyclus doorlopen worden *consumptieproducten* of 'Products of Consumption' genoemd. Consumptieproducten, zoals bijvoorbeeld schoonmaakproducten, shampoos, verpakkingen, rietjes,..., die volgens het C2C principe zijn ontworpen kunnen veilig in de natuur worden weggegooid.²² De consumptieproducten zelf of het resultaat van biodegradatie van de consumptieproducten zijn zogenaamde biologische nutriënten, ze voeden de biosfeer. Biologische nutriënten zijn grondstoffen die door levende organismen of cellen gebruikt worden bij processen zoals groei, celdeling en andere complexe fenomenen. Biologische voedingstoffen zijn vaak koolstof-gebaseerde componenten.²²

Een voorbeeld van consumptiegoed dat in de biologische cyclus kan circuleren is wegwerpservies gemaakt uit suikerriet. Wegwerpservies van suikerriet wordt gemaakt vertrekkende van restproducten uit de suikerindustrie. Suikerrietstengels worden na het uitpersen normaal verwerkt als afval of verbrand. Bij de productie van het wegwerpservies worden deze stengels gesneden en tot pulp gemalen. Deze pulp wordt samen met water in een vorm geperst tot borden, soepkommen,... Het servies is na gebruik 100% composteerbaar en zorgt hiermee weer voor voedingsstoffen voor planten en gewassen, het zijn dus biologische nutriënten. Suikerriet is bovendien een snelgroeiend gras, waardoor het een

duurzame grondstof is. De materialen gemaakt van suikerriet zijn zeer stevig. Ze zijn daarom gemakkelijker in gebruik dan de papieren en plastic wegwerpserviezen. Het materiaal is hitte, olie-, vocht- en vriesbestendig, wat het tot een zeer veelzijdig product maakt. De materialen kunnen zelfs verhit worden in de oven tot 200°C en in de magnetron tot 750Watt.²³ Voor minder dan 5 eurocent kan je al een bord kopen gemaakt van suikerriet.²⁴



Figuur 5. Wegwerpservies van suikerriet²⁴



Figuur 6. Suikerriet²⁵

De technische cyclus

Producten die de technische cyclus doorlopen worden *gebruiksproducten* of ‘products of service’ genoemd. Het product wordt gebruikt door de klant, maar officieel blijft de producent eigenaar van de waardevolle materialen en kan hij deze materialen voortdurend hergebruiken. De klant geniet van de diensten van het product en moet zich niets aantrekken van het verwerken van het materiaal.²² Een voorbeeld van een product binnen de technologische cyclus is een wasmachine. De klant kan dit product huren/kopen en een bepaalde periode gebruiken. Wanneer de wasmachine kapot is, kan de producent het terugnemen om de waardevolle onderdelen te hergebruiken. De materialen die in deze producten gebruikt worden kunnen schadelijk zijn voor de omgeving en ze worden daarom best niet weggegooid in de natuur. We beschouwen deze materialen als technische nutriënten. Ze blijven in de technosfeer en worden op een kwalitatief hoogwaardig niveau opnieuw gebruikt. Andere voorbeelden van dergelijke gebruiksproducten zijn auto’s, TV-toestellen,...^{10,19–21}

Het tweede basisprincipe van het Cradle-to-cradle design is het **gebruik van beschikbare zonnekracht**. Cradle-to-cradle vertrouwt op duurzame energiebronnen die, al dan niet rechtstreeks, van de zon komen zoals zonne-energie, windenergie, waterkracht en verschillende hernieuwbare bronnen op biobasis.²⁰

Het derde en laatste basisprincipe van het Cradle-to-cradle design is **respect voor de diversiteit** waarmee zowel biodiversiteit, culturele diversiteit als diversiteit van ideeën en vernieuwingen passend bij de lokale omstandigheden bedoeld worden. Cradle-to-cradle moedigt aan om systemen en producten te ontwikkelen die voor economie, maatschappij en milieu bevorderlijk zijn.²⁰

Producten die geproduceerd zijn volgens het cradle-to-cradle principe kunnen een C2C-certificering krijgen, dit is een internationaal keurmerk dat vijf niveaus kent: basis, brons, zilver, goud en platina. Producten die hiervoor in aanmerking willen komen, worden gecontroleerd op samenstelling van de materialen, mogelijkheden tot hergebruik van de materialen, gebruik van hernieuwbare energie, duurzaam waterbeheer en sociale rechtvaardigheid. Het C2C-logo is een blauwe en een groene C in een infinity-vorm (Fig. 7 en Fig. 8). Dit logo vindt men op producten van verschillende categorieën zoals bouwmaterialen, textiel, cosmetica, papier, verpakkingen, schoonmaakproducten,....^{21,26}



Figuur 7. Cradle-to-cradle logo²⁶



Figuur 8. Schoonmaakproducten met C2C-certificering²⁷ Figuur 9. Slippers van Lidl met C2C-certificering²⁸

Het bekende kledingmerk C&A heeft het eerste C2C Certified™ T-shirt gecreëerd. In 2018 heeft dit kledingmerk het aantal C2C-producten verhoogd met een goud level voor jeans en later tot het platinum level met jeansstof. De C2C Certified™-producten worden beschouwd als biologische voedingsstoffen, ontworpen om te worden hergebruikt of gerecycleerd tot nieuwe producten.^{29,30}

Een voorbeeld van een product uit de technosfeer is Herman Miller's Mirra stoel (Fig. 10). Deze stoel is zo ontworpen dat hij weer compleet uit elkaar kan worden gehaald, waardoor de verschillende onderdelen kunnen worden herbruikt in kwalitatief hoogwaardige toepassingen.^{20,31,32}



Mirra 2 Herman Miller, bureaustoel cradle to cradle



Mirra 2 Herman Miller, bureaustoel cradle to cradle

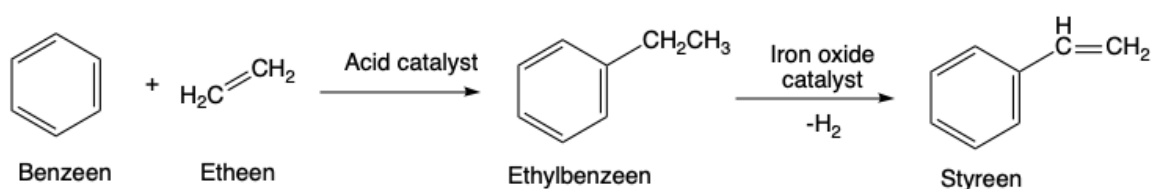
Figuur 10. Herman Miller stoel³³

Chemie binnen de verschillende economische modellen

Lineaire chemie

De chemische industrie binnen het lineair economisch model streeft naar een duurzame, meer eco-efficiënte aanpak. Groene chemie (green chemistry, GC) is een visie om een meer duurzame economie te realiseren waarbij men bij de ontwikkeling van chemische producten en processen er naar streeft om de hoeveelheid schadelijke grondstoffen, reagentia, solventen en reactieproducten te verminderen of zelfs te elimineren.^{34,35} Om dit te realiseren zijn 12 principes opgesteld die moeten helpen om chemische reacties in functie van lineaire productieprocessen te optimaliseren (Tabel 3. Twaalf principes voor groene chemie). Deze principes worden gezien als een referentiekader voor alle scheikundigen wanneer ze nieuwe chemicaliën, experimenten of procedures ontwikkelen.³⁵

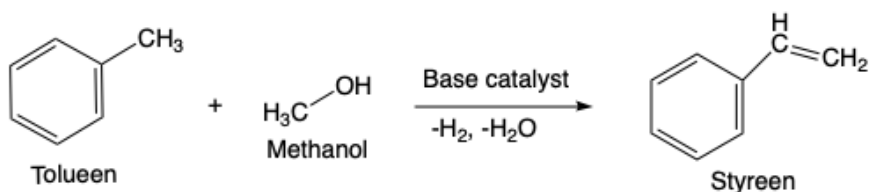
Een eerste voorbeeld van een optimalisatie door een principe van groene chemie toe te passen hebben we hierboven al gezien bij de productie van styreen. Styreen is een belangrijke bouwsteen voor verschillende polymeren, zoals bijvoorbeeld polystyreen (PS). Voor vele jaren werd styreen geproduceerd in een twee-staps proces: benzeen en etheen reageren met vorming van ethylbenzeen, gevolgd door het mengen van ethylbenzeen met stoom op hoge temperatuur en een ijzeroxide katalysator met vorming van styreen.¹⁷



Figuur 11. Productie van styreen uit etheen en benzeen¹⁷

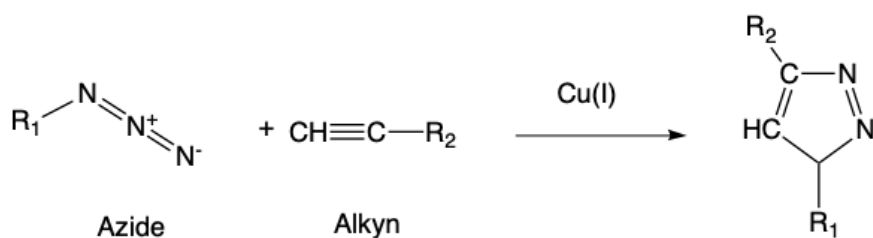
Benzeen is een kankerverwekkende stof. GC3 luidt als volgt: men moet syntheseroutes ontwerpen die weinig of geen gebruik maken van stoffen die een gevaar vormen voor de mens of omgeving. Recent is een proces ontwikkeld waarbij men styreen vormt in een één-stapsreactie: toluen reageert met methanol bij 425°C in aanwezigheid van een katalysator. De reactie bevat geen carcinogene stoffen meer (GC3) en het aantal reactiestappen is beperkt gehouden (GC8). Deze reactie wijst ook op het belang van het vinden van een goede

katalysator (GC9). De katalysator maakt het mogelijk om de reactie in één stap uit te voeren waarbij er geen extra reagentia nodig zijn.¹⁷



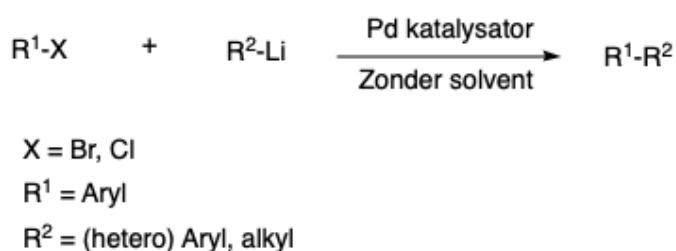
Figuur 12. Productie van styreen uit toluëen en methanol¹⁷

Een voorbeeld van atoom economie (GC2) is een reactie waarbij, bij kamertemperatuur en in de aanwezigheid van een koper(I) katalysator, een organisch azide en een alkyn één reactieproduct vormen. Deze reactie wordt ook wel een klik-reactie genoemd. De opbrengst van deze reactie is zo goed als 100% en er is geen vorming van bijproducten.¹⁷



Figuur 13. Reactie tussen azide en alkyn¹⁷

GC5 zegt dat men het gebruik van solventen moet vermijden aangezien dit voor meer afvalproducten zorgt wegens zijreacties. In de organische chemie wordt er veel gebruik gemaakt van solventen, reacties vinden vaak plaats in organische oplosmiddelen zoals koolwaterstoffen. Ben Feringa heeft samen met zijn collega's een groenere manier omschreven om koolstofverbindingen te maken door gebruik te maken van organolijthiumverbindingen en een katalysator van palladium.^{36,37}



Figuur 14. Reactie om R¹ – R² verbinding te maken³⁷

Een voorbeeld van een toepassing van GC10, ontwerp chemicaliën en producten die afbreekbaar zijn na gebruik, is het vervangen van plastic voorwerpen die niet biologisch afbreekbaar zijn door plastic voorwerpen die wel biologisch afbreekbaar zijn. De meeste vuilniszakken of afvalzakken zijn vervaardigd uit LDPE (Lage Densiteit PolyEtheen).³⁸ Deze LDPE-materialen zijn niet biodegradeerbaar en mogen dus niet zomaar in de natuur worden weggegooid. Door deze vuilniszakken te vervangen door biodegradeerbare vuilniszakken beperken we het plastic afval. Biodegradeerbare vuilniszakken kunnen bijvoorbeeld gemaakt worden uit zetmeelblends, dit zijn complexe blends van zetmeel met onder andere composteerbare polyesters zoals PLA (polymelkzuur), Ecoflex (PBAT, polybutyraat adipaat tereftalaat), PBS (polybutyleensuccinaat) en PHA's (polyhydroxyalkanoaat). Deze afvalzakjes kunnen worden gebruikt om GFT-afval in te verzamelen, daarna kunnen de afvalzakjes mee op de composthoop worden gegooid.^{39,40}

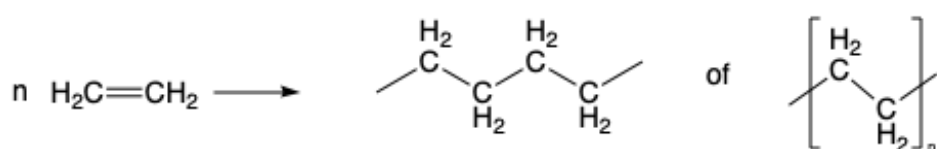


Figuur 15. Afvalzakjes van zetmeelblends⁴⁰

Groene chemie is een grote vooruitgang om een meer duurzame chemische industrie te creëren. Toch heeft groene chemie enkele tekortkomingen, een voorbeeld hiervan is terug te vinden in de kunststofsector. Bij de productie van kunststoffen gebruikte men vroeger en ook nu nog niet-hernieuwbare grondstoffen zoals fossiele brandstoffen, bijvoorbeeld aardolie. Ruwe olie, aardolie, is een complex mengsel van duizenden verbindingen dat eerst moet worden verwerkt voordat het kan worden gebruikt. De productie van kunststof begint met de destillatie van ruwe olie in een olieraffinaderij. Hierbij wordt de zware ruwe olie in groepen van lichtere componenten gescheiden, die fracties worden genoemd. Elke fractie is een

mengsel van koolwaterstofketens die alleen door de grootte en de structuur van de moleculen van elkaar te onderscheiden zijn. De belangrijkste fractie voor de productie van kunststoffen is de ruwe benzine (nafta).⁴¹

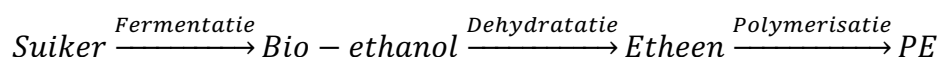
We nemen als voorbeeld polyetheen, PE. PE wordt gemaakt door polymerisatie van etheen. Etheen wordt verkregen door het kraken van nafta.



*Figuur 16. Polymerisatie van etheen*⁴²

Het gebruik van fossiele brandstoffen heeft enkele nadelen voor een duurzame industrie. De nadelen bij het gebruik van aardolie zijn: uitstoot van CO₂, afhankelijkheid van olieproducerende landen, uitputting van toegankelijke bronnen waardoor er tekorten zullen ontstaan, ongelukken met boten of olieleidingen die zijn schadelijk voor het milieu.⁴³

Om minder afhankelijk te zijn van fossiele brandstoffen werd gezocht naar hernieuwbare alternatieve grondstoffen om kunststoffen te produceren (GC7). Een voorbeeld hiervan is bio-ethanol. Bio-ethanol wordt verkregen uit planten en is dus een hernieuwbare grondstof. Via microbiële fermentatie (gisting) van suikers, zoals in suikerriet en suikerbieten, kan men bio-ethanol verkrijgen. De nodige suikers kunnen ook uit andere gewassen worden gehaald, zoals tarwe, maïs, rogge en gerst.⁴⁴ Etheen wordt vervolgens verkregen door het gevormde bio-ethanol te dehydrateren met behulp van een katalysator bij hoge temperatuur. Door bovenstaande polymerisatiereactie kan polyetheen verkregen worden. Naast de productie van PE kan etheen ook gebruikt worden voor de productie van polyvinylcarbonaat (PVC), polyethyleentereftalaat (PET) en polystyreen (PS).⁴⁵



*Figuur 17. Overzicht productie van PE uit suiker*⁴⁵

De chemische, fysische en mechanische eigenschappen van kunststoffen geproduceerd op basis van hernieuwbare grondstoffen zijn dezelfde als deze van de producten op basis van fossiele brandstoffen. De afvalverwerking van de bio-based kunststoffen zal dus identiek zijn als deze voor kunststoffen op basis van fossiele brandstoffen. De producten worden gerecycleerd (meestal gaat het over downcycling), gestort op afvalplaatsen of verbrand. Vaak wordt gedacht dat producten op basis van hernieuwbare grondstoffen automatisch biodegradeerbaar zijn en dus veilig afgegeven kunnen worden aan de natuur, als voedsel voor planten en dieren. Dit is echter niet het geval: als de kunststof op basis van aardolie niet biologisch afbreekbaar is, dan zal de bio-based kunststof ook niet biodegradeerbaar en dus niet composteerbaar zijn. PE, PET, PVC en PS zijn voorbeelden van niet-biodegradeerbare kunststoffen. De bio-based kunststof zal op dezelfde manier bijdragen aan de afvalberg als de kunststoffen op basis van fossiele brandstoffen. Door hernieuwbare grondstoffen te gebruiken is het produceren van kunststoffen groener geworden, maar op basis van de eigenschappen van de kunststof zelf zijn er nog steeds tekortkomingen.⁴⁴

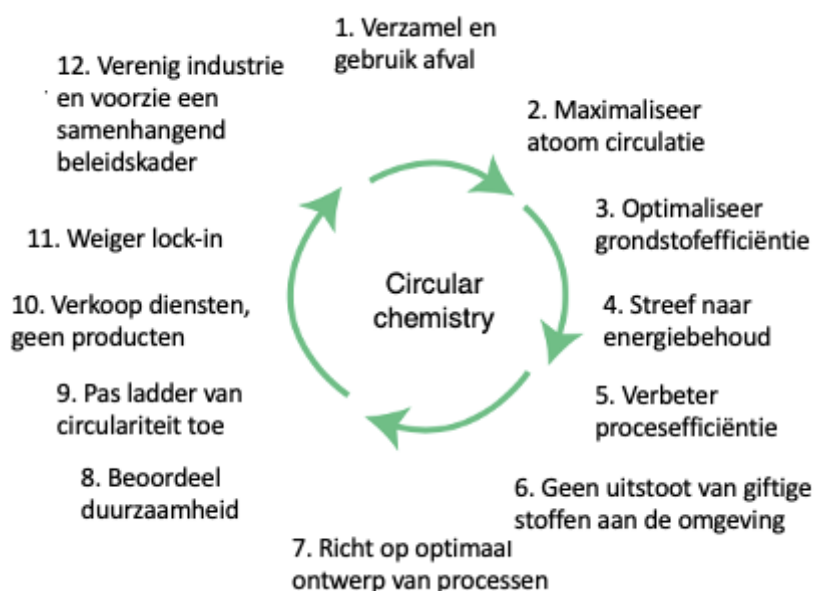
Tabel 3. Twaalf principes van groene chemie³⁴

1. Voorkom afval	Ontwerp chemische syntheses die afval voorkomen.
2. Maximaliseer de atoom economie	Ontwerp syntheses zodat een maximale hoeveelheid van de atomen van de reagentia is ingebouwd in de reactieproducten. Beperkt of geen verlies van atomen. $\% \text{ atomeconomie} = \frac{\text{molare massa van de gebruikte atomen}}{\text{molare massa van de reagentia}} \times 100\%$
3. Ontwerp minder gevaarlijke chemische syntheses	Ontwerp syntheseroutes die enkel stoffen gebruiken en produceren die weinig of geen gevaar (toxisch of mutageen) vormen voor de mens of omgeving.
4. Ontwerp veiligere chemicaliën en producten	Ontwerp chemische producten die functioneel en efficiënt zijn en weinig of niet gevaarlijk.
5. Gebruik veiligere solventen en reactie condities	Vermijd solventen, scheidingsproducten en andere hulp chemicaliën. Indien het echt nodig is, gebruik meer veilige chemicaliën.
6. Verhoog de energie-efficiëntie	Voer, indien mogelijk, chemische reacties uit bij kamertemperatuur en atmosferische druk.
7. Gebruik hernieuwbare grondstoffen	Gebruik startmateriaal dat hernieuwbaar is in plaats van uitputbaar. Hernieuwbare bronnen zijn bv. landbouwproducten of afvalproducten van andere processen. Uitputbare bronnen zijn bv. fossiele brandstoffen.
8. Beperk het aantal reactiestappen	Vermijd onnodige tussenstappen, beperk het gebruik van beschermgroepen of andere tijdelijke modificaties. Tussenstappen zorgen voor extra reagentia en veroorzaken afval.
9. Gebruik katalysatoren	Katalysatoren zijn effectief in kleine hoeveelheden en kunnen hergebruikt worden om één bepaalde reactie meerdere keren uit te voeren. Het voordeel van een reactie met behulp

	van een katalysator is dat er minder afval wordt gevormd, in mildere reactieomstandigheden gewerkt wordt, de reactie meer selectief is en minder energie nodig is.
10. Ontwerp chemicaliën en producten die afbreekbaar zijn na gebruik	Chemische producten dienen zo ontworpen te worden dat ze aan het eind van hun gebruikperiode worden afgebroken tot onschadelijke stoffen zodat ze niet achterblijven in het milieu.
11. Analyseer de processen om de vervuiling te minimaliseren	Analytische methoden moeten verder ontwikkeld worden zodat chemische processen in situ gevolgd kunnen worden zodat de vorming van bijproducten kan worden geminimaliseerd of vermeden.
12. Minimaliseer de kans op ongelukken	Ontwerp chemische producten en gebruik ze in een aggregatietoestand zodat de kans op chemische accidenten zoals bijvoorbeeld explosies, branden en uitstoot in het milieu wordt geminimaliseerd.

Circulaire chemie

Om een circulaire economie te realiseren wordt er ingezet op circulaire chemie (CC). Circulaire chemie is gebaseerd op 12 principes. Deze principes zijn analoog aan deze voor groene chemie, maar zijn aangepast om de overgang naar een circulaire economie mogelijk te maken (Tabel 4. Twaalf principes voor circulaire chemie).⁴⁶ Het verschil tussen de GC-principes en de CC-principes is dat bij GC duurzaamheid wordt nagestreefd door het optimaliseren van het proces en dat bij CC duurzaamheid wordt nagestreefd in de volledige levensloop van de chemische producten. Circulaire chemie stelt het efficiënt gebruik van grondstoffen voorop en wijst op de nood aan nieuwe chemische reacties die toelaten om chemicaliën te hergebruiken en te recyclen zodat we kunnen evolueren naar een closed-loop, afval-vrije chemische industrie.⁴⁶



Figuur 18. Twaalf principes van circulaire chemie⁴⁶

Het eerste principe zegt dat afval als grondstof moet worden gebruikt (CC1). Dit is een absolute voorwaarde om circulariteit te bereiken. Afval moet zo worden verwerkt dat het kan worden gebruikt als chemische grondstof in de verwerking van verhandelbare producten.⁴⁶

BASF heeft een project opgestart met de naam ChemCyclingTM. Het doel van dit project is om, op industriële schaal, producten te vervaardigen uit chemisch gerecycleerd plastic afval. Het afval, in dit geval plastic, wordt verwerkt waardoor het als grondstof kan worden gebruikt. De focus van het project ligt op verwerken van plastic afval waarvoor nog geen hoogwaardige recyclingprocessen zijn ontwikkeld, bijvoorbeeld

plastic afval dat moeilijk mechanisch te recycleren is, zoals gemengd plastic afval, kunststoffen met reststoffen en meerlaagse voedselverpakkingen. De ChemCycling™ is dus complementair aan de mechanische recycling.⁴⁷

Het ChemCycling™-project maakt gebruik van een thermisch proces, genaamd pyrolyse, om het plastic afval om te zetten naar grondstof (pyrolyse-olie). Pyrolyse is de verwarming van inputmateriaal zonder zuurstof op een temperatuur tussen de 400 en 600°C. De olie of nafta die bij de pyrolyse geproduceerd wordt, is geschikt om brandstof (diesel) van te maken en kan ook gebruikt worden als basismateriaal in de stoomkraker van een chemische fabriek, om uiteindelijk weer kunststoffen te maken.^{47,48}



Figuur 19. ChemCycling™-cyclus⁴⁷

BASF zal de olie gebruiken als basismateriaal in de stoomkraker om zo fossiele grondstoffen te vervangen. In de pilootfase stelde BASF de eerste prototypes voor aan klanten. Deze omvatten onder meer mozzarella-kaasverpakkingen, transparante koelcomponenten en isolatiedozen voor gevoelige toepassingen.⁴⁷



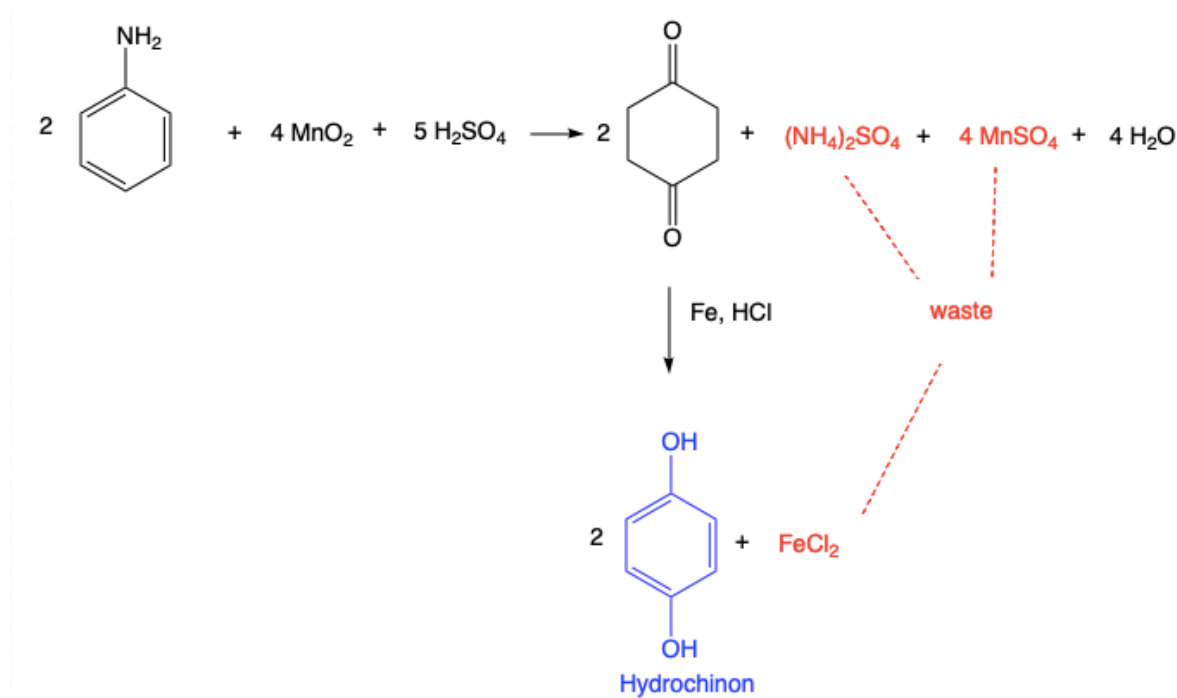
Figuur 20. Pyrolyse-olie⁴⁹



Figuur 21. Zott mozzarella verpakking⁵⁰

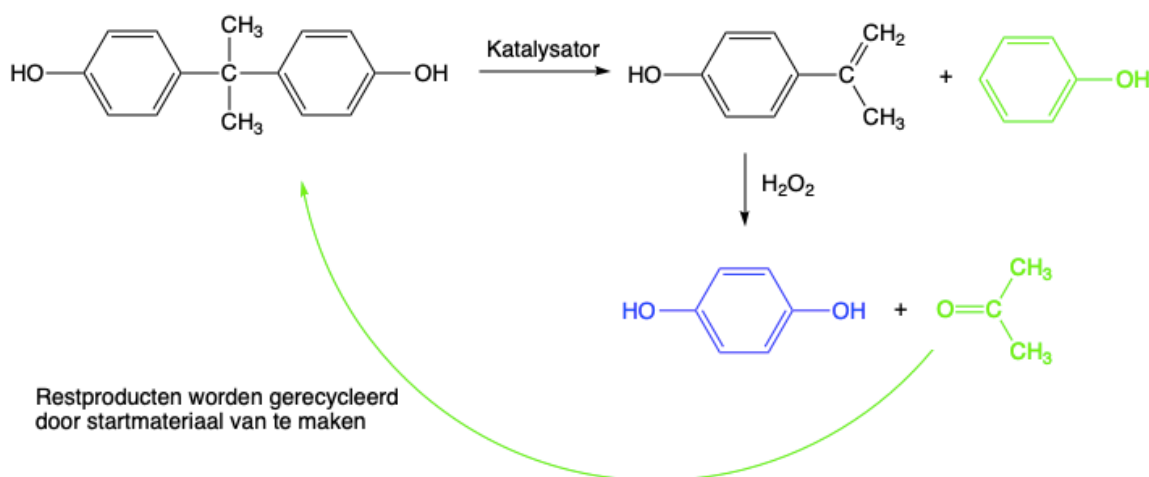
Het tweede principe van circulaire chemie is om atoomcirculatie te maximaliseren (CC2). Dat wil zeggen dat chemische processen zo ontworpen moeten worden dat een maximale hoeveelheid van de atomen aanwezig in de beginproducten wordt ingebouwd in de eindproducten. Chemische processen worden aangepast waardoor atoomcirculatie wordt gemaximaliseerd doorheen alle chemische producten ongeacht of chemische bindingen gemodificeerd zijn of niet.⁴⁶

Een voorbeeld hiervan is terug te vinden bij de productie van hydrochinon, HO-C₆H₄-OH. Hydrochinon is een gekend intermediair bij de productie van polymeren. De standaard industriële route die vroeger werd gebruikt voor de productie van hydrochinon heeft verschillende restproducten die als afval worden behandeld.¹⁷



Figuur 22. Productie van hydrochinon¹⁷

Door gebruik te maken van de principes van circulaire chemie hebben onderzoekers dit proces geoptimaliseerd. Het nieuwe proces om hydrochinon te produceren maakt gebruik van een nieuw startproduct. Twee van de restproducten van de nieuwe reactie kunnen worden geïsoleerd en gebruikt voor het maken van het nieuwe startproduct. Dit nieuwe proces is een voorbeeld van atoom circulatie, waarbij een zo hoog mogelijk percentage van de atomen van het startmateriaal zijn ingebouwd in het reactieproduct.¹⁷



Figuur 23. Nieuw proces voor productie van hydrochinon¹⁷

Door producten te hergebruiken of te recyclen blijven ze in de cyclus waardoor de grondstoffefficiëntie wordt geoptimaliseerd en de in de natuur beperkte hoeveelheid beschikbare grondstoffen behouden wordt (CC3).⁴⁶

In mobiele telefoons zitten heel wat grondstoffen die beperkt aanwezig zijn op onze planeet, zoals bijvoorbeeld goud, koper, kobalt, zilver en tantaal. Het is dus belangrijk dat we oude GSM's recyclen om deze waardevolle grondstoffen te kunnen recupereren.⁵¹

Bij groene chemie (GC7) werd hernieuwbaarheid van grondstoffen ook aangehaald als één van de principes, maar hernieuwbaarheid van grondstoffen op zich is geen maatstaf voor duurzaamheid. Dit werd aangetoond hierboven met het voorbeeld van bio-PE: dit draagt nog steeds bij tot de accumulatie van plastic in de omgeving met de bijhorende negatieve gevolgen. Hetgeen echte duurzaamheid creëert is materiaal circulatie. Een omkeerbare polymerisatiereactie, waarbij polymere moleculen worden omgezet in de oorspronkelijke monomeren, zou een grote vooruitgang zijn in de duurzaamheid van kunststoffen.⁴⁶

Het gebruik van afval (waaronder bijvoorbeeld ook het veelbesproken CO₂ valt) als grondstof kan noemenswaardig bijdragen tot de energie-efficiëntie van een chemisch product doorheen de hele levensloop. CO₂ kan worden omgezet in verschillende andere moleculen zoals methaan, verschillende alcoholen of amiden. De reactieproducten kunnen dan weer voor verschillende toepassingen worden gebruikt en dit terwijl CO₂ uit de atmosfeer onttrokken wordt. Om energie-efficiënt te zijn mag het omzettingsproces echter niet meer energie verbruiken dan dat het product zou kunnen leveren (CC4).⁴⁶

Kalkproducent Carmeuse, Engie en John Cockerill Energy werken samen om CO₂ om te zetten in methaan. Bij de productie van kalk uit kalksteen komt CO₂ vrij. De sector gaat op zoek naar manieren om de CO₂ die ze uitstoot, te hergebruiken. Carmeuse gaat een nieuwe innovatieve oven bouwen die de CO₂-stroom beter concentreert. Het CO₂ wordt ook opgevangen. ENGIE laat dit CO₂ vervolgens reageren met waterstofgas. Het resultaat is methaan. Het gevormde methaan kan gebruikt worden als brandstof in de transportsector of in de industrie.⁵²

Ook aan de Universiteit van Gent wordt onderzoek gedaan naar de transformatie van CO₂ naar bruikbare chemicaliën. De onderzoeksgroep van Prof. Korneel Rabaey maakt gebruik van microbiële elektrolyse, waardoor CO₂ rechtstreeks kan worden omgezet in waardevolle biochemicaliën, zoals acetaat.⁵³

Naast deze 'in-proces' ontwikkelingen, zijn er ook 'na-proces' ontwikkelingen (CC5) die de gebruikte producten verwerken om ze later te hergebruiken en zo het initiële grondstoffenverbruik te verminderen, het grondstoffenrendement te verhogen en de hernieuwbaarheid, duurzaamheid en multifunctionaliteit van de chemicaliën en producten te verhogen.⁴⁶

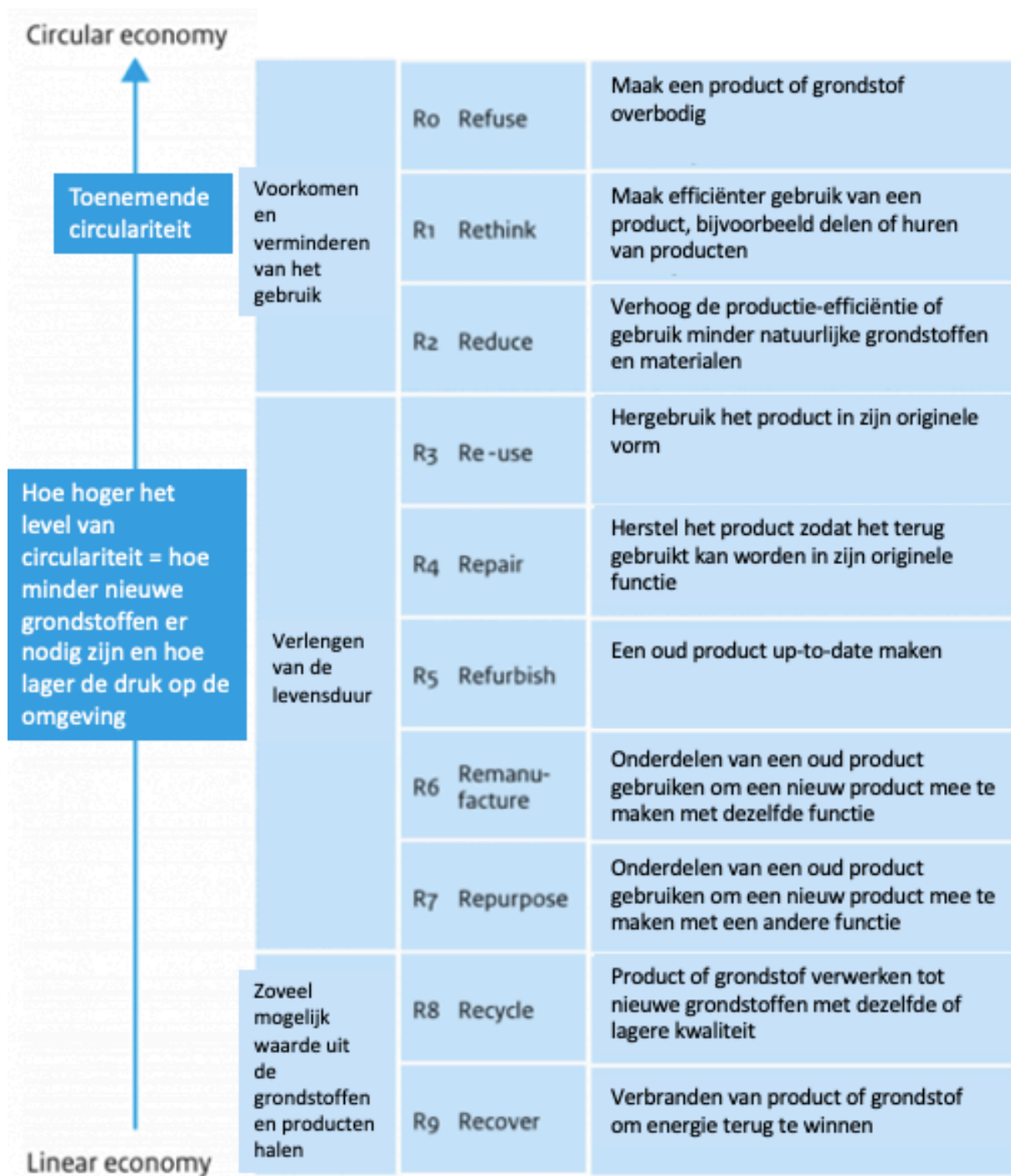
Bij sommige processen is het onvermijdelijk schadelijke producten te gebruiken. Het doel bij circulaire chemie is dat deze producten niet in de omgeving terecht komen (CC6). Om dit te verwezenlijken is het sterk aangeraden dat industriële sites worden gegroepeerd en dat er een toename is in de samenwerking tussen verschillende bedrijven.⁴⁶

Binnen de circulaire chemie moeten producten zo ontworpen worden dat de meest gunstige end-of-life status kan worden bereikt. De vrijstelling van niet-afbreekbare en/of schadelijke

producten in de natuur moet worden vermeden (CC7). Biodegradeerbaarheid wordt doorgaans gezien als duurzaam maar dit is echter niet altijd het geval. Microplastics zijn hier een goed voorbeeld van. Deze zijn vaak schadelijker voor de natuur dan de originele plasticen voorwerpen. In plaats van te streven naar biodegradeerbaarheid zoals in groene chemie (GC10) probeert men in circulaire chemie te streven naar het verwerken van de afvalstroom en op zo'n manier dat afval wordt omgezet in materialen met toegevoegde waarde.⁴⁶

Om de milieubelasting van chemische producten en de inefficiënties in de huidige chemische processen te bepalen (CC8) maakt men gebruik van Life cycle assessment (LCA).⁵⁴ LCA is een analyse-techniek die de milieu-impact van een materiaal beoordeelt doorheen de levenscyclus van het product, vertrekkend vanuit de winning van de grondstoffen, over productie, transport en gebruik tot de uiteindelijke afvalverwerking.⁴⁶

Een gebruikt product kan worden beoordeeld op zijn waarde en hoe het als nieuwe grondstof kan dienen op basis van zijn plaats op de *ladder van circulariteit* (CC9): hoe hoger een product zich bevindt op de ladder, hoe hoger het level van circulariteit. De ladder van circulariteit bevat 10 strategieën voor circulatie van materialen, namelijk refuse (vermijden), rethink (heroverwegen), reduce (verminderen), reuse (hergebruik in originele vorm), repair (herstellen), refurbish (opknappen), remanufacture (herfabricage), repurpose (herbestemmen van bruikbare onderdelen), recycle (grondstoffen terugwinnen) en recover (energie winnen uit materialen).⁴⁶ In figuur 24 is een overzicht gegeven van alle mogelijke strategieën met extra uitleg bij elk niveau.⁵⁵



Figuur 24. Ladder van circulariteit⁵⁵

Bij circulaire chemie worden producenten aangemoedigd om een bedrijfsmodel te hanteren dat diensten aanbiedt in plaats van producten (CC10). Hierbij staan efficiëntie en levensduur van de producten voorop in plaats van de productiesnelheid en de kwantiteit. Een op diensten gebaseerde chemische industrie is noodzakelijk om een circulaire chemie te realiseren. Het principe van circulaire chemie is immers gebaseerd op het herwinnen van de oorspronkelijke

grondstoffen en deze te hergebruiken in nieuwe producten. De bedrijven hebben de mogelijkheden/ benodigdheden en de kennis om grondstoffen terug te winnen en te hergebruiken die de gebruiker niet heeft.⁴⁶

Eastman zet sterk in op innovatie rond de recyclage van plastics, en meer bepaald moleculaire (chemische) recycling. Ze hebben twee moleculaire technologieën ontwikkeld: Carbon Renewal Technologie en Polyester Renewal Technologie. Deze laten toe om verder te gaan dan de traditionele methoden in het hergebruik van plastic afval in hoogwaardige toepassingen. Daardoor is Eastman in staat om gemengde afvalstromen te verwerken en terug om te zetten tot het niveau van moleculen. Alle plastics kunnen zo worden gerecupereerd voor hoogwaardige toepassingen.⁵⁶

Voor de overgang naar een circulaire economie is er onmiddellijk actie vereist. Als bedrijven vast blijven zitten op de huidige manier van 'productie en consumptie', omdat de huidige aanpak wordt verkozen boven de moeite en kost van verandering, spreken we van een 'lock-in'. Circulaire chemie innovaties moeten worden gepromoot om deze lock-in situaties te vermijden en de voordelen van duurzame aanpassingen te tonen op lange termijn (CC11).⁴⁶

Ten laatste, om de adoptie, ontwikkeling en implementatie van circulaire chemie te vergemakkelijken is een ondersteunend beleidskader vereist (CC12).⁴⁶

CAPTURE is een onderzoeksplatform dat een brug wilt bouwen tussen de wetenschappelijke en de industriële wereld. Op 2 juni opent het onderzoekscentrum van CAPTURE. Het gebouw situeert zich op het Eiland Zwijnaarde. Het doel van het onderzoekscentrum van CAPTURE is om mensen met verschillende expertises bij elkaar te brengen om innovatieve technologieën op te zetten om CO₂, water of plastics om te zetten in groene energie.⁵⁷⁻⁵⁹

Tabel 4. Twaalf principes voor circulaire chemie⁴⁶

1. Verzamel en gebruik afval	Afval is een belangrijke grondstof die omgezet kan worden in verkoopbare producten.
2. Maximaliseer atoom circulatie	Circulaire processen moeten proberen om maximaal gebruik te maken van alle atomen in de bestaande moleculen.
3. Optimaliseer grondstofefficiëntie	Grondstofbehoud moet het doel zijn, door het promoten van hergebruik en het behoud van gelimiteerde grondstoffen.
4. Streef naar energiebehoud	Energie-efficiëntie moet worden gemaximaliseerd.
5. Verbeter procesefficiëntie	Innovaties moeten zorgen voor een constante verbetering van in- en na-proces hergebruik en recyclage, bij voorkeur on-site.
6. Geen uitstoot van giftige stoffen aan de omgeving	Chemische processen zouden geen toxische stoffen mogen uitstoten in het milieu.
7. Richt op optimaal ontwerp van processen	Ontwerpen moeten worden gebaseerd op de beste end-of-life opties, rekening houdend met het scheiden, zuiveren en afbreken van afvalproducten.
8. Beoordeel duurzaamheid	Milieubeoordeling (getypeerd door LCA (life cycle assessment)) moet voorop staan in de identificatie van inefficiënties in chemische processen.
9. Pas ladder van circulariteit toe	De end-of-life opties voor een product moeten streven naar de hoogst mogelijke optie op de ladder van circulariteit.
10. Verkoop diensten, geen producten	Producenten moeten gebruik maken van een op diensten gebaseerd bedrijfsmodel zoals het verhuren van chemicaliën, waarbij efficiëntie belangrijker is dan productiesnelheid.

11. Weiger lock-in	Bedrijven en regelgevende instanties moeten zich flexibel opstellen om innovaties te kunnen doorvoeren.
12. Verenig industrie en voorzie een samenhangend beleidskader	De industrie en het beleid moeten worden verenigd om een optimale omgeving te creëren die toelaat een circulariteit te hebben in chemische processen.

Bronnen

1. Modernisering. Accessed March 20, 2021. <https://onderwijsdoelen.be/modernisering>
2. Tijdslijn modernisering secundair onderwijs - Vlaams Ministerie van Onderwijs en Vorming. Accessed March 20, 2021. <https://onderwijs.vlaanderen.be/nl/tijdslijn-modernisering-secundair-onderwijs>
3. Onderwijsdoelen. Accessed March 20, 2021. <https://onderwijsdoelen.be/>
4. Valcke M. Krachtige leeromgevingen. Gent: Academic press, 2019. Accessed April 20, 2021. <https://onderwijs.vlaanderen.be/nl/tijdslijn-modernisering-secundair-onderwijs>
5. Onderwijsdoelen - Resultaten. Accessed February 13, 2021. <https://onderwijsdoelen.be/>
6. (PDF) Exploring the role of independent retailers in the circular economy: a case study approach. Accessed February 11, 2021. https://www.researchgate.net/publication/323809440_Exploring_the_role_of_independent_retailers_in_the_circular_economy_a_case_study_approach
7. Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour Conserv Recycl.* 2017;127:221-232. doi:10.1016/j.resconrec.2017.09.005
8. (PDF) The Concept of Circular Economy: its Origins and its Evolution. Accessed April 2, 2021. https://www.researchgate.net/publication/322555840_The_Concept_of_Circular_Economy_its_Origins_and_its_Evolution
9. What are the disadvantages of the current linear economy? - Kenniskaarten - het Groene Brein. Accessed May 6, 2021. <https://kenniskaarten.hetgroenebrein.nl/en/knowledge-map-circular-economy/ce-disadvantages-linear-economy/>
10. Braungart M, McDonough W, Bollinger A. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. *J Clean Prod.* 2007;15(13-14):1337-1348. doi:10.1016/j.jclepro.2006.08.003
11. Wat zijn kunststoffen? - Kunststof overal. Accessed May 17, 2021. <https://www.kunststofoveral.nl/>
12. Recycling recylen - Kunststof overal. Accessed May 17, 2021.

- <https://www.kunststofoveral.nl/leerling/recycling>
13. Recyclage van plastic flessen - Intradura. Accessed May 7, 2021.
<https://www.intradura.be/nl/recyclage-van-plastic-flessen>
 14. Hoe recycleerbaar zijn plastic verpakkingen? | RAJA Blog. Accessed May 7, 2021.
<https://www.rajapack.be/blog-be/hoe-plastic-recycleren/>
 15. Waarom recyclage (alleen) het plasticprobleem niet zal oplossen | VRT NWS: nieuws. Accessed May 7, 2021. <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2019/09/17/waarom-recyclage-alleen-het-plasticprobleem-niet-zal-oplossen/>
 16. Plastic flessen en flacons recycleren | Fost Plus. Accessed May 7, 2021.
<https://www.fostplus.be/nl/sorteren-recycleren/alles-over-recyclage/pmd-recycleren>
 17. Brown T.L., Lemay H.E., Jr, Bursten B.E., Murphy C.J., Woodward P.M., Stoltzfus M.W., "Chemistry, The central science", 13th edition, global edition, Published 2014 by Pearson Education Limited.
 18. Efficiency vs Effectiveness. Accessed May 19, 2021.
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/news/efficiency-vs-effectiveness>
 19. Wat is cradle to cradle - Duurzaam MBO. Accessed February 13, 2021.
<https://www.duurzaammbbo.nl/wat-is-cradle-to-cradle>
 20. Boer P, Van Heeswijk J, Heideveld A, Den Held D, Maatman D. *Cradle to Cradle*® Als Inspiratiebron C2C in de Onderwijspraktijk.
 21. Wat is cradle to cradle? Accessed February 13, 2021.
<https://www.voordewereldvanmorgen.nl/artikelen/wat-is-cradle-to-cradle>
 22. C2C Design Concept | braungart.com. Accessed May 7, 2021. <http://braungart.epea-hamburg.org/en/content/c2c-design-concept>
 23. Suikerriet | Bio Futura - Duurzame Verpakkingen & Wegwerpservies - Duurzame Verpakkingen - Bio Futura. Accessed May 7, 2021.
<https://www.biofutura.com/nl/materialen/suikerriet>
 24. Borden | Dé online groothandel in BIO disposables | Bio Disposables.shop. Accessed May 7, 2021. <https://biodisposables.shop/categorie/borden/>
 25. Suikerriet - Wikipedia. Accessed May 7, 2021. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Suikerriet>
 26. HOW TO GET YOUR PRODUCT CRADLE TO CRADLE CERTIFIED™ - MBDC. Accessed April 10, 2021. <https://mbdc.com/how-to-get-your-product-cradle-to-cradle-certified/>
 27. Product Scorecard - Cradle to Cradle Products Innovation Institute. Accessed May 30,

2021. <https://www.c2ccertified.org/products/scorecard/building-care-greenspeed-b.v>
28. Product Scorecard - Cradle to Cradle Products Innovation Institute. Accessed May 30, 2021. <https://www.c2ccertified.org/products/scorecard/footwear-home-slipper-lidl-stiftung-co-kg>
 29. C&A – MBDC. Accessed April 10, 2021. <https://mbdc.com/case-studies/ca/>
 30. Cradle to Cradle | C&A België. Accessed April 10, 2021. <https://www.c-and-a.com/be/nl/corporate/company/duurzaamheid/c2c/>
 31. McDonough W. *Co-Founder and Principal, McDonough Braungart Design Chemistry.*; 2001.
 32. Herman Miller – MBDC. Accessed April 10, 2021. <https://mbdc.com/case-studies/herman-miller/>
 33. Mirra 2 Herman Miller, bureaustoel cradle to cradle | Herman Miller bureaustoelen | Bureaustoelen kopen. Accessed May 7, 2021. <https://www.bureaustoelenkopen.nl/a-37788304/herman-miller-bureaustoelen/mirra-2-herman-miller-bureaustoel-cradle-to-cradle/#description>
 34. Basics of Green Chemistry | Green Chemistry | US EPA. Accessed February 13, 2021. <https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry>
 35. Loste N, Roldán E, Giner B. Is Green Chemistry a feasible tool for the implementation of a circular economy? *Environ Sci Pollut Res.* 2020;27(6):6215-6227. doi:10.1007/s11356-019-07177-5
 36. Pinxterhuis EB, Giannerini M, Hornillos V, Feringa BL. Fast, greener and scalable direct coupling of organolithium compounds with no additional solvents. *Nat Commun.* 2016;7. doi:10.1038/ncomms11698
 37. Groene chemie nu nog groener | Science LinX nieuws | Science LinX | Rijksuniversiteit Groningen. Accessed May 21, 2021. https://www.rug.nl/sciencelinx/nieuws/2016/06/20160602_feringa
 38. Vuilnizsak - Wikipedia. Accessed May 22, 2021. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Vuilnizsak>
 39. *Bioplastics.*
 40. Bio-tas hemd 30/10x60cm 23mic 500st. Accessed May 22, 2021. <https://www.deco.nl/winkelmateriaal-1/bio-composteerbare-draagtassen/biotas-hemd-23mic-500st/>

41. Hoe kunststoffen worden gemaakt :: PlasticsEurope. Accessed May 10, 2021.
<https://www.plasticseurope.org/nl/about-plastics/test/how-plastics-are-made>
42. Polyetheen - Wikipedia. Accessed May 17, 2021.
<https://nl.wikipedia.org/wiki/Polyetheen>
43. Kolen, olie en gas | Milieu Centraal. Accessed May 10, 2021.
<https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/energiebronnen/kolen-olie-en-gas/>
44. Kunststof op basis van bio-ethanol, een duurzaam alternatief voor aardolie? - VIBE. Accessed May 10, 2021. <https://www.vibe.be/materialen/bio-ethanol-alternatief-voor-aardolie/>
45. Biobased polyethyleen: Markt- en milieu-aspecten. Accessed May 21, 2021.
<https://edepot.wur.nl/25629>
46. Keijer T, Bakker V, Slootweg JC. Circular chemistry to enable a circular economy. *Nat Chem*. 2019;11(3):190-195. doi:10.1038/s41557-019-0226-9
47. Chemische recycling van plastic afval. Accessed May 24, 2021.
<https://www.basf.com/be/nl/who-we-are/sustainability/chemcycling.html>
48. Bergsma G, Broeren M. Chemische recycling in het afvalbeleid. Published online 2019;17. <https://www.cedelft.eu/en/publications/2441/chemical-recycling-in-waste-policy>
49. BASF's chemical recycling of plastics - Circulary. Accessed May 24, 2021.
<http://www.circulary.eu/project/basf-chemical-recycling/>
50. Mozzarella Cheese Zott 125 g for 2.49 lv. with delivery to your home - eBag.bg. Accessed May 24, 2021. <https://www.ebag.bg/en/mozzarella-cheese-zott-125-g/14256>
51.  Gsm en smartphone recycleren: hoe, waarom, waar | Orange België. Accessed May 24, 2021. <https://www.orange.be/nl/blog/recyclage-gsm-smartphone>
52. CO2 omzetten in methaan: project Engie en kalksteenproducent Carmeuse | Susanova. Accessed May 23, 2021. <https://www.susanova.be/artikels/plannen-voor-groot-project-in-wallonië-om-e-methaan-te-maken-van-co2>
53. Transforming CO2 into useful chemicals — Faculty of Bioscience Engineering. Accessed May 30, 2021. <https://www.ugent.be/bw/en/research/platforms/green-chemistry/transforming-co2-into-useful-chemicals>
54. Life-cycle assessments - Use and re-use - Eduqas - GCSE Chemistry (Single Science)

- Revision - Eduqas - BBC Bitesize. Accessed May 27, 2021.
<https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zgtd2nb/revision/1>
55. Najaarssymposium “Inspiring Chemistry for a Circular Economy?” - MM. Accessed May 24, 2021. <https://mm.kncv.nl/k/news/view/125864/108855/najaarssymposium-inspiring-chemistry-for-a-circular-economy.html>
56. Themabijlage D, Gepubliceerd W, Mediaplanet D, Valt EN, Onder N, Redactie DEVVANDE. Duurzame Chemie. 2021;(April).
57. “De weg naar een klimaatvriendelijke industrie begint bij onderzoek” | Durf Denken. Accessed June 3, 2021. <https://www.durfdenken.be/nl/onderzoek-en-maatschappij/de-weg-naar-een-klimaatvriendelijke-industrie-begint-bij-onderzoek>
58. 2 juni: opening onderzoekscentrum CAPTURE — Universiteit Gent. Accessed June 3, 2021. <https://www.ugent.be/nl/actueel/capture-opening.htm#>
59. Welcome to CAPTURE | CAPTURE. Accessed June 3, 2021. <https://www.capture-resources.be/>

Bijlagen

Bijlage 1: Sleutelcompetenties¹

Sleutelcompetenties zijn clusters van inhoudelijk verwante competenties die de leerlingen moeten verwerven om te functioneren in de maatschappij en zich persoonlijk te ontplooiën. De eindtermen van de basisvorming worden niet langer gekoppeld aan vakken maar aan sleutelcompetenties.

Verkorte naam	Volledige naam
Andere talen	Competenties in andere talen
Burgerschap	Burgerschapscompetenties met inbegrip van competenties inzake samenleven
Cultureel bewustzijn	Cultureel bewustzijn en culturele expressie
Digitale competenties	Digitale competentie en mediawijsheid
Duurzaamheid	Competenties inzake duurzaamheid
Economische en financiële competenties	Economische en financiële competenties
Historisch bewustzijn	Competenties met betrekking tot historisch bewustzijn
Juridische competenties	Juridische competenties
Leercompetenties	Leercompetenties met inbegrip van onderzoekscompetenties, innovatiedenken, creativiteit, probleemoplossend en kritisch denken, systeemdenken, informatieverwerking en samenwerken
Lichamelijke en geestelijke gezondheid	Competenties op het vlak van lichamelijk, geestelijk en emotioneel bewustzijn/gezondheid
Nederlands	Competenties in het Nederlands
Ondernemingszin	Ontwikkeling van initiatief, ambitie, ondernemingszin en loopbaancompetenties
Ruimtelijk bewustzijn	Competenties met betrekking tot ruimtelijk bewustzijn
Sociaal-relatieve competenties	Sociaal-relatieve competenties

Wiskunde – natuurwetenschappen – technologie – STEM	Competenties inzake wiskunde, exacte wetenschappen en technologie
Zelfbewustzijn	Zelfbewustzijn en zelfexpressie, zelfsturing en wendbaarheid