Verkenning chemische recycling - update 2019

Hoe groot zijn - en worden - de kansen voor klimaatbeleid?

CE Delft

Committed to the Environment

Verkenning chemische recycling - update 2019

Hoe groot zijn - en worden - de kansen voor klimaatbeleid?

Dit rapport is geschreven door:
Martijn Broeren
Erik Roos Lindgreen
Geert Bergsma

Delft, CE Delft, april 2019

Publicatienummer: 19.2P22.062

Plastics / Kunststoffen / Recyclen / Hergebruik / Procestechnologie / Chemie / LCA / Klimaatverandering / Overheidsbeleid

Opdrachtgever: Ministerie van EZK met aanvullende financiering van KIDV voor analyse van Solvolyse

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Geert Bergsma (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft
Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	6
	1.1 Chemische recycling: achtergrond	6
	1.2 Projectdoelen	8
	1.3 Aanpak en leeswijzer	8
2	Beschikbare kunststof afvalstromen	10
	2.1 Achtergrond	10
	2.2 Stromen in Nederland: huishoudens	11
	2.3 Overige stromen in Nederland	15
	2.4 Stromen in buurlanden België, Duitsland en Verenigd Koninkrijk	17
	2.5 Totale beschikbaarheid kunststofafval richting 2030	18
	2.6 Kanttekeningen beschikbare kunststofafvalstromen	21
3	Beschikbare technieken chemische recycling	22
	3.1 Geselecteerde technieken en referenties	22
	3.2 Chemische recycling	23
	3.3 Referentieverwerkingstechnieken	26
4	Milieubeoordeling	27
	4.1 Methode: screening LCA	27
	4.2 Resultaten	28
5	Potentiële reductie klimaatimpact	30
	5.1 Methode	30
	5.2 Resultaten	31
6	Conclusies en aandachtspunten beleid	36
	6.1 Conclusies	36
	6.2 Aandachtspunten voor beleid	37
7	Referenties	41
A	Overzicht technieken chemische recycling	43
B	Screening LCA-methode chemische recycling	45
	B.1 Doelstelling	45
	B.2 Afbakening	45
	B.3 Functionele eenheid	45
	B.4 Data	46
	B.5 Substitutiemethode en vermeden producten	46
	B.6 Modellering en milieu-effectbeoordeling	46

Samenvatting

In zowel het nieuwe Regeerakkoord als in de transitieagenda's voor de circulaire economie wordt chemische recycling als een belangrijke oplossing voor de verduurzaming van de kunststofketen gezien. Zo wordt in de transitieagenda voor kunststoffen genoemd dat 10% van alle plastics in 2030 chemisch gerecycled zullen worden. Chemische recycling kan een interessante optie zijn als aanvulling op de huidige mechanische recycling, waarbij relatief hoogwaardige grondstoffen worden geproduceerd.

Het is momenteel niet bekend wat het volume is van kunststofstromen in Nederland die geschikt zijn voor chemische recycling. Daarnaast is er over het milieuvoordeel (in dit rapport: klimaatimpact) nog relatief weinig bekend. Om inzicht te bieden in deze kwesties koppelt dit onderzoek gegevens over geschikte afvalstromen aan indicatieve kengetallen voor de klimaatemissies voor een aantal innovatieve chemische recyclingtechnieken. Hierbij wordt ingezoomd op drie kunststof afvalstromen: uitvallen uit (mechanische) recyclingketens, lastig te recyclen monostromen (PET-trays en broomhoudend EPS) en mixed plasticstromen (DKR-350). Bij deze drie stromen zou chemische recycling de huidige mechanische recycling goed kunnen aanvullen.

Tabel 1 geeft een overzicht van kunststof afvalstromen die mogelijk in te zetten zijn voor chemische recycling in 2020 en in 2030, waarbij een conservatieve en een optimistische case wordt gekeken. In die laatste wordt ook het effect van het van het importeren van een deel van de kunststofstromen uit buurlanden België, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk meegenomen. Hieruit blijkt dat in 2030 in Nederland jaarlijks ca. 260 tot 330 kiloton (kton) aan kunststof afval ingezet kan worden in chemische recycling. Als ook import mogelijk is kan een volume van meer dan 1.000 kton/jaar bereikt worden.

Tabel 1 - Schatting beschikbare kunststofstromen voor chemische recycling in Nederland, kton/jaar

	2020	2030 conservatief	2030 optimistisch	
			NL	Import
Recyclinguitval	97	107	161	558
PET-trays	32	36	40	0
DKR 350	101	112	126	583
Broomhoudend EPS	7	8	9	0
Totaal	**237**	**263**	**336**	**1.141**

Bovenstaande hoeveelheden zijn gekoppeld aan eerder berekende milieuresultaten van chemische recyclingtechnieken. De klimaatimpact verschilt per techniek, blijkt uit eerdere studies. Voor technieken zoals pyrolyse en vergassing is deze eerder op tussen de 0 tot -0,5 ton CO_2-eq./ton input geschat, terwijl deze voor technieken die polymeren minder ver afbreken zoals depolymerisatie en solvolyse op ca. -1,5 ton CO_2-eq./ton input ingeschat is. Ter referentie: verbranding van afgedankt kunststof in een AEC komt op ca. +1,6 ton CO_2-eq./ton input, en mechanische recycling op ca. -2,3 ton CO_2-eq./ton input.

De koppeling van beschikbare hoeveelheden aan deze klimaatresultaten leidt tot het resultaat in Figuur 1. Naar schatting kan in 2020 de klimaatimpact met ongeveer 0,2 megaton (Mton) CO_2-eq./jaar verlaagd worden door grootschalige inzet van chemische recycling. In de conservatieve case voor 2030 wordt de totale besparing op een vergelijkbare hoeveelheid geschat, omdat de kunststofstroom minimaal toeneemt en er geen afval wordt geïmporteerd. Als uitgegaan wordt van de optimistische case voor 2030, waarin import meegenomen is, blijkt dat de klimaatimpact met 1,6 Mton CO_2-eq./jaar verlaagd kan worden. Hiervan wordt geschat dat 1,0 Mton CO_2-eq. van deze reductie in Nederland plaatsvindt (niet getoond in figuur).

Figuur 1 - Resultaten klimaatimpact chemische recycling vs. referentieverwerking

De analyse leidt tot een aantal aandachtspunten voor beleid met betrekking tot chemische recycling. Zo is het vanwege de uiteenlopende gebruikte technologieën en milieuprestaties aan te raden om chemische recycling als geheel niet te zien als één verwerkingstechniek. Vaak stellen technieken met een hoge CO_2-reductie ook hogere eisen aan de kwaliteit van het afval. Magnetische depolymerisatie en solvolyse scoren qua klimaatimpact ongeveer vergelijkbaar met mechanische recycling maar hebben vrij specifieke input nodig. Vergassing en pyrolyse stellen minder strenge eisen aan de inputs, maar behalen ook minder milieuvoordeel.

Verder zijn de technologieën op dit moment nog niet uitontwikkeld. Voor verdere ontwikkeling is het van belang door een gelijk speelveld te creëren met mechanische recycling. Dit zou kunnen in de vorm van een vergoedingsstelsel zoals geïntroduceerd voor mechanische recycling. Daarnaast kan chemische recycling meegenomen worden in recyclingadministratiesystemen (evt. afhankelijk van de milieuprestaties).

Er zijn tot slot twee routes om de hoeveelheid beschikbaar inputmateriaal te vergroten.
De eerste optie is om te focussen op kunststofafval dat nu al gescheiden wordt maar waar mechanische recycling niet goed mee om kan gaan. Dit kan internationaal aangepakt worden door de import van kunststofstromen uit buurlanden te faciliteren. Hierbij verdient de toerekening van klimaatvoordelen speciale aandacht. Een handelssysteem voor emissierechten voor afvalverwerking zou hierbij kunnen worden ingezet als boekhoudkundige oplossing. De tweede optie is om nationaal bron- en nascheidingssysteem van kunststof sterk uit te breiden, inclusief bedrijfsafval.

De resultaten van dit onderzoek dienen als basis voor de milieuanalyse en de hoeveelhedenanalyse in de nog uit te brengen Roadmap Chemische Recycling van KIDV (samenwerking KIDV, TNO en CE Delft).

Toelichting update voorjaar 2019

In het begin van 2019 is meer informatie beschikbaar gekomen over de te verwachten inputs en opbrengsten van pyrolyse, geïntegreerde hydropyrolyse en lagetemperatuursvergassing van afgedankte plastics. Op basis hiervan heeft CE Delft de screening LCA's geüpdatet.

De klimaatimpactresultaten van deze nieuwe modellen zijn opgenomen in deze versie van dit rapport, waardoor de potentiële reductie in klimaatimpact die chemische recycling kan realiseren lager wordt ingeschat dan in de eerdere versie.

Deze aanpassing heeft geen invloed op de algehele beleidsconclusies die uit deze analyse voortkomen.

1 Inleiding

Het nieuwe regeerakkoord verwacht een extra CO_2-emissiebesparing van 1 Mton CO_2 per jaar door recycling van afvalstromen (Rijksoverheid, 2017a). In de transitieagenda circulaire economie voor kunststoffen wordt chemische recycling als een belangrijke oplossing voor de verduurzaming van de kunststofketen gezien: in het document wordt genoemd dat 10% van alle kunststoffen in 2030 chemisch gerecycled zal worden. De totale capaciteit voor de chemische recycling van kunststoffen wordt hiermee geschat op 250 kton in 2030 (Rijksoverheid, 2017b). Ook de analyse van de kunststofketen door KIDV benadrukte dat chemische recycling van plastics, mits met een goede milieuscore, een goede aanvulling op mechanische recycling zou zijn (KIDV, 2017a).

Op dit moment bestaat de recycling van plastics voornamelijk uit verpakkingen, voor een groot deel voor voedsel, die na recycling voor het grootste deel ingezet worden in andere producten omdat het grootste deel van het recyclaat niet voor voedselverpakkingen ingezet mag worden. Recyclaat uit chemische recycling kan deze mismatch tussen aanbieder en gebruiker van recyclaat wellicht voor een deel oplossen omdat hiermee wel weer voedselverpakkingen gemaakt kunnen worden.

Stromen die mechanisch lastig te hergebruiken zijn kunnen via de chemische weg omgezet worden in grondstoffen voor de chemie. De verbranding van kunststofafval en de conventionele productie van deze chemische grondstoffen wordt daarmee voorkomen. Er is echter bij het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) nog geen onderbouwing bekend van de hoeveelheid kunststoffen waarvoor verschillende chemische recyclingtechnieken geschikt zijn en wat het milieuvoordeel is van chemische recycling. Het ministerie van EZK heeft CE Delft gevraagd hier meer duiding aan te geven.

1.1 Chemische recycling: achtergrond

Chemisch recyclen is het door middel van een chemisch proces terugbrengen van kunststof naar de oorspronkelijke bouwstenen van het materiaal (polymeren, monomeren of atomen), zodat hier opnieuw kunststof of andere producten van gemaakt kunnen worden (KIDV, 2017b). Een voordeel van chemische recycling is dat grondstoffen geproduceerd kunnen worden. Hierdoor kunnen kunststof afvalstromen bijvoorbeeld opnieuw ingezet worden voor voedseltoepassingen, zoals nu ook met statiegeldflessen gebeurt. Om deze omzetting te bereiken is wel energie nodig.

Voornamelijk vanwege dit energieverbruik wordt chemische recycling in het Landelijk Afvalbeheerplan 3 gezien als een laagwaardigere vorm van recycling dan ‘recycling als materiaal’ (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2017). Wel wordt in het LAP3 vermeld dat hiervoor ook uitzonderingen gelden: chemische recycling kan de voorkeur krijgen boven recycling als materiaal “(…) wanneer zij voldoet aan de criteria om te spreken van voorkeursrecycling of wanneer op basis van een LCA van de hiërarchie kan worden afgeweken”.

De afvalhiërarchie uit het LAP3 is als volgt:

A	Preventie;
B	Voorbereiding voor hergebruik
C1	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een gelijke of vergelijkbare toepassing (*)
C2	Recycling van het oorspronkelijke functionele materiaal in een niet gelijke of vergelijkbare toepassing (*)
C3	Chemische recycling (*)
D	Andere nuttige toepassing, waaronder energieterugwinning;
E1	Verbranden als vorm van verwijdering;
E2	Storten of lozen

(*) In het LAP3 wordt de term 'voorkeursrecycling' gebruikt. Dit is een vorm die in het algemeen valt onder C1, C2 of C3, maar die in een sectorplan expliciet als voorkeursrecycling is aangemerkt.

Er bestaan veel verschillende varianten van chemische recycling, die op verschillende manieren gecategoriseerd kunnen worden. Het Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV) houdt de volgende indeling aan, gebaseerd op de plek in de kunststofketen waarop het materiaal teruggebracht kan worden: solvolyse, depolymerisatie, pyrolyse (kraken) en vergassing (zie Figuur 2)[1]. Een voordeel van technieken die een afvalstroom terugbrengen tot monomeren (depolymerisatie) of polymeren (solvent extractie naar polymeren), is dat er weinig stappen nodig zijn om hier weer nuttige eind-producten van te maken. Technieken die een afvalstroom verder afbreken produceren meer basale bouwstenen (bijv. vergassing) die voor meer verschillende toepassingen ingezet kunnen worden. Aan de andere kant zijn er ook meer verwerkingsstappen nodig om de bouwstenen weer om te zetten tot eindproducten, wat doorgaans ook meer klimaatimpact veroorzaakt.

Figuur 2 - Varianten van chemische recycling. Gebaseerd op (KIDV, 2017c)

Het huidige systeem van mechanische recycling loopt tegen grenzen aan. De kwaliteit van het recyclaat is bijvoorbeeld onvoldoende om op grote schaal virgin kunststof te vervangen. Een andere uitdaging is dat het systeem van inzameling en recycling (nog) niet kostendekkend is. Chemische recycling als aanvulling op het bestaande systeem zou een oplossing kunnen vormen voor deze grenzen. Hoewel sommige chemische technieken soms al decennia in ontwikkeling zijn, is vaak onbekend in welke mate ze toepasbaar zijn op huidige kunststofstromen waarvoor mechanische

[1] We sluiten in deze studie aan bij deze afbakening van chemische recycling.

recycling geen optie is. Ook zijn er vragen over het milieuvoordeel door te benodigde toevoeging van energie. Dit onderzoek combineert deze onderwerpen door een inschatting van beschikbare kunststofstromen te koppelen aan het verwachte milieurendement van een aantal chemische recyclingtechnieken.

1.2 Projectdoelen

Deze verkenning naar de potentie van chemische recycling is gebaseerd op de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat is de potentie in milieurendement, materiaalbehoud en kostenefficiency van verschillende technieken om onderdelen van de mix plasticstroom uit bronscheiding, nascheiding en sortering chemisch te recyclen? Hoe verhoudt dit zich tot de bestaande routes van mechanische recycling en verbranding in een AEC?
2. Welke capaciteit aan recyclingtechnieken is nodig om het Nederlandse (huishoudelijk) afval te verwerken, en hoe groot is de potentie vanuit een West-Europees perspectief?
3. Wat is de bijdrage aan het reduceren van de klimaatimpact als ingezet wordt op chemische recycling in 2030?
4. Welke beleidsaanbevelingen komen uit bovenstaande vragen?

Het gaat hier dus om een verkennende studie gericht op milieurendement en materiaalbehoud.

Focus op klimaatimpact

Naast CO_2-emissies en andere broeikasgassen die bijdragen aan klimaatverandering komen bij productieprocessen ook altijd andere emissies vrij. Eerdere analyses geven aan dat bij kunststoffen de klimaatimpact het dominante probleem vormt. Daarom zullen we de analyses daarop focussen. Alleen als de toepassing van mixed kunststof hout vervangt is het wellicht zaak ook andere milieueffecten als biodiversiteit en landgebruik mee te nemen. In dat geval is dat mogelijk.

1.3 Aanpak en leeswijzer

Om het CO_2-emissiereductiepotentieel van chemische recycling in 2030 te evalueren en uiteindelijk te komen tot beleidsaanbevelingen wordt de analyse in dit rapport in een aantal stappen opgebouwd. Deze stappen, overeenkomend met de indeling in hoofdstukken, worden hier kort toegelicht. Figuur 3 vat de opzet van dit rapport visueel samen.

Eerst wordt bepaald hoeveel kunststof afvalmateriaal mogelijk gebruikt kan worden voor chemische recycling in Nederland (Hoofdstuk 2). Er wordt hierbij gekeken naar verschillende kunststof afvalstromen in Nederland die op dit moment verbrand worden (recyclinguitval), (relatief) laagwaardig worden ingezet (DKR 350) of überhaupt niet verwerkt worden (PET-trays). Daarnaast wordt gekeken naar de huidige grootte van kunststof afvalstromen in Duitsland, België en het Verenigd Koninkrijk. Deze zouden immers mogelijk (op termijn) ook in Nederland chemisch verwerkt kunnen worden. Om de potentie voor 2030 aan te geven worden twee cases opgesteld, waarin met conservatieve en optimistische aannames een bandbreedte in de hoeveelheid beschikbaar materiaal wordt vastgesteld. Vervolgens wordt een beknopt overzicht van de beschikbare technieken voor chemische recycling gegeven (Hoofdstuk 3). De drie soorten kunststofstromen die in Hoofdstuk 2 geïdentificeerd zijn, komen ook in aanmerking voor verschillende vormen van chemische recycling en worden op het moment al verschillend verwerkt. We richten ons hier op de groep technieken die (vermoedelijk) goed kunnen omgaan met kunststofstromen en waarvoor voldoende informatie over hun milieuprestaties beschikbaar is. Daarnaast worden de huidige verwerkingsprocessen (referentietechnieken) toegelicht.

De milieuprestaties van de chemische recyclings- en referentietechnieken worden daarna gepresenteerd (Hoofdstuk 4). Het betreft hier indicatieve scores op de klimaatimpact van elke techniek gebaseerd op **screening** studies, aangezien de technieken nog niet uitontwikkeld zijn. Deze indicatoren houden rekening met de nuttige outputs die alle technieken produceren, zoals syngas, andere chemische basismaterialen of energie.

Uit de voorgaande hoofdstukken volgt de totale klimaatimpact in 2020 en 2030 (twee cases), voor zowel de referentietechnieken als voor chemische recycling (Hoofdstuk 5). We maken hierbij een onderscheid in klimaatimpact die in Nederland en in het buitenland plaatsvindt, om inzicht te krijgen in hoeverre het inzetten op chemische recycling in Nederland tot klimaateffecten in het buitenland leidt. Uitgangspunt bij deze analyse is dat de techniek wordt ingezet die tot het meeste reductie in klimaatimpact leidt. Aangezien de haalbaarheid hiervan (wat betreft technologisch ontwikkelings-niveau en kosten) zeker voor 2030 onzeker is, wordt ook getoond wat het resultaat zou zijn bij gebruik van technieken die tot minder klimaatvoordeel lijden.

In Hoofdstuk 6 worden vervolgens ingrediënten voor discussie uit de voorgaande hoofdstukken gedestilleerd en beleidsmatig geëvalueerd. We zoomen hierbij o.a. in op de consequenties van de verwerking van buitenlands afval in Nederland, en mogelijke ontwikkelingen die invloed zouden kunnen hebben op de inzet van chemische recycling tussen 2020 en 2030.

Figuur 3 - Leeswijzer onderzoek 'Verkenning chemische recycling'

De resultaten van dit onderzoek dienen als basis voor de milieuanalyse en de hoeveelhedenanalyse in de Roadmap Chemische Recycling van KIDV (samenwerking KIDV, TNO en CE Delft).

2 Beschikbare kunststof afvalstromen

2.1 Achtergrond

In Nederland is ervoor gekozen om huishoudelijk afval steeds meer te verwaarden tot grondstof. Deze ambitie is o.a. vastgelegd in het VANG Uitvoeringsprogramma Huishoudelijk Afval (Rijksoverheid, 2014). Dit wordt in de praktijk gerealiseerd door middel van een mix van bron- en nascheiding, waarbij voor sommige materialen (drankenkartons, kunststoffen) een vergoeding beschikbaar is.

Ook voor afvalstromen uit de kantoor-, winkel- en dienstensector (KWD-sector) die vergelijkbaar zijn met huishoudelijk afval zijn circulaire ambities geformuleerd, die in de praktijk uitwerking vinden in de vorm van slimmere logistiek, het verminderen van eenmalige verpakkingen, en de verbeterde inzameling en recycling van plastics. Omdat de kunststoffen in deze stroom gelijkaardig zijn aan huishoudelijke kunststoffen, qua samenstelling en verdere verwerking, worden deze hoeveelheden ook meegenomen in de analyse.

Mechanische recycling van kunststoffen uit beide stromen loopt op bepaalde aspecten tegen grenzen aan. Zo zijn er samengestelde verpakkingen (materiaalcombinaties) op de markt die met mechanische recycling niet volledig recyclebaar zijn. Ook is de kwaliteit van de output van mechanische recycling vaak beperkt. Toepassing in de voedselsector als verpakking is meestal niet mogelijk vanwege voedselveiligheidsvoorschriften (contaminatie met niet-voedselveilige stoffen is niet uitgesloten bij gemengde inzameling). Daarnaast is er uitval van materiaal uit recyclingketens. Chemische recycling zou een oplossing kunnen vormen voor deze stromen. Concreet gaat het hierbij om:

- **Kunststof dat uitvalt uit sorteer- en recyclestappen**. Op verschillende plekken in de kunststofrecyclingketen valt op dit moment kunststof uit. Dit materiaal is niet geschikt voor recycling of wordt niet geselecteerd voor recycling en wordt momenteel verbrand. Het gaat onder andere om:
  - kleine kunststof (onder)delen in brongescheiden materiaal, zoals flesdopjes, die niet uitgesorteerd worden;
  - kunststoftypen in brongescheiden materiaal die niet uitgesorteerd worden, zoals PVC, PS en PLA;
  - vervuild PET, PP of PE dat niet gedetecteerd wordt bij sortering;
  - de belangrijkste stromen zijn uitvallen bij sortering van zowel brongescheiden materiaal als materiaal uit nascheiding, en uitvallen bij de uiteindelijke verwerking.
- **Lastig te recyclen gesorteerde monostromen met vervuiling**. Voor een aantal monostromen met vervuiling van kunststoffen is op dit moment geen geschikte recyclingtechnieken beschikbaar. Een bekend voorbeeld zijn PET-schalen met relatief hoge gehaltes vreemd-kunststoffen en andere vervuiling (Thoden Van Velzen, 2017). Broomhoudend EPS uit de bouwsector is ook een vervuilde stroom die lastig recyclebaar is. Ook kan niet altijd al het nagescheiden materiaal vermarkt worden vanwege vervuiling.
- **Mixed plasticstromen**. 55% van het recyclen van inzamelde kunststoffen in Nederland vindt plaats in de vorm van het recyclen naar mixed plastics stromen. Voor dit recyclaat gelden lage of soms zelfs negatieve prijzen (KIDV, 2016a). Mixed plastics zouden ook d.m.v. chemische recycling hoogwaardiger gerecycled kunnen worden.

Uitgesloten van de scope van deze studie zijn:

- **Kunststof bedrijfsafval.** Dit betreft onder andere kunststof afval dat vrijkomt uit bijvoorbeeld de automotive sector, WEEE-recycling of de bouw (excl. broomhoudend EPS). Kunststof afval uit de kantoor-, winkel- en dienstensector (KWD sector) wordt wel meegenomen. Over kunststof bedrijfsafval buiten de KWD-sector is relatief weinig bekend qua hoeveelheden en samenstelling. Er is op dit moment ook geen financiering voor het apart houden van meer kunststof bedrijfsafval. Daarom wordt aangenomen dat het vooral gaat om de economisch gunstig te recyclen monostromen als folies en kunststof pallets. Voor deze en andere separaat ingezamelde kunststofstromen is mechanische recycling een goede optie, waardoor we deze stromen nu niet zien als input voor chemische recycling.
- **Kunststof grofvuil**. Ook over deze stroom is weinig bekend qua hoeveelheden en samenstelling.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht van de volumes van deze verschillende stromen opgesteld. Het gaat vanwege het ontbreken van informatie over andere stromen om kunststof verpakkingen. Om een beter beeld te geven van de potentie van chemische recycling in Nederland wordt ook kort gekeken naar soortgelijke kunststofstromen in buurlanden België, Duitsland, en het Verenigd Koninkrijk. Een deel van deze stromen zou in 2020-2030 ook door installaties in Nederland verwerkt kunnen worden.

2.2 Stromen in Nederland: huishoudens

In de context van chemische recycling zijn de hoeveelheden kunststoffen die uitvallen bij sortering en verwerking potentieel interessant. De huidige hoeveelheden en de samenstelling van deze stromen zijn samengevat dit hoofdstuk. We nemen aan dat deze stromen in 2020 ongeveer gelijk zullen zijn. Daarnaast presenteren we verschillende ontwikkelingen in deze stromen in 2030.

De focus van deze analyse ligt bij kunststof verpakkingsafval. Ongeveer 40% van de wereldwijd geproduceerde kunststoffen worden gebruikt in verpakkingstoepassingen (Geyer, et al., 2017). Figuur 4 laat het totale verwerkingssysteem van kunststof verpakkingen van huishoudens in Nederland zien.

De afdanking van kunststof verpakkingen op straat (zwerfvuil) en in openbare prullenbakken, zoals op stations, is niet expliciet meegenomen als inzamelrichting. Dit zit impliciet inbegrepen in de hoeveelheid die naar verbranding gaat (want het uitgangspunt is de totale hoeveelheid huishoudelijke kunststof verpakkingen op de markt). Daarnaast komt in de praktijk ook menging tussen het bronscheidings- en nascheidingssysteem voor, wat in onderstaande figuur achterwege gelaten is.

Figuur 4 - Verwerkingssysteem kunststof verpakkingen van Nederlandse huishoudens

Ook bestaat een deel van het kunststof huishoudelijk afval uit niet-verpakkingen zoals speelgoed of tuinstoelen. Hoeveel niet-verpakkingen jaarlijks op de markt komen - en afgedankt worden - wordt niet nauwkeurig gemonitord omdat deze kunststoffen niet onder de producentenverantwoordelijkheid vallen (KIDV, 2016a). Volgens schattingen van het KIDV bestond 8,8% van het restafval in 2013 uit plastic verpakkingen, en 5% uit plastic niet-verpakkingen. Van deze 5% bestond vervolgens de helft uit vuilniszakken.

2.2.1 Uitval uit recyclingketens

Op verschillende plekken in de kunststofketen valt materiaal uit (Figuur 4). Uitvallen vinden plaats bij de sortering van zowel brongescheiden materiaal (PMD, Plastic Heroes) als kunststoffen uit nascheiding (OMRIN, Attero). Daarnaast valt er ook materiaal uit bij de verwerker/recycler van gesorteerde kunststoffen. Het betreft hier dus stromen van (bijna) puur kunststof die niet belanden in (mechanisch gerecycled) kunststofrecyclaat, maar mogelijk wel chemisch gerecycled kunnen worden.

In Tabel 2 wordt de geschatte samenstelling van het uitval uit recyclingketens weergegeven (CE Delft, 2018a). Omdat PS en PVC nu niet ingezameld worden voor recycling worden deze typen kunststof ook niet teruggevonden in de uitval.

Tabel 2 - Uitval plastics uit recyclingketens voor zowel bron- als nascheiding, kton/jaar, schatting voor 2015 (CE Delft, 2018a)

Type	Hoeveelheid (kton/jaar)
LDPE	19,2
HDPE	6,9
PP	8,0
PET	13,4
PVC	0,0
PS	0,0
Overig	4,3
Totaal	**51,8**

De totale uitval uit recyclingketens komt met bovenstaande gegevens uit op ca. 52 kton per jaar. Dit is 14% van de kunststof huishoudelijke verpakkingen. Uit nascheiding valt zo'n 36 kton uit, voor bronscheiding is dit ongeveer 15 kton. Daarnaast valt er nog een (zeer) kleine hoeveelheid uit in de statiegeldketen.

Veel groter is de fractie van kunststof afkomstig uit gemeenten met een bronscheidingssysteem die uiteindelijk verbrand wordt. Deze fractie is vermengd met restafval. Dit gaat om 195 kton (51%). De geschatte samenstelling van deze fractie is hieronder weergegeven.

Tabel 3 - Geschatte samenstelling kunststof dat vermengd is met restafval uit gemeentes met bronscheidingssystemen en niet gerecycled wordt

Type	Hoeveelheid (kton/jaar)
LDPE	75
HDPE	35
PP	35
PET	35
Overig kunststof	13
Totaal	**195**

Deze stroom is op dit moment niet direct beschikbaar voor chemische recycling. Wel is er in Rijksafvalbeleid een duidelijke trend richting meer nascheiding en voorsortering bij AEC's. Hierdoor zal een deel van deze stroom tussen 2020-2030 terechtkomen bij sorteerder en recyclers, waar ook uitvallen zullen plaatsvinden. Hiervan zal vervolgens een deel chemisch gerecycled kunnen worden.

2.2.2 Lastig te recyclen monostromen

Op dit moment wordt de grootste lastig-te-recyclen monostroom kunststof uit huishoudens gevormd door PET-trays. Dit is een verzamelnaam voor PET-verpakkingen niet zijnde flessen en flacons, zoals schalen, bekers en *clamshells*. Deze stroom laat zich moeilijk recyclen met conventionele (mechanische) recycletechnieken (KIDV, 2016b). Hiervoor zijn verschillende redenen; zo ontstaan er bij het versnipperen van PET-trays vaak kleine delen die verloren gaan, kunnen verschillende lagen PET en PE bij trays moeilijk gescheiden worden, en kan er bij recycling geen onderscheid gemaakt worden tussen PET-trays voor food en PET-trays voor non-food (KIDV, 2016b).

Eén mogelijkheid is om de PET-trays als bij-stroom in te zetten bij de recycling van PET-flessen. Hierbij geldt een bovengrens voor de hoeveelheid PET-trays. Daarnaast kan de gesorteerde PET-tray-stroom worden gerecycled als onderdeel van de mix-kunststofstroom. Ook hier geldt een bovengrens.

Door deze omstandigheden hebben voorraden gesorteerde PET-trays zich opgestapeld bij sorteer-bedrijven en nascheiders.

Volgens schattingen van het KIDV bestaat het volume PET-traysverpakkingen op de Nederlandse markt uit ca. 30 kton/jaar (KIDV, 2016b). We nemen aan dat deze stroom naar verhouding verdeeld is over kunststof verpakkingen uit huishoudens en KWD-afval.

Andere moeilijk te recyclen stromen zijn PVC-verpakkingen en laminaten zoals gebruikt voor chipszakken. Voor laminaten zijn technieken in ontwikkeling die d.m.v. compatibilisatoren de verschillende materialen uit elkaar halen. Deze technieken zijn nog niet meegenomen in de analyse.

2.2.3 Mixed plastic stromen

Een groot deel van alle ingezamelde huishoudelijke kunststof verpakkingen komen uiteindelijk terecht in de 'mix kunststoffen' stroom na sortering: de DKR 350-stroom. Tabel 4 geeft de verdeling over de verschillende DKR-kwaliteiten van kunststof verpakkingen van huishoudens weer.

Tabel 4 - Verdeling DKR stromen in Nederland in 2015 (CE Delft, 2018a)

Kunststofsoort	DKR stroom (kton/jaar)
LDPE (DKR 310)	32,8
HDPE (DKR 329)	10,6
PP (DKR 324)	14,9
PET-schalen/overig (KIDV spec)	0,0[2]
PET-flessen (DKR 328 en statiegeld)	34,0
Overig kunststof (DKR 350)	54,1
Totaal	**146,5**

In deze analyse wordt de 54,1 kton DKR 350 kunststof gezien als eventuele input voor chemische recycling. De reden hiervoor is dat de recycling van dit materiaal gezien kan worden als relatief laagwaardige recycling. Het geproduceerde materiaal wordt voornamelijk gebruikt in dikwandige toepassingen zoals bankjes, tafels en tegels. Door deze fractie chemisch te recyclen zouden kunst-stoffen geproduceerd kunnen worden van hogere (virgin) kwaliteit. Mogelijk scoren dergelijke processen ook beter op CO_2-emissies.

De precieze samenstelling van deze stroom is niet bekend. Wel gelden er voor deze stroom, zoals voor elke DKR-stroom, vastgestelde specificaties: zo is er een maximale vervuiling van 10% toegestaan, en geldt er een maximale vervuiling door PET-flessen van 4%.

[2] Op 16 juni 2016 heeft het KIDV een nieuwe specificatie met kwaliteitseisen voor PET-trays gepubliceerd. In 2015 bestond deze eis nog niet, waardoor de hoeveelheid PET-schalen in bovenstaande tabel op 0 staat. Zie voor achtergrondinformatie (KIDV, 2016c).

2.3 Overige stromen in Nederland

2.3.1 KWD-sector

In Nederland helpt het programma VANG Buitenshuis de kantoor-, winkel- en dienstensector (KWD-sector) met het verminderen van de hoeveelheid afval die niet gerecycled wordt. In deze sector komt jaarlijks 2 Mton restafval vrij met een samenstelling gelijk aan huishoudelijk afval (Stimular, 2016). Als we uitgaan van een gemiddelde samenstelling van het restafval zoals in Figuur 5 bestaat deze stroom voor 14% uit kunststoffen. Dit zou gaan om 280 kton kunststoffen als input voor recycling[3].

Figuur 5 - Gemiddelde samenstelling van het Nederlands huishoudelijk restafval

Over de precieze samenstelling van deze kunststoffen is geen informatie beschikbaar. We gaan er daarom van uit dat deze samenstelling gelijk is aan de kunststof samenstelling van huishoudelijk afval bij bron- en nascheiding (zie Tabel 5).

[3] Andere, wat oudere, bronnen noemen hoeveelheden die lager zouden liggen. Zo noemt (Berenschot , 2012) een afdank-volume van verpakkingen uit de industrie van 168-216 kton. Het is echter uit deze rapportage niet duidelijk wat de achter-liggende bronnen zijn, of om wat voor type industrie het gaat. Hierdoor is gekozen om uit te gaan van de inschatting die gebaseerd is op de inschatting van (Stimular, 2016) gecombineerd met de gemiddelde samenstelling van het Nederlands huishoudelijk restafval.

Tabel 5 - Benadering samenstelling kunststoffractie uit KWD-sector. Gebaseerd op samenstelling kunststoffractie huishoudelijk afval

Kunststofsoort	Gewichtspercentage in kunststoffractie huishoudelijk afval
Folies	38%
HDPE	16%
PP	18%
PET	21%
Overige kunststof	7%
Totaal	**100%**

Als we aannemen dat deze fracties ook gesorteerd worden door middel van bron- of nascheiding, zullen er ook uitvallen plaatsvinden. Hierbij geldt de aanname dat de uitvallen tijdens de recycling-keten, net als bij kunststof verpakkingen uit huishoudens, zo'n 14% zullen zijn.

Tabel 6 - Benadering hoeveelheid uitval in recyclingketen van kunststofafval uit KWD-sector

Kunststofsoort	Hoeveelheid uitval uit KWD-sector (kton/jaar)
Folies	14,9
HDPE	6,4
PP	7,2
PET	8,1
Overige kunststof	2,6
Totaal	**39,2**

2.3.2 EPS uit bouwsector

Solvolyse is een chemische recyclingtechniek in ontwikkeling die voornamelijk gericht is op de verwerking van broomhoudend EPS. Om een inschatting van de klimaatimpact van deze technologie op te stellen brengen we deze stroom inputmateriaal in deze paragraaf kort in kaart.

Volgens (DPI Value Centre, 2011) wordt er in Nederland jaarlijks 12 kton EPS-verpakkingen door zowel het MKB als bij consumenten op de markt geïntroduceerd. Andere (recentere) bronnen melden hoeveelheden van 12,5 kton en 14 kton per jaar (RIVM, 2015) (Consultic, 2013). Gemiddeld zal de huidige hoeveelheid EPS in verpakkingen van consumenten en het MKB rond de 13 kton/jaar zijn. Deze hoeveelheid kan mechanisch gerecycled worden en bevat geen broomhoudende vlamvertragers (HBCDD). Hiermee valt deze stroom buiten de scope van deze studie.

De hoeveelheden EPS die in de bouw gebruikt worden zijn veel groter, maar er komt ook veel minder materiaal vrij. Volgens het RIVM bestaat het EPS dat in Nederland als afval vrij komt bestaat uit twee hoofdstromen, circa twee derde verpakkingsafval en een derde isolatiemateriaal uit de bouw. Deze laatste stroom bestaat dus uit ~6,5 kton EPS. Dit materiaal bevat HBCDD en is daarom vooral geschikt voor solvolyse.

Het totaal aan EPS in Nederland uit zowel de bouw als uit verpakkingsafval komt hiermee neer op ~19,5 kton.

Bronnen geven niet direct uitsluitsel over de huidige verwerking van deze stromen. (RIVM, 2015) noemt dat deze stroom ”grotendeels eindigt in de verbrandingsoven”. Dit wordt ondersteund door (Chemie Magazine, 2016); hierin wordt beschreven dat de broomhoudende verbinding hergebruik lastig maakt, en dat een groot deel van het EPS daardoor verbrand wordt. Dit is dan ook gekozen als referentie voor de verwerking van de ~6,5 kton broomhoudend EPS uit de bouw.

PET DKR-328 en EPS

In deze studie wordt magnetische depolymerisatie in de eerste plaats gezien als techniek voor het verwerken van PET-trays, waarvoor op dit moment nog geen geschikte recyclingtechniek beschikbaar is. Deze techniek is ook toepasbaar op andere PET-stromen, zoals de DKR 328-1 stroom, die op dit moment goed mechanisch recyclebaar zijn. Hierbij heeft magnetische depolymerisatie als voordeel t.o.v. mechanische recycling dat de output in de toekomst waarschijnlijk gebruikt kan worden voor food-grade-verpakkingen. Ook neemt de kwaliteit van het geproduceerde PET niet af bij meerdere recycleloops, in tegenstelling tot mechanische recycling. Hetzelfde geldt voor solvolyse: deze techniek wordt gezien als oplossing voor vervuilde EPS-stromen die niet mechanisch gerecycled kunnen worden, en niet als toepasbaar op EPS uit consumentenafval. De techniek heeft vergelijkbare voordelen als magnetische depolymerisatie.

De hoeveelheid DKR-328-1 die jaarlijks in Nederland beschikbaar is wordt geschat op 34 kton (CE Delft, 2018a). Over de stroom EPS is minder bekend; voor deze hoeveelheid is in deze studie een schatting gemaakt van 19,5 kton (zie Paragraaf 2.3.2). Beide stromen zouden in theorie ook d.m.v. chemische recycling verwerkt kunnen worden. Op dit moment heeft mechanische recycling de voorkeur.

2.4 Stromen in buurlanden België, Duitsland en Verenigd Koninkrijk

2.4.1 België

In 2015 werd er in België jaarlijks 340 kton kunststof verpakkingsafval geproduceerd (StatBel, 2017). Hiervan werd 145 kton (43%) gerecycled, en 177 kton (52%) gebruikt voor energieproductie via verbranding.

In België ligt volgens OVAM 40-50 kton kunststofafval opgeslagen. Het gaat om een type gesorteerde stromen dat voorheen naar China werd geëxporteerd voor recycling (De Standaard, 2017). Dit is eventueel een relevante stroom voor chemische recycling in Nederland. Het is echter niet duidelijk of deze stroom bestaat uit huishoudelijk plastic afval, of (deels) uit bedrijfsafval. Daarnaast vermeldt de bron niet over welke periode deze hoeveelheid zich verzameld heeft, en is het hierdoor niet mogelijk terug te rekenen tot een jaar.

2.4.2 Duitsland

In 2014 werd er in heel Duitsland ca. 3.000 kton kunststof verpakkingsafval geproduceerd (Schüler, 2016). Hiervan werd 1.450 kton verbrand met energieterugwinning. Na sortering wordt gerapporteerd dat er ~1.500 kton kunststof verpakkingsafval beschikbaar is voor recycling. In deze stroom wordt een vervuiling van 15 tot 30% toegestaan. Hierdoor ligt de uiteindelijke hoeveelheid geproduceerd recyclaat ongeveer tussen de 1.000 en 1.300 kton (35-43%).

2.4.3 Verenigd Koninkrijk

In het Verenigd Koninkrijk werd in 2014 ca. 3.700 kton aan kunststof gebruikt (WRAP, 2016). Hiervan is 2.220 kton verpakkingsmateriaal. Er wordt gerapporteerd dat van het verpakkingsmateriaal ~850 kton (38%) wordt uitgesorteerd voor recycling (Eurostat, 2017). In deze stroom is nog 8% vervuiling in de vorm van labels, tape, en doppen aanwezig. Uiteindelijk is de hoeveelheid kunststof die in geproduceerd recyclaat terechtkomt daardoor 775 kton. Van de 850 kton verzameld verpakkings-

materiaal werd ca. 40% in de UK verwerkt en 60% (~510 kton) geëxporteerd (WRAP, 2016), met name naar China. Deze export naar China bestaat grotendeels uit PE (Velis, 2014), vermoedelijk omdat bijv. PET-flessen wel in het Verenigd Koninkrijk gerecycled worden. We nemen hier daarom aan dat de stroom van 510 kton bestaat uit gemengde kunststoffen, en er dus geen stroom puur PET-afval (bijv. trays) bestaat.

2.5 Totale beschikbaarheid kunststofafval richting 2030

De voorgaande paragrafen geven de hoeveelheden kunststofafval weer die mogelijk chemisch gerecycled kunnen worden. Deze informatie komt uit verschillende bronnen en geldt voor verschillende jaartallen (2014, 2015 en 2016). Er wordt hier aangenomen dat deze getallen geldig zijn voor de situatie in 2015. Om resultaten voor 2020 en 2030 te presenteren (Hoofdstuk 5), schatten we hier de te verwachten groei in kunststof afvalstromen. In 2020 zou op z'n vroegst een start gemaakt kunnen worden met chemische recycling; Enerkems waste-to-chemistry-installatie zou bijvoorbeeld dan gerealiseerd kunnen zijn in de haven van Rotterdam (AkzoNobel, 2018). Daarnaast is 2030 gekozen aangezien dat het uitgangspunt is voor het klimaatbeleid van het kabinet-Rutte III.

Om de ontwikkelingen tot 2020 en 2030 te schetsen worden drie parameters gevarieerd: de groei van de algehele kunststofmarkt, ontwikkelingen in de inzamelingssystemen, en mogelijke import van kunststofafval uit buurlanden. Deze zijn weergegeven in Tabel 7. Voor het jaar 2020 wordt de huidige situatie geëxtrapoleerd (bijv. wat betreft groei van de markt) zonder radicale veranderingen.
Voor 2030 onderzoeken we twee cases: een optimistische case waarin veel materiaal voor chemische recycling beschikbaar is, en een conservatievere case waarin op basis van behoudendere aannames de hoeveelheid bepaald wordt. We lichten de parameterkeuzes kort toe.

De **groei van de kunststofmarkt** bedroeg mondiaal ca. 3,7% per jaar over de afgelopen 15 jaar (PlasticsEurope, 2017), maar het is denkbaar dat de groei in West-Europa lager lag dan in opkomende economieën. Voor Nederland gaat de recente VNCI Routekaart uit van een groei van ca. 1,5%/jaar[4] voor de gehele chemie voor de periode 2012-2030 (Stork, et al., 2018). Tot 2020 volgen we deze waarde. Voor de periode 2020-2030 passen we deze met 50% aan naar beneden (conservatieve case) of naar boven (optimistische). Dit geldt ook voor de West-Europese buurlanden. De conservatieve case gaat daarbij uit van een rem op de economische groei; de positieve case gaat juist uit van verhoogde productie door een gunstig economisch klimaat.

Zoals aangegeven in Paragraaf 2.2 is het rendement van de **kunststofinzameling** nog niet perfect. Ongeveer 50% van de kunststof verpakkingen die door huishoudens gebruikt worden belandt in het restafval (195 kton van de 381 kton; Figuur 4). Deze situatie kan verbeterd worden als consumenten hun afval beter scheiden, of door zelfs in gemeenten met bronscheiding een nascheidingsstap toe te voegen.

In de optimistische case voor 2030 nemen we aan dat het bovengenoemde percentage afneemt tot 25% door verbeteringen in het inzamelingssysteem. Praktisch betekent dit dat er een grotere hoeveelheid kunststoffen terechtkomt bij sorteerders en verwerkers, waardoor ook de hoeveelheid uitvallen op deze plekken groter wordt. Hiervoor is gerekend met het eerder percentage uitval over de gehele keten, met daarbij de aanname dat deze hoeveelheid zich gelijk verdeelt over bron- en nascheiding.

[4] Waarde gebaseerd op de CO_2-emissies die in de Routekaart gekoppeld worden aan het niet-energetisch gebruik van brandstoffen in de chemiesector.

Tot slot wordt rekening gehouden met de mogelijkheid tot het importeren van **kunststofafval uit buurlanden**. Dit geldt alleen voor het optimistische scenario; in het conservatieve scenario wordt geen import meegenomen. Bij het bepalen van de hoeveelheden is gekeken naar dezelfde afvaltypen (uitvallen, DKR-350) uit Duitsland, België en het Verenigd Koninkrijk. We nemen aan dat de sortering van dit afval in deze landen op ongeveer dezelfde manier zal plaatsvinden als in Nederland, waarna de uitvallen en de mixed plastic stroom geïmporteerd worden naar Nederland[5]. Over de overige stromen, PET-trays en broomhoudend EPS, is geen informatie beschikbaar voor deze buurlanden. Deze stroom is daarom niet expliciet meegenomen in de vaststelling van de te importeren hoeveelheden. Verder is aangenomen dat maar een beperkt percentage van de totale hoeveelheid geproduceerd recycling-uitval en DKR 350 geïmporteerd kan worden door Nederland (bijvoorbeeld doordat landen het voordeliger zelf kunnen inzetten). Deze percentages zijn vastgesteld op 20% voor Duitsland, 20% voor België en 50% voor het Verenigd Koninkrijk.

Tabel 7 - Overzicht aannamen projecties voor kunststof hoeveelheden

Parameter	Periode	Case		Redenering
		Conservatief	Optimistisch	
Groei kunststofmarkt	2020	1,5 %/jaar		Gemiddelde uit VNCI-routekaart
	2030	1,0 %/jaar	2,2 %/jaar	VNCI-routekaart; +50% of -50%
Inzameling	2020	Huidige situatie		
	2030	Huidige situatie (50% verlies)	50% verbetering rendement kunststofinzameling (25% verlies)	Betere bronscheiding en extra nascheiding van restafval in gemeentes met bronscheiding zorgt voor forse verbetering inzameling. De kunststof-stromen die hieruit komen worden vervolgens hetzelfde behandeld als nu, met bijv. percentueel gelijkblijvend uitval.
Import kunststofafval uit buurlanden naar chemische recycling	2020	Geen		Neem aan dat er in 2020 geen imports van uitvallen en DKR-350 materiaal uit DE, BE, UK plaatsvinden om in NL chemisch gerecycled te worden.
	2030	Geen	BE: 20% DE: 20% UK: 50%	Door concurrentie met andere landen en andere technieken is het niet realistisch dat 100% van al het kunststofafval uit andere landen geïmporteerd kan worden. De UK heeft een hoger aandeel import toebedeeld gekregen, omdat nu al een groot deel (60%) geëxporteerd wordt, waarvan een deel naar NL.

Op basis van de voorgaande paragrafen en de twee cases voor 2030 geven Tabel 8 en Figuur 6 de geschatte hoeveelheid kunststof beschikbaar is voor chemische recycling aan voor 2020 en 2030.

[5] Hierbij geldt de aanname dat wet- en regelgeving deze import mogelijk maakt in 2030.

Tabel 8 - Indicatie kunststofstromen die mogelijk voor chemische recycling in Nederland ingezet kunnen worden, kt/jaar

Stroom	2020	2030 conservatief	2030 optimistisch - NL	2030 optimistisch - Import
Huishoudens				
Recyclinguitval	56	62	110	322
PET-trays	19	21	23	0
DKR 350	58	64	72	336
KWD				
Recyclinguitval	41	45	51	236
PET-trays	14	15	17	0
DKR 350	43	47	53	247
EPS uit bouwsector				
Broomhoudend EPS	7	8	9	0
Totaal				
Recyclinguitval	97	107	161	558
PET-trays	32	36	40	0
DKR350	101	112	126	583
Broomhoudend EPS	7	8	9	0

Figuur 6 - Indicatie materiaalbeschikbaarheid voor chemische recycling

2.6 Kanttekeningen beschikbare kunststof afvalstromen

De inschatting van de beschikbare kunststof afvalstromen kent een aantal onzekerheden en kanttekeningen:

- Er is hier op basis van specifieke stromen, waarvan de hoeveelheden, samenstelling en huidige verwerking bekend zijn, een inschatting gemaakt van hoeveel kunststofafval er voor chemische recycling beschikbaar is. Er is echter nog meer kunststofafval beschikbaar in Nederland (bijv. vermengd in restafval). In het kader aan het eind van Hoofdstuk 5 wordt hier verder naar gekeken.
- Het is geen zekerheid dat de hier besproken stromen hoe dan ook voor chemische recycling ingezet zullen worden. Uitvoerders van andere verwerkingstechnieken kunnen mogelijk ook geïnteresseerd zijn in deze kunststof afvalstromen. Hierbij is te denken aan technieken die afval omzetten in (hoogcalorischere) brandstoffen maar ook aan technieken voor mechanische recycling, die ook doorontwikkeld worden.
- Niet alle soorten kunststofproducten die na afdanking mogelijk ingezet kunnen worden voor chemische recycling zijn hier onderzocht. Een belangrijk deel van de hoeveelheden is gebaseerd op gegevens die alleen gelden voor verpakkingen. Verpakkingen vormen slechts een deel (~40%) van het totale gebruik van kunststoffen.
- Op 3 april 2018 is in de Tweede Kamer een motie van Kamerleden Van Eijs en Agnes Mulder aangenomen die betrekking heeft op het uitbreiden producentenverantwoordelijk naar andere productgroepen. Deze uitbreiding zou beginnen bij wegwerpproducten, meubels en textiel. Een dergelijke uitbreiding zou de hoeveelheden van deze stromen beter inzichtelijk maken.
- De Europese Commissie heeft recent een voorstel gepresenteerd waarin een verbod op het gebruik van een aantal plastic wegwerpartikelen wordt voorgesteld. Dergelijke beleidsontwikkelingen kunnen gevolgen hebben voor de hoeveelheden kunststoffen als input voor chemische recycling.
- De gerapporteerde hoeveelheden met betrekking tot de import van kunststof verpakkingen uit buitenland zijn gebaseerd op grove schattingen. In een verder stadium zouden de hoeveelheden en onderliggende aannamen (20% BE, 20% DE, en 50% UK) kunnen worden aangescherpt.

3 Beschikbare technieken chemische recycling

De kunststofafvalstromen die in Hoofdstuk 2 geïdentificeerd zijn kunnen op verschillende manieren chemisch gerecycled worden. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de geselecteerde technieken en de gebruikte referenties.

Aangezien de technieken voor chemische recycling in ontwikkeling zijn en nog zeer beperkt worden toegepast[6] is er weinig gedetailleerde informatie over hun inputs, outputs en milieuprestaties beschikbaar. We richten ons daarom hier op een subset van technieken waarvoor al eerder *screening* levenscyclusanalyses (LCA's) uitgevoerd zijn, zodat in Hoofdstuk 4 en 5 de milieukundige consequenties van chemische recycling uitgewerkt kunnen worden. Een uitgebreider overzicht is te vinden in Bijlage A.

3.1 Geselecteerde technieken en referenties

Tabel 9 geeft een overzicht van de geselecteerde technieken voor chemische recycling en de referenties, die overeenkomen met hoe de afvalstromen op het moment verwerkt worden. Zoals ook aangegeven in Bijlage A hangt de toepasbaarheid van een techniek (en daarmee de benodigde inputs/outputs en milieuprestaties) af van de exacte samenstelling (polymeertypes, vervuiling) van een kunststof afvalstroom. Er wordt er hier van uitgegaan dat de afvalstroom een geschikte samenstelling heeft om verwerkt te worden met de genoemde technieken.

Tabel 9 - Overzicht geselecteerde afvalverwerkingstechnieken

Groep	Techniek	Afvalstroom	Producten
Chemische recycling	Conventionele pyrolyse	Recyclinguitval, DKR 350	Syngas, MGO diesel
	Geïntegreerde hydropyrolyse	Recyclinguitval, DKR 350	MGO diesel, syngas
	Lagetemperatuurvergassing	Recyclinguitval, DKR 350	Syngas
	Mediumtemperatuurvergassing	Recyclinguitval, DKR 350	Syngas
	Magnetische depolymerisatie	PET	BHET[7]
	Solvolyse	Broomhoudend EPS	PS, Broom
Referenties (huidige verwerking)	Verbranding	Recyclinguitval, broomhoudend EPS	Elektriciteit, warmte
	Mechanische recycling PET	PET	rPET
	Verwerking mix DKR stroom	DKR 350	Kunststofrecyclaat, warmte

[6] Volgens PlasticsEurope werd in 2016 alleen in Duitsland ongeveer 1% van de kunststof verpakkingen in afvalstromen chemisch gerecycled (PlasticsEurope, 2017).

[7] Voorganger in de productieketen van PET.

3.2 Chemische recycling

3.2.1 Conventionele pyrolyse

Pyrolyse is de verwarming van inputmateriaal zonder zuurstof op een temperatuur tussen de 400 en 600°C. Hierbij kan omzetting plaatsvinden pyrolyseolie (o.b.v. biomassa, banden) of kerosine/diesel-achtige brandstof (o.b.v. plastics en afvalolie), syngas, zouten en metalen, organische zuren en koolstof/char. De verhouding en kwaliteit van deze producten hangt af van de specifieke techniek en de samenstelling van de input. Eerste generatie pyrolyseprocessen hebben meer last van stoorstoffen zoals te veel PET en PVC dan tweede generatie processen, de kwaliteit van de olie of brandstof is bij tweede generatie pyrolyse vaak ook hoger.

Er bestaat wereldwijd een groot aantal grootschalige commerciële pyrolyse installaties. Voor de specifieke toepassing van het omzetten van plastic tot olie zijn wereldwijd momenteel 87 installaties operationeel (Ricardo Energy & Environment, 2017). Verschillende installaties richting zich specifiek op de productie van biofuels uit biomassa d.m.v. pyrolyse, of, zoals bijv. BioGreen Energy, op de verwerking van RDF/SRF. De schaal varieert sterk; van 10-150 kton/jaar. Op kunststofafval van huishoudens wordt de techniek (nog) niet op grote schaal toegepast.

In de VNCI-Routekaart 2050 wordt de emissiereductieprijs van pyrolyse op 130 €/ton CO_2 ingeschat (Stork, et al., 2018).

Tabel 10 - Kenmerken pyrolyse

Naam techniek	Input	Output	TRL
Pyrolyse (eerste en tweede generatie)	Geschikt: Gescheiden kunststoffen (PE, PP), RDF, Residustromen uit recycling. Minder geschikt: PUR, PS. Lastig: PET, nylon, PVC.	Laagwaardige brandstoffen (lampolie, kerosine)Syngas.	8

3.2.2 Geïntegreerde hydropyrolyse

Geïntegreerde hydropyrolyse is een geavanceerde vorm van pyrolyse, waarbij een brandstof van hogere kwaliteit wordt geproduceerd. Het verschil met conventionele pyrolyse is dat het kraakproces plaatsvindt in de aanwezigheid van water. De temperatuur ligt ongeveer tussen de 300-600°C.

De geïntegreerde hydropyrolyse techniek is beter geschikt voor wisselende heterogene input dan conventionele pyrolyse, en ook minder gevoelig voor geoxygeneerde plastics (PET). Hierdoor is hydropyrolyse in theorie een afvalwerkingstechniek die op een groot deel van brandbare huisvuilstromen kan worden toegepast. Niet-recyclebaar plastic afval en biomassa-afval vormen geschikte inputs. In de praktijk vinden nu vooral toepassingen plaats in niches, die zich richten op een specifieke afvalstroom zoals B-hout, slibverwerking of bermgras.

De schaal varieert sterk van 10-150 kton/jaar. De IH2-technologie van Shell is een voorbeeld van een grootschalige installatie die in ontwikkeling is voor de verwerking van biomassa en huishoudelijk afval in India. De verwachting is dat realisatie nog enkele jaren zal duren.

De outputstromen zijn olie (laag zwavelgehalte, inzetbaar als Marine Gas Oil (MGO)), syngas en een klein aandeel zouten en metalen. De geproduceerde char wordt intern verwijderd en gebruikt als energiebron. De verhouding tussen deze drie producten en de kwaliteit van het vloeibare product is sterk afhankelijk van de input samenstelling en de specifieke gehanteerde technologie. Dit levert in de regel betere businesscases op met biomassahoudende afvalstromen.

Tabel 11 - Kenmerken Geïntegreerde hydropyrolyse (derde generatie)

Naam techniek	Input	Output	TRL
Geïntegreerde hydropyrolyse (derde generatie)	Geschikt: gescheiden kunststoffen (PE, PP, PUR, PS), RDF, Residustromen uit recycling. Lastig: PET, nylon, PVC, maar geschikt voor groter aandeel dan conventionele pyrolyse.	Pyrolyseolie van hogere kwaliteit: hogere calorische waarde, neutrale pH, laag zwavelgehalte. Toepassingen: drop-in fuel (EN-95, best case), feedstock voor MGO Syngas.	5-7

3.2.3 Lagetemperatuurvergassing

Vergassing is het verwarmen (~800-1.000°C) van materiaal met toevoer van zuurstof. De brandstof wordt bij vergassing afgebroken tot de kleinste moleculaire bouwstenen: H_2 en CO. Deze combinatie van bouwstenen wordt syngas genoemd (van synthetisch gas). Er bestaan veel verschillende varianten van vergassing, die plaatsvinden in verschillende soorten installaties zoals bijv. wervelbedvergassing. Lagetemperatuurvergassing wordt vooral toegepast op biomassahoudende afvalstromen. Er zijn ook voorbeelden van installaties die zich richten op huishoudelijke afvalstromen, en die met name gericht zijn op de productie van energie. Het geproduceerde syngas wordt hierbij direct ingezet in WKK.
De New Energy lagetemperatuurvergassingsinstallatie in Karratha (Australië) is hier een voorbeeld van.

Tabel 12 - Kenmerken lagetemperatuurvergassing

Naam techniek	Input	Output	TRL
Lagetemperatuur-vergassing	Plastics: Kan gevoelig zijn voor fluctuaties in samenstelling en vochtgehalte	Syngas (niet direct geschikt voor W2C-toepas-singen; wel voor energietoepassingen)	5-7

3.2.4 Mediumtemperatuurvergassing

Mediumtemperatuurvergassing produceert een syngas van hogere kwaliteit dan bij lagere temperatuurvergassing. Verder is het proces vergelijkbaar opgebouwd. Ook hier bestaan er veel varianten: o.a. stofwolkvergassing en wervelbedvergassing. De temperatuur loopt doorgaans op tot tussen 900 en 1.650°C.

Het Europese Joint Research Center (JRC) is positief over de techniek en noemt de hoge energie-efficiëntie en de brede toepasbaarheid op verschillende soorten afval (JRC, 2016). Wel is nog wat onzeker in hoeverre gemengde huisvuilstromen gesorteerd of voorbewerkt moeten worden voor het gebruik als input voor deze techniek.

Het Canadese bedrijf Enerkem past wervelbedvergassing techniek commercieel toe in Quebec.
Hier worden biobrandstoffen en biobased chemicaliën geproduceerd uit biomassahoudend gemengd huisvuil. In Nederland is een samenwerkingsverband tussen AkzoNobel, Van Gansewinkel, Enerkem en andere partijen opgezet voor de realisatie van een installatie in Rotterdam.

Tabel 13 - Kenmerken mediumtemperatuurvergassing

Naam techniek	Input	Output	TRL
Mediumtemperatuur-vergassing.	Plastics: minder gevoelig voor fluctuaties in samenstelling.	Syngas (geschikt voor W2C-toepassingen na H_2-correctie).	8

3.2.5 Magnetische depolymerisatie

De Nederlandse startup Ioniqa heeft een techniek ontwikkeld waarbij afval-PET chemisch gedepolymeriseerd wordt onder invloed van een magnetische vloeistof. Hierbij wordt de grondstof BHET geproduceerd: PET-monomeren in kristalvorm. BHET kan vervolgens door bestaande producenten worden ingezet als grondstof in de productie van PET. In het proces worden diverse kleurstoffen en andere vervuiling in de input verwijderd, wat leidt een hoogwaardige grondstof die gelijk is aan de fossiele, 'virgin' grondstof voor PET. Deze techniek is, in tegenstelling tot mechanische recycling, geschikt voor de geïdentificeerde stroom PET-trays van ~30 kton.

Hoewel de techniek nog in ontwikkeling is, werkt Ioniqa aan de realisatie van een productiefaciliteit van 10.000 ton/jaar in 2019. Dit zou later opgeschaald worden tot 50.000 ton.

Tabel 14 - Kenmerken magnetische depolymerisatie

Naam techniek	Input	Output	TRL
Magnetische depolymerisatie	PET	BHET	5

3.2.6 Solvolyse

Bij solvolyse worden kunststoffen in een oplosmiddel (solvent) gebracht, waarna de polymeerketens teruggewonnen kunnen worden. De non-profit organisatie 'PolyStyrene Loop', een initiatief van een aantal EPS-verwerkers, recyclers en producenten, heeft het initiatief genomen voor de bouw van een pilotinstallatie waar EPS-producten worden gerecycled en de gebruikte broomhoudende vlam-vertragers worden teruggewonnen. Dit wordt gedaan d.m.v. het CreaSolv solvolyse proces zoals ontwikkeld door Fraunhofer. Dit is een natuurkundig proces waarbij het EPS wordt opgelost in een solvent en vervolgens gescheiden wordt van andere stoffen die aanwezig zijn in de input, zoals bijvoorbeeld broom. Hierbij ontstaat PS. Momenteel wordt er in Terneuzen gewerkt aan een pilot-installatie die zich zal richten op EPS-stromen die eerder niet gerecycled werden.

Tabel 15 - Kenmerken solvolyse

Naam techniek	Input	Output	TRL
Solvolyse	Broomhoudend EPS	PS, Broom	5

3.3 Referentieverwerkingstechnieken

3.3.1 Verbranding in AEC

Rejects (uitvallen) uit kunststofrecycling worden momenteel in Nederland verbrand in afval-energiecentrales (AEC's) (CE Delft, 2018a). Ook broomhoudende EPS-stromen uit de bouw worden verbrand.

Nederlandse AEC's winnen bij de verbranding energie terug in de vorm van warmte en elektriciteit. Het gemiddelde nettorendement is 43%, waarvan warmte 28% bijdraagt en elektriciteit 15%.

3.3.2 Mechanische recycling PET

Als referentie voor de chemische recycling van lastig-te-recyclen monostromen (PET-trays) is gekozen voor mechanische recycling.

Deze referentie is niet volledig realistisch. Zoals eerder gemeld worden PET-trays momenteel helemaal niet verwerkt, maar grootschalig opgeslagen tot het punt van verder verwerking (KIDV, 2016b). Er zijn echter mechanische recycling technieken in ontwikkeling die het mogelijk maken de PET-trays wel te verwerken. Een voorbeeld hiervan is 4PET, dat meldt in juni 2018 te beginnen met de verwerking van PET-trays. Dergelijke technieken vergen vermoedelijk echter wel meer energie en/of andere inputs dan de huidige mechanische recycling.

3.3.3 Verwerking DKR 350

De gemengde plasticstroom (DKR 350) die uit kunststof van huishoudens wordt geproduceerd wordt momenteel vooral in Duitsland verwerkt. Deze wordt gewassen en omgezet tot kunststofrecyclaat, dat voornamelijk wordt toegepast in dikwandige toepassingen (CE Delft, 2018a). Dit is bijvoorbeeld tuinmeubilair, tegels en bermpaaltjes. Volgens onderzoek van TNO vervangt dit recyclaat voor ¼ beton, ¼ kunststof, ¼ staal, 1/8 tropisch hardhout, en 1/8 geïmpregneerd hout (TNO, 2017).
Een klein deel van de DKR 350-stroom wordt niet omgezet tot recyclaat maar belandt in cementovens.

4 Milieubeoordeling

In dit hoofdstuk wordt de verwachte klimaatimpact van de geselecteerde chemische recycling-technieken gepresenteerd. We bespreken kort de methode (Paragraaf 4.1) en vervolgens de resultaten (Paragraaf 4.2).

4.1 Methode: screening LCA

We maken hier gebruik van een screening LCA, een versimpelde analyse die een eerste indicatie geeft van de klimaatimpact van technieken die nog in ontwikkeling zijn.

De resultaten zijn grotendeels afgeleid van eerdere studies op basis van grove informatie over de massabalans bij de verwerking van 1 ton plastic afval. Voor chemische recycling (excl. solvolyse) is gebruik gemaakt van een onderzoek voor de Gemeente Rotterdam, waarin een screening LCA is uitgevoerd voor verschillende innovatieve technieken voor chemische recycling (CE Delft, 2017). Hierin is data over de inputs en outputs van de processen verzameld bij commerciële aanbieders van de technieken, aangevuld met literatuurdata en expertschattingen. Deze studie is in 2019 aangevuld met nieuwe inzichten uit vertrouwelijke projecten, waar o.a. een bandbreedte op de resultaten voor pyrolyse uit voortgekomen is. Voor de referenties is gebruik gemaakt van een recente update van de milieuanalyse van recycling van kunststof verpakkingen (CE Delft, 2018a) en interne CE Delft data. Voor solvolyse van PS is gebruik gemaakt van een indicatieve TNO-studie (TNO, 2017), die TNO geüpdate heeft voor de Roadmap Chemisch Recyclen van KIDV.

Vanwege het screeningkarakter van de studies en de verschillen in verwerkte afvalstromen dienen de resultaten als indicatief beschouwd te worden. De resultaten zijn onzeker omdat niet in alle gevallen data van processen op industriële schaal beschikbaar zijn, waardoor de benodigde inputs niet met volledige zekerheid vastgesteld kunnen worden.

Bovenstaande studies worden gebruikt om een indicatie te geven van de klimaatimpact van de verschillende vormen van kunststofverwerking. In de resultaten wordt een onderscheid gemaakt tussen twee onderdelen van de klimaatimpact:

- **Proces**: de klimaatimpact van broeikasgasemissies die worden uitgestoten bij het afval-verwerkingsproces zelf (chemische recycling of referentietechniek), en emissies die plaatsvinden bij het produceren en aanleveren van de gebruikte energie en hulpmiddelen voor het proces.
- **Vermeden producten/energie**: de klimaatimpact van conventionele productieprocessen die vermeden worden door het afvalverwerkingsproces. Een energievoorbeeld is de productie van elektriciteit in AEC's, die elektriciteitsopwekking in reguliere centrales voorkomt. Bij producten kan gedacht worden aan de productie van BHET-monomeren bij magnetische polymerisatie van PET-afval. Hierdoor hoeft er minder regulier PET geproduceerd te worden. Bij het berekenen van deze vermeden processen is rekening gehouden met de kwaliteit van de producten die de processen voor chemische recycling opleveren.

Andere milieueffecten dan klimaatverandering zijn niet meegenomen. Emissies die samenhangen met de inzameling en sortering van het kunststof vormen geen onderdeel van de scope.
De screening LCA-methode wordt verder toegelicht in Bijlage B.

4.2 Resultaten

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7, in ton CO_2-eq./ton input.

Figuur 7 - Indicatie klimaatimpact verwerkingsopties kunststofafval, ton CO_2-eq./ton input

Recyclinguitval wordt op het moment verbrand in AEC's. Dit levert een totale klimaatimpact op van ca. 1,5 ton CO_2-eq./ton inputmateriaal. Chemische recycling van recyclinguitval resulteert in een klimaatimpact tussen de 0 en -0,5 ton CO_2-eq./ton inputmateriaal. Ten opzichte van AEC's zijn de emissies gekoppeld aan het proces lager (alleen gebruik van energie, geen verbranding kunststof) terwijl er met name syngas en MGO diesel geproduceerd wordt. Door deze productie worden andere productieketens (aardgas, conventionele diesel) vermeden. De totale reductie in klimaatimpact komt daarmee op 1,5 tot 2,0 ton CO_2-eq./ton recyclinguitval.

Voor DKR 350, de mixed kunststofstroom die uit brongescheiden materiaal geproduceerd wordt, wordt de klimaatimpact van de technieken voor chemische recycling hetzelfde ingeschat als voor recyclinguitval. De referentie is echter anders. Het mechanisch recyclen van DKR 350 tot kunststofrecyclaat voor dikwandige toepassingen ('verwerking DKR 350') levert een klimaatimpact van ca. -0,5 ton CO_2-eq./ton inputmateriaal. Dit is onder andere het geval omdat de toepassing van het recyclaat het produceren van staal en virgin kunststof voorkomt. De reductie in klimaatimpact van chemische recycling ligt daarmee tussen de -0,5 ton CO_2-eq./ton DKR 350 (de klimaatimpact neemt toe) en 0 ton CO_2-eq./ton DKR 350 (klimaatimpact blijft gelijk).

Voor PET-afval resulteert mechanische recycling in een klimaatimpact van -2,3 ton CO_2-eq./ton, terwijl chemische recycling (magnetische depolymerisatie) uitkomt op -1,5 ton CO_2-eq./ton. In beide gevallen is het resultaat negatief omdat de productie van virgin PET voorkomen wordt. Bij deze vergelijking dient echter opgemerkt te worden dat mechanische recycling geen perfecte referentietechniek is voor de PET-trays (zie tekstkader).

De solvolyse-case is gebaseerd op milieuresultaten van een screening LCA zoals aangeleverd door TNO. Deze techniek scoort goed door de vermeden productie van PS en een relatief lage hoeveelheid toegevoegde energie in de vorm van stoom. Wel moet worden opgemerkt dat deze case een hoge mate van onzekerheid kent door de relatief lage staat van ontwikkeling. De referentie voor deze materiaalstroom is verbranding in een AEC.

PET-trays: meer verwerkingstechnieken vergeleken

In bovenstaande analyse wordt magnetische depolymerisatie van PET-trays vergeleken met mechanische recycling (o.a. Figuur 7). Zoals aangegeven in Paragraaf 3.3.2 is dit geen volledig realistische referentie. Op het moment worden PET-trays grootschalig opgeslagen. Deze situatie is niet oneindig houdbaar, waardoor PET wellicht uiteindelijk ook in AEC's belandt. Aan de andere kant zijn er technieken in ontwikkeling voor mechanische recycling van PET, maar is onbekend of deze afwijken van de conventionele mechanische recycling van PET (bijv. hoger energie- of materiaalgebruik).

In wordt daarom de klimaatimpact van deze verschillende opties weergegeven: AEC-verbranding, langdurige opslag, chemische recycling via magnetische depolymerisatie en (conventionele) mechanische recycling. Te zien is dat hoewel chemische recycling iets slechter scoort dan conventionele mechanische recycling, het wel degelijk een aanzienlijk verschil oplevert ten opzichte van opslag ('niets doen') en verbranding in AEC's.

Daarnaast kan hierbij opgemerkt worden dat er naast de klimaatimpact andere aspecten relevant kunnen zijn. Zo zorgt opslag niet voor klimaatimpact, maar levert het ook geen grondstoffen of energie op en kost het ruimte en geld. Daarnaast is het met chemische recycling waarschijnlijk mogelijk om het geproduceerde PET opnieuw in te zetten in food-grade toepassingen; dit zou een voordeel zijn t.o.v. mechanische recycling. Zulke overwegingen worden idealiter meegenomen bij het opstellen van plannen voor de aanpak van lastig te recyclen (kunststof)stromen.

Figuur 8 - Klimaatimpact verschillende opties voor verwerking afgedankt PET

5 Potentiële reductie klimaatimpact

In dit hoofdstuk schatten we voor 2020 en 2030 de potentiële reductie in klimaatimpact die gerealiseerd kan worden als de kunststof afvalstromen uit Hoofdstuk 2 chemisch gerecycled zouden worden. We lichten de analyse eerst kort toe (Paragraaf 5.1) en bespreken vervolgens de resultaten (Paragraaf 5.2).

5.1 Methode

De hoeveelheden kunststofafval voor 2020 en 2030 (optimistische en conservatieve cases) uit Tabel 8 in Hoofdstuk 2 worden als uitgangspunt genomen. We vergelijken de situatie waarin de drie soorten kunststofafval in de referentietechnieken verwerkt worden (zie ook Tabel 9) met de situatie waarin ze chemisch gerecycled worden. Voor chemische recycling pakken we hiervoor de techniek die milieu-kundig het beste scoort. Voor recyclinguitval en DKR 350 is dit geïntegreerde hydropyrolyse, voor PET-trays gaan we uit van magnetische depolymerisatie en voor broomhoudend EPS van solvolyse.

We berekenen het verschil in klimaatimpact tussen chemische recycling en referentieverwerking door uit te gaan van de resultaten uit Paragraaf 4.2. We kijken hierbij expliciet naar de locatie van de emissies (of waar emissies *vermeden* worden): binnen Nederland of in het buitenland. Hierdoor wordt duidelijk of de mogelijke emissiereducties in Nederland of in het buitenland vallen. De locaties zijn onzeker; het is bijv. niet exact bekend waar het PET-plastic dat Nederland gebruikt geproduceerd wordt en tussen nu en 2030 kunnen hier grote verschuivingen in plaatsvinden. In de resultaten dient de locatie van emissie(reductie)s daarom terughoudend geïnterpreteerd te worden.
Tabel 16 vat de opzet van de analyse (aangenomen technieken en locaties) samen.

Tabel 16 - Geselecteerde technieken en locaties voor referentieverwerking en chemische recycling

Kunststofstroom	Referentie		Chemische recycling	
	Techniek	Locatie	Techniek	Locatie
Materiaal uit Nederland				
Recyclinguitval	Verbranding (AEC)	Nederland	Hydropyrolyse (geïntegreerd, toekomst)	Nederland
PET-trays	Mechanische recycling	Nederland/buitenland[a]	Magnetische depolymerisatie	Nederland/buitenland[a]
DKR 350	DKR-verwerking	Buitenland[b]	Hydropyrolyse (geïntegreerd, toekomst)	Nederland[c]
Broomhoudend EPS	Verbranding (AEC)	Nederland	Solvolyse	Nederland/buitenland[a]
Geïmporteerd materiaal				
Recyclinguitval	Verbranding (AEC)	Buitenland	Hydropyrolyse (geïntegreerd, toekomst)	Nederland
DKR 350	DKR-verwerking	Buitenland	Hydropyrolyse (geïntegreerd, toekomst)	Nederland

a) Er is aangenomen dat mechanische recycling, magnetische depolymerisatie en solvolyse plaatsvinden in Nederland. Deze processen vervangen echter ook de productie van virgin PET en EPS. Er is aangenomen dat deze virgin productie voor 2/3e in Nederland plaatsvindt en voor 1/3e in het buitenland, op basis van CBS data over de import en Nederlandse productie van kunststoffen (CBS, 2017).
b) Momenteel wordt DKR 350 grotendeels in Duitsland verwerkt (TNO, 2017).
c) Pilotfabriek in ontwikkeling in Terneuzen: (NRK Recycling, 2018).

Bij deze analyse zijn een aantal aannames en algemene opmerkingen van belang:

- We nemen aan dat de geselecteerde technieken grootschalig ingezet kunnen worden en dat de geselecteerde kunststof afvalstromen geschikt zijn.
- We nemen aan dat de producten die bij de verwerking gemaakt worden in de markt afgezet kunnen worden (en daarmee dus andere productieketens vermijden). Er wordt zo bijvoorbeeld aangenomen dat al het syngas dat bij geïntegreerde hydropyrolyse geproduceerd zou worden ingezet kan worden in Nederland en conventionele productie voorkomt.
- De verschillen tussen 2020 en 2030 (twee cases) zijn puur gebaseerd op volume-effecten, d.w.z. op de hoeveelheid materiaal die de verwerkingsroutes ingaat. Andere mogelijke veranderingen zijn niet meegenomen. Hierbij is te denken aan:
    - veranderingen in elektriciteitsmix en andere productieketens over tijd;
    - technologische verschillen tussen landen (bijv. AEC's en hun efficiëntie);
    - efficiëntieverbeteringen over tijd.
- De klimaatimpact van transport bij het importeren van kunststofafval is niet meegenomen.
- Voor PET-trays is uitgegaan van mechanische recycling als referentie. Wat klimaatimpact betreft is dit een conservative benadering vanuit het oogpunt van chemische recycling (zie Paragraaf 4.2).

5.2 Resultaten

Figuur 9 toont de totale klimaatimpact van de referentieverwerking en chemische recycling voor 2020 en 2030 (conservatieve case en optimistische case). Voor elk van de drie situaties worden de resultaten voor de referentie en de resultaten voor de chemische recycling los weergegeven.
De bolletjes geven het verschil weer tussen chemische recycling en de referentieverwerking.

De grafiek laat zien dat bijvoorbeeld voor 2020 geschat wordt dat de referentieverwerking resulteert in 0,4 Mton CO_2-eq. aan procesemissies en -0,3 Mton CO_2-eq. aan vermeden producten en energie. Omdat chemische recycling minder directe emissies heeft maar wel reguliere producten/energie vermijdt komt het totale voordeel op -0,2 Mton CO_2-eq. Bij de grotere hoeveelheden in 2030 komt het totale resultaat op -0,2 Mton CO_2-eq. (conservatieve case) en -1,6 Mton CO_2-eq. (optimistische case).

Figuur 9 - Klimaatimpact van referentieverwerking en chemische recycling van geselecteerde kunststof afvalstromen voor 2020 en 2030

Om deze resultaten nader te duiden zoomen we er in Figuur 10 verder op in. We maken nu echter een onderscheid in waar de emissies vermoedelijk plaatsvinden: in Nederland (gevulde balken) of buiten Nederland (gearceerde balken).

Figuur 10 - Klimaatimpact van referentieverwerking en chemische recycling van geselecteerde kunststof afvalstromen voor 2020 en 2030, inclusief indicatie locatie emissies

Voor 2020 is in Figuur 10 te zien dat de totale klimaatimpact met ca. 0,2 Mton CO_2-eq./jaar afneemt door de inzet van chemische recycling (zie ook Tabel 17). In Nederland nemen de directe emissies met ca. 0,3 Mton CO_2-eq./jaar af, terwijl ze buiten Nederland met 0,1 Mton CO_2-eq./jaar afnemen. Door de vermeden producten in het buitenland wordt de klimaatimpact in het buitenland iets groter. Dit komt met name doordat de DKR-verwerking (die nu in Duitsland plaatsvindt) wegvalt. Hierdoor moet (buiten Nederland) meer materiaal geproduceerd worden voor dikwandige toepassingen.

Tabel 17 - Details klimaatimpact 2020, referentieverwerking vs. chemische recycling, Mton CO_2-eq./jaar[a]

	Referentie	Chemische recycling	Verschil
Directe emissies (Nederland)	0,3	0,0	-0,3
Directe emissies (buitenland)	0,1	0,0	-0,1
Vermeden producten/energie (Nederland)	-0,2	-0,2	0,0
Vermeden producten/energie (buitenland)	-0,2	0,0	0,1
Totaal	**0,1**	**-0,2**	**-0,2**
Waarvan in Nederland	0,1	-0,1	-0,2
Waarvan in buitenland	-0,1	0,0	0,0

De kolom 'Verschil' is berekend als het resultaat van chemische recycling minus de referentie. Deze waarden zijn afgerond.

De situatie voor 2030 in de conservatieve case is in feite een uitvergroting van de situatie in 2020 (zie ook Tabel 18). De groei in de volumes van beschikbare kunststoffen maakt dat de resultaten wat extremer zijn. Uiteindelijk wordt met dit scenario ook een totale besparing van 0,2 Mton CO_2-eq./jaar in Nederland gerealiseerd, en een toename in klimaatimpact buiten Nederland van ongeveer 0,05 Mton CO_2-eq./jaar.

Tabel 18 - Details klimaatimpact 2030 (conservatieve case), referentieverwerking vs. chemische recycling, Mton CO_2-eq./jaar[a]

	Referentie	Chemische recycling	Verschil
Directe emissies (Nederland)	0,3	0,0	-0,3
Directe emissies (buitenland)	0,1	0,0	-0,1
Vermeden producten/energie (Nederland)	-0,2	-0,2	0,0
Vermeden producten/energie (buitenland)	-0,2	0,0	0,1
Totaal	**0,1**	**-0,2**	**-0,2**
Waarvan in Nederland	0,1	-0,1	-0,3
Waarvan in buitenland	-0,1	0,0	0,0

De kolom 'verschil' is berekend als het resultaat van chemische recycling minus de referentie. Deze waarden zijn afgerond.

De resultaten voor de situatie in 2030 in de optimistische case (Tabel 19) wijken sterk af door het effect van de import van kunststofafval uit België, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk. Het totale volume van de geselecteerde kunststof afvalstromen komt daarmee op ongeveer 1,5 miljoen ton.

Bij de referentieverwerking is aangenomen dat alle stromen die mogelijk geïmporteerd kunnen worden in het buitenland verwerkt worden. Dit levert ongeveer 2,2 Mton CO_2-eq./jaar aan klimaat-impact op, en een besparing van 1,6 Mton CO_2-eq./jaar aan vermeden emissies in het buitenland, o.a. door de inzet van DKR-350 kunststoffen. De directe emissies in Nederland (0,5 Mton CO_2-eq./jaar) zijn wat hoger dan in het conservatieve scenario vanwege de grotere volumes.

Wanneer chemische recycling wordt toegepast in Nederland dalen de directe emissies sterk, omdat ingeschat wordt dat geïntegreerde hydropyrolyse geen directe emissies veroorzaakt (Figuur 7). Tegelijkertijd wordt in deze situatie door grootschalige chemische recycling in Nederland veel syngas/diesel geproduceerd. Door conventionele productie te voorkomen zou hiermee een geschat klimaatvoordeel van 0,8 Mton CO_2-eq. gerealiseerd kunnen worden.

Netto dalen de Nederlandse emissies daarmee met ca. 1,0 Mton CO_2-eq./jaar, terwijl buiten Nederland ca. 0,6 Mton CO_2-eq./jaar bespaard wordt. Opgeteld geeft dit een potentiële reductie van ongeveer 1,6 Mton CO_2-eq./jaar.

Tabel 19 - Details klimaatimpact 2030 (optimistische case), referentieverwerking vs. chemische recycling, Mton CO_2-eq./jaar[a]

	Referentie	Chemische recycling	Verschil
Directe emissies (Nederland)	0,5	0,1	-0,5
Directe emissies (buitenland)	2,2	0,0	-2,2
Vermeden producten/energie (Nederland)	-0,3	-0,8	-0,5
Vermeden producten/energie (buitenland)	-1,6	0,0	1,6
Totaal	**0,8**	**-0,8**	**-1,6**
Waarvan in Nederland	0,2	-0,7	-1,0
Waarvan in buitenland	0,6	0,0	-0,6

De kolom 'verschil' is berekend als het resultaat van chemische recycling minus de referentie. Deze waarden zijn afgerond.

Alternatief: Top-down berekening klimaatpotentie chemische recycling

In Hoofdstuk 2 en 5 is uitgegaan van informatie over specifieke stromen afgedankt kunststof, waarover relatief veel informatie beschikbaar is (samenstelling, oorsprong, huidige verwerking). Met deze voorzichtige, 'bottom-up' benadering komen op we tot geschatte hoeveelheid van 230 kton kunststof (2020) die nu niet mechanische gerecycled wordt en dus in aanmerking komt voor chemische recycling.

Een alternatief is echter om top-down te kijken naar de hoeveelheden afgedankt kunststof in Nederland. Volgens de Transitieagenda Kunststoffen ging in 2015/2016 ca. 1.200 kton kunststof naar AEC's (Rijksoverheid, 2017b). Deze hoeveelheid is top-down bepaald door te kijken naar hoeveel kunststoffen jaarlijks gebruikt worden en verschillende bronnen (o.a. Rijkswaterstaat, PlasticsEurope, NRK) te combineren.

Hoewel deze 1.200 kton/jaar waarschijnlijk deels aanwezig is in gemengde afvalstromen (bijv. huishoudelijk afval), is het interessant om de potentie van chemische recycling om de klimaatimpact te verlagen ook door te rekenen op basis van deze hoeveelheid. We nemen hierbij aan dat de kunststoffen dus als pure stroom verwerkt kunnen worden via chemische recycling. We gaan hiervoor uit van pyrolyse.

Het resultaat is weergegeven Figuur 11. De 1,2 Mton afgedankt kunststof die volgens de Transitieagenda beschikbaar is zorgt in een AEC voor een totale klimaatimpact van ca. 1,8 Mton CO_2-eq. (inclusief terugwinning energie), terwijl via chemische recycling een totale klimaatimpact van -0,1 Mton CO_2-eq. geschat wordt. Het totale voordeel is hierdoor 1,9 Mton CO_2-eq. Hoewel het een grove analyse betreft, wordt hiermee de potentie om enkel met Nederlands kunststofafval grote klimaat-impactreducties te realiseren getoond. Het resultaat is vergelijkbaar met wat in (bottom-up) in Figuur 10 geschat werd voor 2030 in het optimistische scenario met import.

Het gaat hier om het theoretische potentieel. Waarschijnlijk kost het energie om de complete 1,2 Mton afgedankt kunststof geschikt te maken voor chemische recycling, omdat deze zich waarschijnlijk voor een groot deel in gemengde afvalstromen of samengestelde producten bevindt.

Figuur 11 - Klimaatimpact verwerking 1,2 Mton afgedankt kunststof (Transitieagenda) via AEC of chemische recycling

6 Conclusies en aandachtspunten beleid

De vorige hoofdstukken hebben relevante stromen van kunststofafval geïnventariseerd (Hoofdstuk 2), beschikbare technieken voor chemische recycling geïnventariseerd (Hoofdstuk 3), en indicaties gegeven van de klimaatwinst die ze zouden kunnen opleveren (Hoofdstuk 4 en 5).

Hier vatten we eerst de belangrijkste conclusies uit deze voorgaande analyses samen (Paragraaf 6.1). Vervolgens bespreken we de aandachtspunten voor beleid die hieruit volgen (Paragraaf 6.2).

6.1 Conclusies

Drie soorten kunststof afvalstromen lijken het meest interessant voor chemische recycling (Hoofdstuk 2): uitval bij reguliere (mechanische recycling), lastig te recyclen monostromen zoals PET-trays en broomhoudend EPS uit de bouw, en mixed plastics (DKR 350). Voor 2020 bedragen die stromen in Nederland samen zo'n 230 kton materiaal per jaar. In 2030 kunnen deze (Nederlandse) hoeveelheden opgelopen zijn tot ca. 260 (conservatief) tot 340 (optimistisch) kton per jaar aan materiaal in Nederland. Met import kan een veelvoud hiervan ingezet worden voor chemische recycling.

Uit een eerste analyse van de klimaatimpact van verschillende afvalverwerkingstechnieken (Hoofdstuk 4) blijkt het volgende (ook samengevat in):

- **Verbranding** van kunststofafval zorgt voor een klimaatimpact van ca. 1,5 ton CO_2-eq./ton input (gewogen gemiddelde van kunststofsoorten), waarbij al rekening gehouden is met de productie van warmte en elektriciteit.
- **Mechanische recycling** zorgt bij PET voor een klimaatimpact van ca. -2,3 ton CO_2-eq./ton input. Dit is een netto reductie aangezien de productie van virgin kunststof vermeden kan worden.
- Voor **chemische recycling** van recyclinguitval en DKR 350 wordt een klimaatimpact tussen 0 en -0,5 ton CO_2-eq./ton input geschat (pyrolyse, lagetemperatuursvergassing en geïntegreerde hydropyrolyse). Voor PET-afval komt chemische recycling door middel van magnetische depolymerisatie op een geschatte klimaatimpact van -1,5 ton CO_2-eq./ton input. Solvolyse van broomhoudend EPS wordt op -1,5 ton CO_2-eq./ton input geschat.

Tabel 20 - Indicatie klimaatimpact van verschillende verwerkingsroutes kunststofafvalstromen in ton CO_2-eq./ton input, gebaseerd op Figuur 7

Kunststofstroom	Referentie		Chemische recycling		Reductie klimaatimpact
Recyclinguitval	1,5	AEC	-0,5 tot 0	Pyrolyse, vergassing (lage temperatuur), geïntegreerde hydropyrolyse	100 tot 133%
Mixed plastics	-0,5	Verwerking DKR 350	-0,5 tot 0		-100 tot 0%
PET-trays	-2,3 / 1,3	Mechanische recycling/AEC[a]	-1,5	Magnetische depolymerisatie	-36 tot 213%
Broomhoudend EPS	1,7	AEC	-1,5	Solvolyse	115%

a) Zoals aangestipt (Paragraaf 3.3.2) is mechanische recycling geen volledig realistische referentie. We vergelijken daarom hier ook met verbranding in AEC met energieterugwinning.

Vaak stellen technieken met een hogere CO_2-reductie ook hogere eisen aan de kwaliteit van het afval. Magnetische depolymerisatie en solvolyse scoren qua klimaatimpact ongeveer vergelijkbaar met mechanische recycling maar hebben een vrij specifieke input nodig. Vergassing en pyrolyse stellen minder strenge eisen aan de inputs, maar scoren ca. 50% a 60% van het milieuvoordeel van mechanische recycling ten opzichte van verbranding.

Ondanks de onzekerheid in de milieuprestaties geven de resultaten tot nu toe aan dat chemische recycling vooral aantrekkelijk is voor stromen die niet mechanisch gerecycled (kunnen) worden zoals recyclinguitval, aangezien mechanische recycling beter scoort op klimaatimpact.

Als deze milieuprestaties gecombineerd worden met de beschikbare hoeveelheden kunststof afvalstromen blijkt dat chemische recycling een aanzienlijke bijdrage kan leveren aan het verminderen van broeikasgasemissies (Hoofdstuk 5). De totale klimaatimpact in 2020 kan met ca. 0,2 Mton CO_2-eq./jaar gereduceerd worden als de geselecteerde afvalstromen chemisch gerecycled worden.
De resultaten voor 2030 zijn in de conservatieve case vergelijkbaar, omdat de kunststofstroom in dit scenario minimaal toeneemt en er geen afval wordt geïmporteerd. In de optimistische case is de groei hoger en vindt er wel import plaats. Hiermee wordt ook de geschatte reductiepotentie groter: verdeeld over binnen- en buitenland ligt de potentiële broeikasgasreductie rond de 1,6 Mton CO_2-eq./jaar.

6.2 Aandachtspunten voor beleid

Uit de hierboven samengevatte analyses komt een aantal aandachtspunten voor beleidsmakers naar voren, die hieronder besproken worden.

Diversiteit binnen chemische recycling

Door grote technische verschillen en uiteenlopende milieuresultaten ligt het niet voor de hand om chemische recycling als geheel te vergelijken met andere verwerkingstechnieken.
Hierdoor is het ook de vraag of het wenselijk is om chemische recyclingtechnieken als één groep te behandelen in rangordes zoals de ladder van Lansink of de afvalhiërarchie in het Landelijk Afvalbeheerplan III. Het is wenselijker om bij het opstellen van rangordes uit te gaan van de onderliggende technieken (pyrolyse, vergassing, etc.). Omdat een aantal technieken is ontworpen om vrij specifieke afvalstromen te verwerken is de vraag of een dergelijke rangorde überhaupt opgesteld kan worden, of dat een case-by-case milieuevaluatie een neutraler beeld geeft.

Gelijk speelveld recycling

In de doorontwikkeling van verwerkingstechnieken spelen financiële mechanismen een belangrijke rol. Een ongelijk speelveld zou een barrière voor uiteindelijke implementatie kunnen vormen.
Zo wordt er momenteel binnen de afvalfondsvergoeding geen rekening gehouden met chemische recycling. Gemeenten krijgen nu voor kunststofafval dat zij inzamelen voor mechanische recycling een vergoeding van 712 €/ton (656 €/ton in 2019) uit het Afvalfonds Verpakkingen. Ook nascheiders krijgen zo'n vergoeding. Voor het materiaal dat chemisch verwerkt wordt is nu nog geen vergoeding beschikbaar.

Om chemische recycling van mixed plastic stromen uit kunststofinzameling mogelijk te maken is het noodzakelijk dat gemeenten voor het chemisch recyclen van deze stroom ook een vergoeding van het afvalfonds krijgen. Zolang een dergelijke vergoeding niet beschikbaar is zouden chemische verwerkingsinstallaties gemeenten honderden euro's per ton moeten bieden om de gemeenten te

compenseren. Dat kunnen deze installaties economisch niet dragen en is ook niet redelijk voor routes die milieukundig ongeveer vergelijkbaar zijn met mechanische recycling.

Voor solvolyse en magnetische depolymerisatie op basis van verpakkingsafval is een vergoeding van het afvalfonds cruciaal om deze stromen te kunnen verwerken. Als gemeenten (die dit afval beheren) voor deze verwerking geen afvalfondsvergoeding krijgen dan zullen zij kiezen voor mechanische recycling, ook al zorgt dat voor laagwaardigere producten zoals mixed plastic. Zonder afvalfonds-vergoeding is het daarnaast waarschijnlijk dat pyrolyse en vergassing geen mixed plastic materiaal kunnen aantrekken omdat gemeenten ook daarvoor liever mechanische recycling met vergoeding toepassen.

Als Nederland een grotere internationale rol zou willen spelen op het gebied van de chemische verwerking van afvalstromen zouden buitenlandse gemeenten ook een vergoeding kunnen krijgen voor het afval dat naar Nederland geëxporteerd wordt, en vervolgens hier hoogwaardig wordt verwerkt. Dit zou op de langere termijn opgezet kunnen worden. Een randvoorwaarde hierbij is internationale erkenning voor chemische recycling als recyclingoptie.

Recyclingadministratie

Technieken die kunststof niet afbreken tot basischemicaliën (magnetische polymerisatie, solvolyse) scoren, mits uitgevoerd op redelijk schaal, milieukundig vergelijkbaar met mechanische recycling-technieken. Hierdoor zou materiaal dat op deze manier verwerkt wordt een op een meegenomen kunnen worden in de recyclingadministratie[8]. Hierdoor zou deze verwerking meetellen bij recycling-doelstellingen, en wordt ook de afzet van de output gestimuleerd.

Technieken als pyrolyse en vergassing breken de kunststofinput af tot basalere bouwstenen, waar-door vervolgens meer processen nodig zijn om weer nieuwe kunststoffen te produceren.
Deze technieken lijken slechter te scoren op klimaatimpact dan mechanische recycling (en bijv. solvolyse, magnetische depolymerisatie). Zij behalen tot ongeveer 25% van het milieuvoordeel dat mechanische recycling realiseert. Het is daarom minder logisch om deze vorm van chemische recycling 1 op 1 op te tellen bij het percentage mechanische recycling. Een optie is om alle vormen van chemische recycling te waarderen naar rato van de milieuwinst die ze opleveren ten opzichte van mechanische recycling. Een techniek die dus 50% van de milieuwinst levert telt dan ook voor 50% mee in de recyclingadministratie.

Verbeteren inzicht milieuprestaties

Door de technieken verder te ontwikkelen en op te schalen kunnen de milieuprestaties van chemische recycling met grotere zekerheid worden vastgesteld. De milieuprestaties die hier gepresenteerd zijn, zijn indicatief vanwege onzekerheden in de inputs en outputs van de processen en de geschiktheid van de afvalstromen. Daarnaast hebben we ons gericht op de klimaatimpact en niet op andere mogelijk relevante milieueffecten. Bij de verdere ontwikkeling van chemische recycling is het daarom nuttig om meer (screening) LCA's uit te voeren op basis van geüpdatete gegevens. Deze kunnen dienen om te verifiëren dat de meest veelbelovende routes ontwikkeld worden, maar ook om informatie over de milieuprestaties terug te koppelen naar het ontwikkelingsproces. Zo kunnen LCA-resultaten gebruikt worden om de systemen te optimaliseren voor een zo laag mogelijke milieu-impact. Een getrapte LCA-methode lijkt hiervoor geschikt. Zo zou in vroege TRL's begonnen kunnen worden met simpele analyses die weinig data nodig hebben, en voor bijna uitontwikkelde technieken opgeschaald kunnen worden naar preciezere analyses met meer indicatoren.

[8] Regels welke manieren van verwerking mogen meetellen als 'recycling'.

De resultaten van LCA's zijn het meest waardevol als de gebruikte methode zoveel mogelijk gestandaardiseerd is. Door bijvoorbeeld gebruik te maken van dezelfde CO_2-kengetallen voor gebruikte elektriciteit, dezelfde afbakening te gebruiken en dezelfde effectbeoordelingsmethode te gebruiken kunnen de milieuprestaties van afvalverwerkingstechnieken eerlijk vergeleken worden. Bijlage B geeft hiervoor een opzet, maar verdere standaardisatie is mogelijk (en wenselijk wanneer de methode in een beleidscontext ingezet zou worden, bijvoorbeeld om stimuleringskeuzes te kunnen onderbouwen). Omdat er bij LCA's van afvalverwerking een aantal fundamentele methodologische keuzes gemaakt moet worden (bijv. omgang met multifunctionaliteit/waardering van (co-)producten, afbakening, gekozen indicatoren) is het van belang dat een methode voldoende draagvlak heeft onder techniekontwikkelaars en tegelijk niet nodeloos complex is.

De milieuprestaties kunnen gecombineerd worden met inschattingen van de kosten om de kosten-effectiviteit van CO_2-reductie in te schatten. Deze kosteneffectiviteit (bijv. in €/kg CO_2-reductie) kan gebruikt worden om de meest kansrijke technieken voor chemische recycling te identificeren, en om de technieken te vergelijken met andere opties om (inter)nationale klimaatdoelen te halen.

Vergroten beschikbare volumes

De beschikbaarheid van kunststoffen die als input voor chemische recycling zouden kunnen worden ingezet kan op verschillende manieren vergroot worden. De eerste stap is een uitbreiding van bron-scheiding en nascheiding, waardoor kunststoffen niet in AEC's belanden.

Een tweede mogelijkheid is het importeren van kunststoffen uit buurlanden. Nederland zou kunnen inzetten op het ontwikkelen van een West-Europese (chemische) recyclinghub. Materiaal uit mechanische recycling uit Nederland gaat nu voor een groot deel naar Duitsland. Als Nederland technieken kan ontwikkelen om lastige afvalstromen goed te recyclen, zouden er stromen naar chemische recycling in Nederland getrokken kunnen worden. Uit eerder onderzoek bleek de verwerking van de stroom mix kunststoffen (DKR 350) in Duitsland stagneert, en Duitse verwerkers verwachten dat er nieuwe initiatieven voor verwerking uit de Benelux zullen komen (TNO, 2017). Daarnaast kan er ook direct kunststofafval geïmporteerd worden uit het Verenigd Koninkrijk, België, en Frankrijk. Dit gebeurt bijvoorbeeld al met Brits brandbaar afval dat verbrand wordt in Nederlandse AEC's in plaats van gestort in het Verenigd Koninkrijk. Eventuele juridische obstakels hiervoor zouden nader onderzocht moeten worden.

Een discussiepunt bij de verwerking van geïmporteerd West-Europees afval is de toerekening van eventuele klimaatvoordelen. In de huidige klimaatadministratie wordt primair gekeken naar waar broeikasgasemissies plaatsvinden (het 'locatieprincipe')[9]. Binnen systemen zoals het *Emissions Trading System* (ETS) en de *Effort Sharing Decision* (ESD) van de EU kunnen emissierechten echter verhandeld worden. Een vergelijkbaar handelssysteem zou op de langere termijn opgezet kunnen worden voor (chemische) recycling van geïmporteerd afval. Het klimaatvoordeel van (chemische) recycling dat op Nederlands grondgebied gerealiseerd wordt zou boekhoudkundig (deels) teruggegeven kunnen worden aan de landen die het kunststof afvalmateriaal aanleveren. Dit kan geld opleveren (afhankelijk van de prijs op broeikasgasemissies) wat het handelen in kunststofafval aantrekkelijker kan maken. Als hiermee de beschikbare hoeveelheden materiaal toenemen, kan het eenvoudiger worden om chemische recycling grootschalig (en daarmee waarschijnlijk goedkoper en milieukundig voordelig) in te zetten.

[9] Een alternatief kan zijn om vanuit de 'voetafdruk' van producten of consumptie te kijken. Als bijvoorbeeld een consumptie-voetafdrukprincipe gehanteerd zou worden, zou diegene die een goed gebruikt (bijv. een land) alle emissies die nodig waren om dat goed te produceren naar zich toegerekend krijgen, ongeacht waar deze fysiek hebben plaatsgevonden. Het idee van voetafdrukbeleid als aanvulling op locatiebeleid is verder onderzocht in (CE Delft, 2018b).

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

De bovenstaande discussiepunten richtten zich primair op de beschikbaarheid van kunststof afvalstromen en de potentiële milieuvoordelen van chemische recycling, de belangrijkste onderwerpen van deze studie. Er kan hierbij echter aangetekend worden dat er daarnaast nog andere onzekerheden bestaan rondom chemische recycling. Deze zouden in vervolgonderzoek aan bod kunnen komen.

Hierbij gaat het bijvoorbeeld om de technologische ontwikkeling van de benodigde processen (bijvoorbeeld: welke zijn het meest geschikt voor de beschikbare afvalstromen?), de aansluiting op de markt (welk soort outputs kunnen gebruikt worden in bestaande processen?), de opschaling (welk proces kan grootschalig ingezet worden?) en de kosten (welke technieken kunnen tegen de laagste kosten de klimaatimpact verlagen?). Deze (sterk verweven) kwesties bepalen mede welke vorm van chemische recycling het meest interessant is voor Nederland.

7 Referenties

AkzoNobel, 2018. *Partners agree on initial funding to kick off waste-to-chemistry project in Rotterdam.* [Online]
Available at: https://www.akzonobel.com/for-media/media-releases-and-features/partners-agree-initial-funding-kick-waste-chemistry-project

Berenschot , 2012. *Routekaart NRK 2012-2030,* Utrecht: Berenschot.

CBS, 2017. *De circulaire economie van kunststof: van grondstoffen tot afval,* Den Haag: Centraal Planbureau.

CE Delft, 2017. *Innovatieve afvalverwerkingstechnieken doorgelicht,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018a. *Milieuanalyse recycling van kunststof verpakkingen - update over 2015,* Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018b. *Klimaatwinst met voetafdrukbeleid voor de Nederlandse industrie? Quickscan energie-intensieve industrie met analyse van productievoetafdruk- en locatiebeleid,* Delft: CE Delft.

Chemie Magazine, 2016. Tweede leven voor bouwpiepschuim. *Chemie Magazine*, Januari, pp. 18-20.

Consultic, 2013. *Post-consumer plastic waste management in European Countries 2012,* Brussel: Plastics Europe.

De Standaard, 2017. *België zit met een torenhoog plastic probleem.* [Online]
Available at: http://www.standaard.be/cnt/dmf20171205_03227369
[Geopend 2018].

DPI Value Centre, 2011. *Rapportage: onderzoek kunststof afdankstromen in Nederland,* Utrecht: Berenschot.

Eurostat, 2017. *Packaging waste by waste operations and waste flow.* [Online]
Available at: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waspac&lang=en

Geyer, R., Jambeck, J. & Law, K., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 19 July.

KIDV, 2016a. *Factcheck plastic recycling,* sl: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

KIDV, 2016b. *PET-trays: op weg naar structurele oplossingen,* Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

KIDV, 2016c. *Kwaliteitseisen voor PET-bakjes, mixed polyolefin en polystyreen,* Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

KIDV, 2017a. *Rapportage kunststofketenproject,* Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

KIDV, 2017b. *Chemisch recyclen van kunststof verpakkingen,* Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

KIDV, 2017c. *Chemisch recyclen van kunststof verpakkingen - Verslag Verdiepingsbijeenkomst 9 februari 2017,* Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2017. *Landelijk Afvalbeheerplan 2017-2029,* Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

NRK Recycling, 2018. *Pilot plant voor Solvolyse van EPS.* [Online]
Available at: http://www.nrkrecycling.nl/nieuws/nieuws-detail?newsitemid=1102249993
[Geopend 2018].

PlasticsEurope, 2017. *Plastics - the Facts 2017,* Brussels: PlasticsEurope.

Rijksoverheid, 2014. *Uitvoeringsprogramma VANG - Huishoudelijk Afval,* sl: VANG.

Rijksoverheid, 2017a. *Vertrouwen in de toekomst - Regeerakkoord 2017-2021,* Den Haag: Rijksoverheid.

Rijksoverheid, 2017b. *Transitie-agenda kunststoffen,* Den Haag: Rjiksoverheid.

RIVM, 2015. *Plastics met gevaarlijke stoffen: recyclen of verbranden,* Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

Schüler, K., 2016. *Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2014,* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

StatBel, 2017. *StatBel: cijfers verpakkingasfval.* [Online]
Available at: https://statbel.fgov.be/nl/themas/leefmilieu/afval-en-vervuiling/verpakkingsafval#figures

Stimular, 2016. *Kansen voor minder restafval bij negen KWD sectoren,* Rotterdam : Stimular.

Stork, M., de Beer, J., Lintmeijer, N. & den Ouden, B., 2018. *Chemistry for Climate - Acting on the need for speed. Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050,* Utrecht: Ecofys.

Thoden Van Velzen, U., 2017. *Recyclingopties voor PET schalen,* Wageningen: Wageningen Food & Biobased Research.

TNO, 2017. *Interne screening-analyse solvolyse (vertrouwelijk),* sl: TNO.

TNO, 2017. *Marktverkenning mix kunststoffen en folies,* Utrecht: TNO.

Velis, C. A., 2014. *Global recycling markets : plastic waste,* Vienna: Report prepared by FUELogy and formatted by D-waste on behalf of International Solid Waste Association - Globalisation and Waste Management Task Force. ISWA.

WRAP, 2016. *Plastics market situation report,* Banbury: WRAP.

A Overzicht technieken chemische recycling

Tabel 21 hieronder geeft een overzicht van de verschillende technieken die onder chemische recycling vallen (CE Delft, 2017).

Tabel 21 - Overzicht technieken chemische recycling

Categorie	Techniek	Input	Output	TRL
Thermo-chemische recycling	Radiolyse (ENERPY) (vorm van Pyrolyse)	Biomassa Autobanden Organisch afval	Koolstof (char) (Bio)olie Gas	5
	Pyrolyse (eerste en tweede generatie)	Oorspronkelijk: residu-olie. Plastics: hoofdcategorieën PE, PP (PUR, PS iets minder geschikt). Lastig: PET, nylon, PVC Biomassa (A, B, C hout, GFT, slib, zaagsel, pellets). Evt.: gemengde afvalstromen (RDF, non-recyclable papier en plastic, cateringafval, residustromen uit recycling).	Bij plastic: lampolie, kerosine. Bij biomassa: 'pyro-olie' (laagcalorisch, zuur, instabiel) Syngas.	8
	Geïntegreerde hydropyrolyse (3de generatie)	Plastics: hoofdcategorieën PE, PP, PUR, PS. Lastiger: PET, nylon, PVC, maar geschikt voor groter aandeel dan conventionele pyrolyse. Biomassa (A, B, C hout, GFT, slib, zaagsel, pellets). Gemengde afvalstromen (RDF, non-recyclable papier en plastic, cateringafval, residustromen uit recycling).	Pyrolyseolie van hogere kwaliteit: hogere calorische waarde, neutrale pH, laag zwavelgehalte. Toepassingen: drop-in fuel (EN-95, best case), feedstock voor MGO Syngas.	5-7
	Lagetemperatuur-vergassing: 700-900°C	Plastics Biomassa (A, B, C-hout, GFT, slib, zaagsel, pellets). Kan gevoelig zijn voor fluctuaties in samenstelling en vochtgehalte. Hoge zuurstofgehaltes kunnen van invloed zijn op samenstelling	Syngas (niet direct geschikt voor W2C-toepassingen; wel voor energie-toepassingen).	5-7

Categorie	Techniek	Input	Output	TRL
		output. Mogelijk teervorming bij biomassahoudende stroom.		
	Medium temperatuur-vergassing: 900-1.600°C (Enerkem)	Plastics Biomassa (A, B, C-hout, GFT, slib, zaagsel, pellets). Minder gevoelig voor fluctuaties in samenstelling. Ook geschikt voor gemengde afvalstromen.	Syngas (lage hoeveelheid roet, laag koolwaterstof gehalte, geen teer; geschikt voor W2C-toepassingen na H_2-correctie).	5-7
	Plasmavergassing	Gemengde afvalstromen.	Syngas (lage hoeveelheid roet, laag koolwaterstof gehalte, geen tar; geschikt voor W2C-toepassingen na H_2-correctie).	8
Chemische recycling en selectieve extractie	Cellulose extractie	Biomassa, papier.	Cellulose (in volgende stap naar biobased kunststof; optie: reststroom via hydropyrolyse naar bio-olie).	6
	Magnetische depolymerisatie (Ioniqa)	(gekleurd) PET-afval.	(Virgin) monomeer PET (BHET).	5-7
	Hydrolyse	Luiers, biomassahoudende fracties.	DKR-kwaliteit plastics, biogranulaat, biogas.	5-7
	Solvolyse (‘chemisch oplossen’, ‘selectieve polymeer extractie’)	Kunststoffen (composieten). Zuivere inputstroom vereist (<10% vervuiling).	Plastic polymeren, vervuiling (bijv. brandvertragers bij polystyreenschuim).	5-7

B Screening LCA-methode chemische recycling

B.1 Doelstelling

Het doel van deze screening LCA-methode is om inzicht te bieden in de milieuprestaties van technieken voor chemische recycling. Hierdoor kan een eerste indicatie gegeven worden van welke technieken milieukundig het beste scoren en hoe deze zich verhouden tot andere afvalverwerkingsmethoden, zoals mechanische recycling en verbranding in AEC's. Deze inzichten kunnen beleidsmakers richting geven in beleidskeuzes rondom het stimuleren van de circulaire economie. Tegelijk geven dergelijke analyses technologieontwikkelaars inzicht in de milieukundige hotspots in hun productieketen.

Het gaat om een versimpelde attributionele levenscyclusanalyse (LCA), die zich richt op de belangrijkste inputs en outputs van verschillende technieken. Als milieueffect wordt de bijdrage aan klimaatverandering bepaald, kortweg klimaatimpact of CO_2-kengetal. Dit is een zeer relevante indicator voor nieuwe technieken waar al veel data over beschikbaar is.

Screening LCA's maken het mogelijk om vroegtijdig informatie te geven over de te verwachten milieuprestaties. Dit maakt het mogelijk om (voorzichtig) eerste beleidskeuzes te onderbouwen over technieken die nog niet zijn uitontwikkeld. Het nadeel van de versimpelde benadering is dat er grotere onzekerheden zijn en er slechts naar één milieu-indicator gekeken wordt. Omdat de technieken nog volop in ontwikkeling zijn is er vaak slechts beperkt data beschikbaar over hoe deze op industriële schaal (zouden) functioneren. Hierdoor is het nog niet altijd mogelijk uitgebreide LCA's uit te voeren. De screening LCA-methode maakt daarom gebruik van verschillende bronnen (zie ook Data) om de belangrijkste inputs en outputs van een proces te schatten. Het is daarom van belang om bewust te zijn van de onzekerheden en om gedurende de verdere ontwikkeling van technieken deze te proberen te verkleinen. Dit kan door analyses te blijven aanscherpen en geleidelijk toe te werken naar een gedetailleerdere LCA.

B.2 Afbakening

Omdat de screening LCA's zich richten op afvalverwerking, is gekozen voor een cradle-to-gate ('wieg-tot-poort') aanpak. Dit betekent dat de processen waarin het afval geproduceerd wordt niet meegenomen worden en dat het levenseinde van de geproduceerde materialen geen onderdeel is van de systeemgrenzen.

B.3 Functionele eenheid

De functionele eenheid, die het mogelijk maakt de verschillende technieken te vergelijken, is gedefinieerd als: **de verwerking van 1 ton afval**.

Per LCA kan een specifiekere afvalstroom gedefinieerd worden waarvoor een bepaalde techniek geschikt is. Eerdere screening LCA's hebben zich bijvoorbeeld gericht op kunststof sorteerverliezen of een mix van papier- en kunststofafval.

B.4 Data

Zoals aangegeven richt de screening LCA zich op de belangrijkste inputs en outputs van een techniek voor chemische recycling. Aan de inputkant wordt hierbij in ieder geval gekeken naar welke afvalstromen geschikt zijn, hoeveel energie (bijv. elektriciteit/aardgas) een proces behoeft, en of er grote hoeveelheden energie-intensieve hulpstoffen nodig zijn (bijv. waterstof). Aan de outputkant wordt informatie verzameld over welke nuttige producten gemaakt worden (bijv. syngas, monomeren, etc.), en wordt vastgesteld welke conventionele grondstoffen of processen deze kunnen vervangen.
Dit betekent dat kleinere of herbruikbare inputs (bijv. katalysatoren, hulpstoffen die in kleine hoeveelheden gebruikt worden) doorgaans niet meegenomen worden. Ook kapitaalgoederen vallen buiten de scope van de analyse.

De informatie over deze procesparameters wordt verzameld uit de literatuur, op basis van informatie die direct door bedrijven aangeleverd wordt of op basis van inschattingen van experts. Uitgangspunt hierbij is om data te verzamelen voor installaties op industriële schaal, of anders duidelijk aan te geven dat het bijv. een pilot plant betreft. Daarnaast is het *good-practice* om bij het verzamelen van data bij te houden wat de belangrijkste onzekerheden zijn, en waar mogelijk te werken met bandbreedtes van data om deze expliciet mee te nemen in de analyse.

B.5 Substitutiemethode en vermeden producten

Een kenmerk van chemische recycling is dat er producten uit afval geproduceerd worden.
Deze stromen vervangen producten die anders op een conventionele manier, bijv. uit aardolie, geproduceerd zouden worden.

Om de milieu-impact van de inzet van dergelijke producten te bepalen wordt gewerkt met de LCA-substitutiemethode. Dit betekent dat bekeken wordt hoe bijvoorbeeld syngas, dat verder de chemische industrie ingaat, was geproduceerd als deze afvaltechniek niet zou worden toegepast. Deze productie en haar emissies worden voorkomen en deze emissies worden daarom afgetrokken (gesubstitueerd) van de emissies van het afvalverwerkingsproces.

De keuze voor het gebruik van de substitutiemethode heeft invloed op de systeemgrenzen – en de milieuscore – van de verwerking van afval. De grens ligt bij het geproduceerde syngas dat een ander product vervangt; de rest van de keten is geen onderdeel van de scope van de analyse. Hetzelfde geldt voor de elektriciteit die geproduceerd wordt in AEC's: dit vervangt 'conventioneel geproduceerde elektriciteit', waarbij het niet van toepassing is hoe of waar deze elektriciteit vervolgens wordt ingezet.

B.6 Modellering en milieu-effectbeoordeling

De analyses worden uitgevoerd in de SimaPro LCA-software. Voor achtergronddata (bijv. hulpstoffen, aardgas) wordt gebruik gemaakt van de Ecoinvent-database. Als milieueffectbeoordelingsmethode is gekozen voor de IPCC 2013 GWP 100a-methode.