
White paper “Kwaliteit van gerecyclede huishoudelijke kunststofverpakkingen”

Ulphard Thoden van Velzen, Marieke Brouwer en Karin Molenveld

Wageningen Food & Biobased Research

18 mei 2018



Vraagstelling vanuit het Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV)

Deze *whitepaper* is geschreven op verzoek van KIDV in het kader van het kunststofketen-project [26]. Gevraagd werd hierin de navolgende onderzoeksvragen te beantwoorden: Wat is er bekend over het recyclen van huishoudelijke kunststofverpakkingen in de openbare wetenschappelijke literatuur? Wat begrijpen we inmiddels al goed en wat nog minder goed? Wat is er bekend over de kwaliteit van gesorteerde kunststofproducten gemaakt van huishoudelijke kunststofverpakkingen uit zowel gescheiden inzameling als nascheiding? Wat is er bekend over de kwaliteit van de gewassen maalgroenten die hieruit gemaakt zijn? Hoe verhouden de eigenschappen van gerecyclede kunststoffen van verschillende inzamelwijzen zich?

Korte terugblik

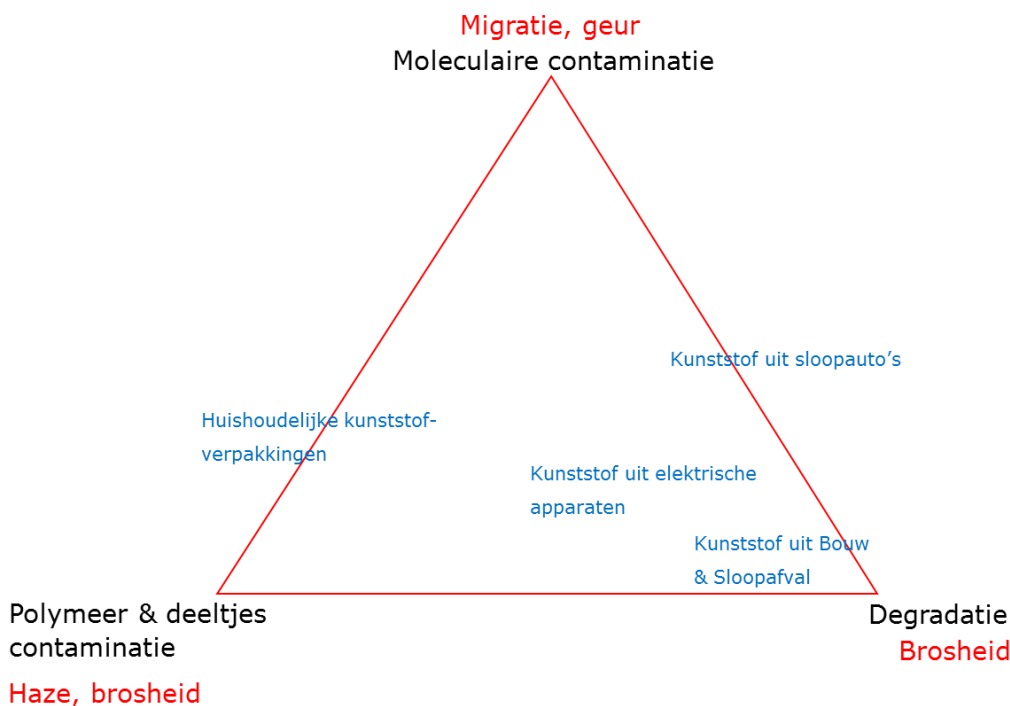
In 2008 werd Wageningen Food & Biobased Research voor het eerst gevraagd om de wetenschappelijke, technische kennis rond de recycling van huishoudelijke kunststofverpakkingen samen te vatten van inzamelen, sorteren, recyclen tot opnieuw toepassen. Behoudens een groot standaardwerk van Brandrup uit 1996 [1], een aantal losse technische artikelen [2-5], lag de nadruk op sociologische studies naar inzamelgedrag [6], milieuanalyses & beleidsstudies [7-9] en economische studies [10] die zich vooral op het inzamelen en afvalbeleid richtten. Een rondgang bij hoogleraren polymeertechnologie, scheidings-technologie en grondstofbeheer leerde dat er geen systematisch technisch onderzoek ten aanzien van recycling van huishoudelijke kunststofverpakkingen plaatsvond aan universiteiten in Nederland en Duitsland. Hiervoor werden meerdere redenen genoemd; het onderwerp was ingewikkeld met een geringe kans van succes. Bovendien had het onderwerp geen positieve uitstraling zodat het lastig was om studenten geïnteresseerd te krijgen en om financiering te verwerven. De meeste technische kennis was of aanwezig bij een aantal ingenieursbureaus en gedeeltelijk beschreven in conferentie-presentaties. Kenmerkend was dat de omwenteling in het sorteren van kunststofverpakkingen met NIR sorteermachines (introduktie rond de eeuwwisseling) toen nog niet was beschreven in de internationale, wetenschappelijke, technische literatuur.

Kwaliteitsverliesmechanismen

In dat zelfde jaar (2008) verscheen een belangrijke polymeer-technologische bijdrage uit Zweden. In dit overzichtsartikel schrijven Viliplana en Karlsson [11] dat er drie aspecten zijn waarop gerecyclede kunststoffen kunnen worden onderscheiden, te weten:

- De mate van degradatie (ketenafbraak, chemische veranderingen aan de keten),
- Moleculaire verontreiniging (geur en migratie),
- Polymere verontreiniging (aanwezigheid van niet-mengbare polymeren uit andere objecten en verpakkingscomponenten).

Voor al deze drie aspecten bestaan meetmethoden die gerecyclede kunststoffen of heel precies of juist inschattend kunnen kwalificeren. Hieruit bleek dat de uitdagingen voor verschillende soorten kunststofrecycelaat op andere kwaliteitsaspecten lagen, zie figuur 1.



Figuur 1: Schematische weergave van het verschil in relatieve belang van de verschillende kwaliteitsaspecten voor gerecyclede kunststoffen. Kwaliteitsaspecten in zwart letters. Gerelateerde eigenschappen in rode letters.

Zo blijken teruggewonnen kunststoffen uit bouw- en sloopafval bovengemiddeld veel last te hebben van degradatie, wat inherent is aan de lange gebruiksduur van deze kunststoffen (tientallen jaren). Kunststoffen uit sloopauto's blijken ook last te hebben van degradatie en ook van moleculaire verontreiniging (benzinedamp, smeermiddelen, etc.). Voor kunststoffen uit elektronische apparaten blijkt naast degradatie, moleculaire verontreiniging met gebromeerde vlamvertragers een specifiek aandachtspunt.

Gerecyclede kunststoffen uit verpakkingen hebben juist een korte gebruiksduur en meestal is degradatie dan ook niet of nauwelijks relevant. Hiervoor zijn juist polymere verontreiniging en moleculaire verontreiniging de belangrijkste kwaliteitsaspecten. Bij deze gerecyclede verpakkingskunststoffen is er een groot verschil tussen PET en de andere bulk-verpakkingskunststoffen (PE, PP, PS en PVC). PET neemt nauwelijks moleculaire verontreinigingen op en met moderne nacondensatie-technologieën kunnen deze verontreinigingen worden verwijderd [27]. Gelijktijdig wordt met nacondensatie de beperkt optredende degradatie in PET tegengegaan. De andere kunststoffen nemen juist veel moleculaire

verontreinigingen op (geurstoffen, vetten, smeermiddelen etc.), die veel lastiger verwijderd kunnen worden [21].

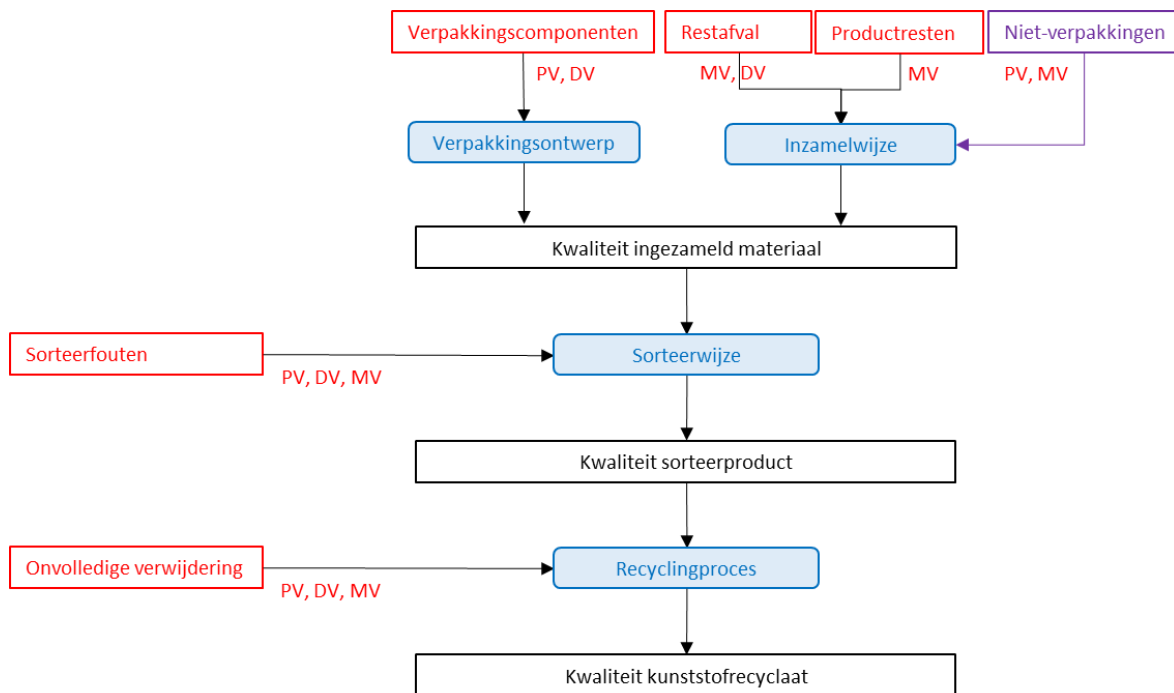
Kleur is een belangrijke eigenschap van kunststofrecycalaat die de toepassing kan beperken. Een oud grapje van recyclers is: "*Alle Farben sonst weiss*". Oftewel, we kunnen alles maken behalve helder wit en kleurloos. Alhoewel dit achterhaald is voor de hoogste kwaliteiten rPET en rPE, maakt dit het kleurprobleem wel duidelijk. Een aantal kunststoffen (bv. PET) kunnen verkleuren ten gevolge van langdurige verhitting (thermische degradatie) of langdurige blootstelling aan UV straling. De gebruikelijke vergrijzing is echter het gevolg van verontreiniging met inkten (afkomstig van directe bedrukking als houdbaarheidsdatum en productiecode) en pigmenten (het mengen van verschillende kleuren kunststoffen). Dit zijn vormen van moleculaire verontreiniging (inkt) en deeltjesverontreiniging (pigment). Daarnaast ontstaat er door polymere verontreiniging met niet-mengbare kunststoffen een fijne mist van deeltjes, die 'haze' (troebelheid) veroorzaakt.

Bedrijfsmatig en huishoudelijk kunststofverpakkingsafval

Veel bedrijfsmatig kunststofverpakkingsafval is beschikbaar in grote hoeveelheden en is vaak ook homogeen. Degradatie speelt vanwege de korte gebruiksduur vaak geen rol. Dit materiaal is of polymeer-zuiver of het heeft een goed beschreven polymeer-samenstelling. Vaak zijn de belangrijkste zorgen dan ook het verwijderen van aangehecht vuil, verschillen in kleur, additieven en masterbatches en ingetrokken moleculaire verontreinigingen. Bovendien is het grootste deel van de bedrijfsmatige kunststofverpakkingen gemaakt van PE en PP, waaruit door de opname van moleculaire verontreinigingen doorgaans geen *food-grade* recycalaat meer kan worden gemaakt, wat de afzetmogelijkheden beperkt.

Daarnaast is er ook bedrijfsmatig kunststofverpakkingsafval van kantoren, scholen, instellingen, spoorwegstations, etc. dat veel heterogener is. De verdere verwerking hiervan loopt parallel aan die van huishoudelijk kunststofverpakkingsafval.

Huishoudelijk kunststofverpakkingsafval is aanzienlijk ingewikkelder. Huishoudelijke kunststofverpakkingen zijn bijna uitsluitend objecten die gemaakt zijn van meerdere kunststoffen en andere materialen (papier, metaal, etc.). Ze worden ingezameld en nagescheiden met productresten en aanhangend vuil, wat leidt tot moleculaire verontreiniging. Deze moleculaire verontreiniging komt voort uit productresten (vaak levensmiddelresten) en is anders van aard en veel forser dan bij bedrijfsmatige kunststofverpakkingen. Ze worden gesorteerd in sorteerproducten die grotendeels (90-98% volgens sorteerspecificaties) bestaan uit verpakkingen waarbij het hoofdkunststof het doelkunststof is. Veelal zijn er ook vreemd-kunststoffen aanwezig zijn uit verpakkingscomponenten als doppen, sluitingen, labels, hotmelt, noppenfolie-inleg, etc. Dit leidt tot een polymere contaminatie. Daarnaast is er ook nog deeltjesverontreiniging doordat het zand, klei, stof, textielvezels en papiervezels niet volledig kunnen worden verwijderd in het recyclingproces. Tenslotte zijn er ook nog kunststof-niet-verpakkingen waarvan de hoofdkunststoffen meestal identiek zijn aan die van verpakkingen [19]. Wel zorgen ze voor meer PVC in het recyclingsysteem en ook de insleep van enkele moleculaire contaminanten [28]. De herkomst van moleculaire, polymere en deeltjesverontreiniging in kunststofrecycalaat gemaakt van huishoudelijke kunststofverpakkingen is schematisch weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: De kwaliteit van kunststofrecyclaat gemaakt van huishoudelijke verpakkingen wordt bepaald door de insleep van PV (Polymere verontreinigingen), MV (moleculaire verontreinigingen) en DV (deeltjesverontreiniging).

Alhoewel deze beschrijving -in termen van hoofd-kunststof, polymere contaminanten, moleculaire contaminanten en deeltjesverontreiniging- helpt bij het begrijpen van de kwaliteit van kunststofrecyclaat, is de werkelijkheid nog een stap ingewikkelder. Er bestaat namelijk vaak geen één soort hoofdkunststof maar juist meerdere *grades*. Dit wordt hieronder voor de drie hoofdproducten (PET, PE en PP) uitgelegd.

Bij een sorteerproduct als **PET 328-1** zijn hoofdzakelijk PET-flessen aanwezig en die flessen zijn gemaakt van redelijk vergelijkbare *grades*. Er zijn echter ook 10%ⁱ niet-flessen (lees voornamelijk schalenⁱⁱ) aanwezig die weer gemaakt zijn van andere *grades* met andere ketenlengtes en afgeleide eigenschappen als smeltviscositeit, etc. In het geval men uit dit sorteerproduct nieuwe non-food-PET-facons wil maken dan zal men of i) de schalen zoveel mogelijk moeten afscheiden uit de flessen of ii) het gehalte *recycled content* beperkt houden of iii) het materiaal een langdurige nacondensatie laten ondergaan zodat de ketenlengtes op het gewenste niveau voor flessen-blazen komen. Alternatief kan men ook kiezen voor andere toepassingen als sheets, schalen, *fleece fibre fill* textiel of *strapping*.

Bij een sorteerproduct als **PE 329** zijn er naast de dominante HDPE facons (wasmiddel, wasverzachter, schoonmaakmiddel, shampoo, wc-reiniger, etc.) ook LDPE melkflessen, potjes, diepgetrokken schaaltes en folie-stukken aanwezig. Alhoewel het hoofdkunststof in alle gevallen polyethyleen is, zijn er voor al deze toepassingen andere *grades* PE nodig. Dus is het teruggewonnen recyclaat ook een mengsel van diverse *grades* (HDPE, MDPE, LDPE, LLDPE, etc.). Aangezien de in de praktijk voorkomende *grades* PE goed mengbaar zijn, kan er uit PE-recyclaat toch relatief 'hoogwaardig' worden toegepast in bijvoorbeeld rPE-facons, mits de polymere verontreiniging kan worden beperkt.

Bij een sorteerproduct als **PP 324** is de situatie vergelijkbaar aan die van PE, ook hier zijn verschillende *grades* aanwezig. De meeste toepassingen van gerecycled PP zijn spuitgietproducten. Zodoende wordt PP recyclaat vaak bewust gedegraded (ketenlengte verkort met peroxides) om de smeltviscositeit te verlagen en spuitgieten mogelijk te maken. Hierdoor is de aanwezigheid van meerdere *grades* voor PP specifiek minder relevant.

Kwaliteit ingezameld materiaal

In Nederland werden kunststofverpakkingen tot 2013 voornamelijk gescheiden ingezameld. Hierna gingen veel gemeenten over naar de gecombineerd gescheiden inzameling van kunststofverpakkingen en drankenkartons, ook wel PD genaamd. Vanaf 2015 is het inzamelportfolio verder verbreed in veel gemeenten naar kunststofverpakkingen, drankenkartons en metaalverpakkingen, ook wel PMD genaamd. Gelijktijdig veranderden in veel gemeenten de inzamelwijzen voor deze verpakkingen en voor restafval. Zo wordt PMD nu in een grote groep gemeenten in mini-containers ingezameld en gelijktijdig is de inzamelrequentie voor restafval verlaagd van tweewekelijks naar vierwekelijks. Het gehalte restafval in de ingezamelde kunststofverpakkingen nam als gevolg van deze veranderingen toe [20,24]. Hierdoor is het voor de sorteerbijbedrijven steeds lastiger geworden om sorteerproducten te maken die voldoen aan de specificaties. De Vereniging Afvalbedrijven heeft acceptatiecriteria opgesteld [25]. Sorteerbijbedrijven controleren elke vracht aan ingezameld verpakkingsmateriaal door middel van visuele inspectie. Dit heeft er inmiddels toe geleid dat vrachten ingezameld materiaal regelmatig worden geblokkeerd en geretourneerd. Belangrijke kwaliteitskenmerken van ingezameld materiaal zijn het percentage restafval, het percentage kunststof niet-verpakkingen, agglomeraten, geur en biologische activiteit (specifiek insectenoverlast). De meeste sorteerbijbedrijven zijn in de zomer van 2016 begonnen met het besproeien van of het ingezameld materiaal of specifieke sorteerproducten met verdelingsmiddel om de hygiëne en arbeidsomstandigheden in de sorteerbijbedrijven te bewaken. Dus doordat het ingezamelde materiaal steeds heterogener en vervuilerd wordt, wordt het voor de sorteerbijbedrijven lastiger om producten te maken die voldoen aan de specificaties.

Kwaliteit sorteerproducten

Sorteerinstallaties maken (op basis van de huidige afspraken) met behulp van scheidingsmachines en menselijke controle 5 à 7 kunststofproducten: PET, PE, PP, Film, MIX, PET-schalen en soms ook nog meng polyolefine. In deze installaties worden de verpakkingen objectgewijs gesorteerd. Dus als het hoofdkunststof PE is van een object, dan wordt de hele verpakking gesorteerd naar de PE fractie. Bijvoorbeeld een verpakking voor wasverzachter kan zijn opgebouwd uit een fleslichaam van PE, een krimlabel van PS en een dop van PP. Toch zal die hele fles worden gesorteerd richting het PE sorteerproduct. Sorteerproducten bevatten dus hoofdzakelijk de beoogde verpakkingen van het juiste hoofdkunststof en daarnaast ook niet-beoogde verpakkingen (sorteerfouten), niet-verpakkingen van het juiste hoofdmateriaal, niet-verpakkingen van een ander hoofdmateriaal en diverse soorten restafval. De sorteerproducten zijn halffabricaten die worden verhandeld met recyclingbedrijven. Om die handel te stroomlijnen zijn er kwaliteitsnormen opgesteld. Dit gebeurde al in de jaren negentig in Duitsland. Deze specificaties zijn een paar keer bijgesteld naar aanleiding van nieuwe opkomende verontreinigingen en de mogelijkheden die betere scheidingstechnologieën boden. Nederland is na 2008 aangehaakt aan dit Duitse systeem en volgt dit systeem van DKR specificaties [12], alhoewel het een aanvullende specificatie voor PET-schalen en PO-MIX heeft opgesteld [13]. Elke specificatie bevat een lijst van verontreinigingen die er helemaal niet in mogen zitten, zoals metalen objecten met een stuk-gewicht van meer dan 100 gram en een lijst concentratie-drempelwaarden. Bekend is bijvoorbeeld de eis dat in PET 328-1 het gehalte aan PVC objecten niet meer dan 0,1% mag bedragen. Hierbij is het belangrijk dat deze drempelwaarden en de uitkomsten van controles altijd gebaseerd zijn op object-gewijze analyses, waarbij dus geen rekening wordt gehouden met de insleep van vreemd-kunststoffen uit verpakkingscomponenten.

Ondanks dat alle sorteerbijbedrijven producten moeten maken die voldoen aan de criteria, gebeurt dit niet altijd. Hiervoor zijn meerdere oorzaken. Ten eerste zijn zeer veel verschillende installaties met verschillende prestatieniveaus: modern en relatief oud, ingewikkeld en eenvoudig [14]. Ten tweede, kan de kwaliteit van het ingaande materiaal sterk variëren met de gemeente waar het vandaan komt en het gehanteerde inzamel-portfolio (mono-plastic, PD of PMD). Ten derde wordt de prestatie van de installatie bepaald door diverse machine-instellingen en de oplettendheid van de menselijke kwaliteitscontroleurs aan de sorteerband. Bovendien kunnen leidinggevendenden het sorteerbeleid aanpassen. Sorteerbijbedrijven maken bewuste economische afwegingen binnen de ruimte die de contracten hun bieden. In het

algemeen is het voor hen gunstig om relatief veel sorteerproducten met een positieve handelswaarde te produceren (PET, PE, PP) en zo min mogelijk sorteerproducten met een negatieve handelswaarde (sorteerrest, Mix). Maar aan het vergroten van het volume van de producten met een positieve waarden, zitten grenzen die door specificaties worden gesteld. Onder de specifieke contractvoorwaarden die sorteerbebedrijven gelden sinds 1 januari 2015 is het voor hen nu gunstig om zoveel mogelijk kunststof-sorteerproducten (PET, PE, PP, FILM en MIX) te produceren en zo min mogelijk sorteerrest. Daarnaast kunnen ze de verwerkingssnelheid verhogen. Dan verwerken ze meer materiaal per tijdseenheid, maar neemt de kwaliteit van de producten af, waardoor de kans op afkeur door de recyclingbedrijven toeneemt. Kortom, de kwaliteit van sorteerproducten wordt door veel verschillende factoren beïnvloedt, waaronder contractafspraken en bedrijfsmatige afwegingen. In Nederland voert Nedvang maandelijkse controles uit bij alle sorteerbebedrijven die Nederlandse huishoudelijke kunststofverpakkingen verwerken. De sorteerproducten worden verhandeld aan recyclingbedrijven en die maken hier of een tussenproduct (gewassen maalgoed) of een eindproduct (recyclaat) van, die ze verder verhandelen.

Polymere verontreinigingen beperken de toepasbaarheid van recyclaat

De verschillende typen polymeren (PE, PP, PS, PET) die gebruikt worden in huishoudelijke kunststofverpakkingen zijn niet mengbaar. In kunststofverpakkingen worden echter verschillende kunststoffen gebruikt voor de verschillende verpakkingscomponenten. Bovendien is het sorteerproces niet ideaal [15] en zijn er sorteerfouten. Zodoende zijn de recyclaten niet zuiver maar bevatten ze polymere verontreinigingen (zie ook figuur 2). Dit betekent dat er zich in de matrix van het hoofdkunststof domeinen vormen van vreemd-kunststoffen. Gevolg is dat het materiaal zijn transparantie verliest en de mechanische eigenschappen verslechteren [16]. Het recyclaat is bijna uitsluitend minder sterk en broos dan het nieuwe kunststof. Daarnaast wordt een deel van het vreemd-kunststof naar het oppervlak van het recyclaat gedwongen, waar het de oppervlakte-eigenschappen, als seal-sterkte en glans negatief beïnvloedt.

Scherper inzicht in kwaliteit na recycling

In maatschappelijke beschouwingen is er behoefte aan eenvoudige, duidelijke begrippen, zoals 'recycling' (zoveel mogelijk dezelfde kwaliteitseigenschappen en dus waarde-behoud), 'upcycling' en 'downcycling'. Vanuit de natuurwetenschap kon hier langere tijd geen eenvoudige, kwantitatieve maatstaf voor de kunststofkwaliteit tegenover gesteld worden. Immers er zijn meerdere relevante eigenschappen (kleur, geur, smeltviscositeit, etc.).

Recent onderzoek uit Nederland en Vlaanderen stelt echter dat voor huishoudelijke kunststofverpakkingen de polymeer-zuiverheid een eerste goede maat is, om de toepasbaarheid van het recyclaat in te schatten [16]. In tabel 1 is de gemeten polymeer-zuiverheid weergegeven voor gewassen maagoederen gemaakt van Nederlandse huishoudelijke kunststofverpakkingen met een eenvoudig laboratorium recyclingproces. Dit is een benadering van de werkelijkheid omdat recyclingbedrijven óf uitgebreidere recyclingprocessen hebben met additionele sorteer- en scheidingsstappen óf zelfs de uitvoering van een het eenvoudige laboratoriumproces niet halen.

Uit de meetgegevens in tabel 1 blijkt dat de polymeer-zuiverheid van recyclaten gemaakt van huishoudelijke verpakkingen ingezameld met een statiegeldsysteem het hoogst is, gevolgd door nascheiden en bronscheiden. In de getoonde meetresultaten is de kunststofzuiverheid van het nagescheiden PET materiaal zelfs iets hogerⁱⁱⁱ, maar opgemerkt moet worden dat het PET uit statiegeldsysteem voor deze test werd opgewerkt met een redelijk basaal recyclingproces. Terwijl in de praktijk vaak meer geavanceerde recyclingprocessen worden gevolgd voor PET uit statiegeld [17]. Het gehalte polymere verontreinigingen in PET uit statiegeldsystemen met geavanceerde recyclingprocessen is zodoende meestal lager dan die uit bron- of nascheiden [17]. Hierbij speelt mee dat er nauwelijks foutief gesorteerde objecten in de gesorteerde (getelde) grondstof zit en de aanwezige verpakkingscomponenten (dop, sluitring, label, hotmelt) goed tijdens recyclingprocessen kunnen worden afgescheiden.

In het PET-recycklaat uit bron- en nascheiden zijn juist wel vreemd-kunststoffen aanwezig die afkomstig zijn uit foutief gesorteerde objecten en er ook nog eens verpakkingscomponenten aanwezig zijn die slecht kunnen worden afgescheiden met een conventioneel recyclingproces, zoals PS-labels, siliconenventielen, POM-plunjers, glazen balletjes, ABS onderdelen etc. [17]. We kunnen vaststellen dat de grote PET-flessen die nu in het Nederlandse statiegeldsysteem aanwezig zijn, wel 'designed-for-recycling' zijn terwijl een deel van de PET flessen en flacons die nu in het gescheiden inzamelsysteem of nascheiding-systeem zitten dit nog niet zijn. Dus een gedeelte van de polymere verontreinigingen kunnen niet aan het inzamelsysteem worden verweten, maar zijn afgeleid van het verschil in verpakkingsontwerp [17].

Tabel 1

Gemeten polymeer-zuiverheden van gewassen maalgied uit recycling van verschillende sorteerproducten uit statiegeld, PET, PE, PP, Film en MIX uit bron en nascheiding met standaard proces. Voor Folie werd alleen PE als gewenst kunststof genomen en voor MIX PE en PP [16, 17].

Grondstof	Hoofdkunststof	Vreemd-kunststoffen	Restafval
PET ST	99,3%	0,6%	0,1%
PET GI	97,2%	2,8%	0,0%
PET NA	99,4%	0,2%	0,4%
PE GI	90,6%	9,3%	0,1%
PE NA	94,0%	3,0%	3,0%
PP GI	90,6%	9,2%	0,2%
PP NA	95,0%	4,2%	0,8%
Folie GI	76,4%	22,7%	0,9%
Folie NA	96,8%	2,8%	0,4%
Mix GI	63,5%	30,2%	6,3%
Mix NA	72,6%	25,6%	1,8%

Voor PET recycklaat gemaakt met een standaard mechanisch recyclingproces uit of gescheiden ingezameld PET of nagescheiden PET zijn specifiek de gehalten PVC (rond de 1 promille) en andere kunststoffen (rond de 1 à 3 promille) [16, 17] kritisch om er weer flessen van te blazen. Bovendien bestaat er nu nog geen sorteertechnologie om het gehalte non-food-flessen betrouwbaar onder de 5% te krijgen, zodat toepassen in drankflessen nu lastig is^v. Daar staat tegenover dat de toepassing in *strapping*, *non-food-trays* (onder andere bekend van potplanten) en *fleece fibre fill* wel mogelijk is.

Voor PE recycklaat gemaakt met een standaard mechanisch recyclingproces uit of gescheiden ingezameld PE of nagescheiden PE zijn gemaakt, zijn specifiek de gehalten PP en PS te hoog voor hergebruik in non-food-flacons. Door een aangepast recyclingproces kan er een gedeelte van het PE worden opgewerkt tot een kwaliteit zonder PS en met minder dan 2% PP waardoor hergebruik in non-food-flacons mogelijk wordt.

Uit tabel 1 blijkt ook dat de polymeer-zuiverheid van recyclaten gemaakt van nagescheiden huishoudelijk kunststoffen iets groter is dan die gemaakt van gescheiden ingezamelde kunststoffen. De reden hiervoor is dat gesorteerde kunststoffen uit nascheiding twee of meer keren door machines op kunststofsoort zijn gesorteerd, een keer bij de nascheiding en een of meerdere keren in het sorteerbeidrijf. Terwijl de kunststoffen uit het gescheiden inzamelsysteem alleen in het sorteerbeidrijf op kunststofsoort zijn gesorteerd. Daar staat dan wel tegenover dat het gehalte restafval in gewassen maalgiederen uit nascheiding iets hoger zijn dan die uit gescheiden inzameling.

De moleculaire verontreiniging van nagescheiden kunststof is in het algemeen groter dan van gescheiden ingezamelde kunststof. Oftewel het ruikt sterker. Hierdoor zijn er recyclingbedrijven die geen nagescheiden, gesorteerd materiaal willen verwerken. Dit zijn vaak recyclinginstallaties die er niet op toe gerust zijn om de grotere hoeveelheid geur te verwijderen of een waterzuivering hebben met een beperkte capaciteit. Recyclingbedrijven die hier wel op toegerust zijn, of die producten maken die minder geur-kritisch zijn, nemen dit materiaal juist graag aan vanwege de hogere polymeer-zuiverheid. Een derde verschil tussen bron- en nagescheiden materiaal is het recyclingrendement van sorteerprouduct tot gewassen maalgouderen. Omdat het gehalte aanhangend vuil aan nagescheiden kunststof iets hoger is dan aan gescheiden ingezameld kunststof wordt er sterker vervuild afvalwater en meer afvalslib geprouduceerd. Het verwerken hiervan kost het recyclingbedrijf geld, zodat ze daarmee rekening houden bij het bieden op de gesorteerde grondstof. In tabel 2 staan de recyclingrendementen zoals we die bepaald hadden voor tientallen sorteerprouducten van voor 2015.

Tabel 2

Massarendementen van de recycling van gesorteerde prouducten uit het gescheiden inzamelsysteem (GI) en het nascheidingsysteem (NA) tot gewassen maalgouderen, zowel het drijfgoed als het zinkgoed [18].

Grondstof, (Sorteerprouduct)	Droge stof gehalte van het ongewassen maalgoude	Massarendement drijvend maalgoude	Massarendement zinkend maalgoude	Massarendement slib	Opgeloste stof
PET GI	93%	11±1%	83±2%	3±2%	3±2%
PET NA	87%	10±2%	84±2%	3±2%	3±2%
PE GI	95%	94±2%	3±1%	0.8±0.3%	2±2%
PE NA	96%	93±2%	2±2%	1±2%	4±2%
PP GI	99%	90±1%	7±1%	0.7±0.6%	3±1%
PP NA	88%	83±2%	3±2%	6±2	8±2%
Film GI	97%	90±6%	4±4%	0.8±0.6%	6±3%
Film NA	87%	83±15%	4±2%	3±4%	10±9%
MIX GI	98%	64±12%	32±11%	0.7±0.8%	5±1%
MIX NA	87%	65±4%	28±1%	3.1±0.1%	4±3%

Uit tabel 2 blijkt dat de massarendementen logischerwijs een weerslag zijn van de kwaliteit van de sorteerprouducten. Uit de PET sorteerprouducten worden twee gewassen maalgouderen gemaakt. Het hoofdprouduct is het zinkgoed, dat hoofdzakelijk bestaat uit PET maalgoude van fleslichamen. Het bijprouduct is het drijfgoed dat uit doppen, labels en wat sorteerfouten bestaat. Daarnaast wordt er nog een slib-bijprouduct gemaakt van een gedeelte van de verpakkingscomponenten (de papieren labels), prouductresten en het meegekomen restafval. Tenslotte is een gedeelte van deze prouductresten en meekomend restafval in oplossing gebracht en dit zal naar een waterzuivering moeten worden geleid. Voor alle andere sorteerprouducten is het drijfgoed het hoofdprouduct met hoofdzakelijk het beoogde kunststof maar ook enkele vreemd-kunststoffen uit sorteerfouten en verpakkingscomponenten. Het zinkgoed is het bijprouduct met voornamelijk ongewenste kunststoffen uit sorteerfouten en verpakkingscomponenten. Duidelijk is dat de hogere gehalten restafval en aanhangend vocht en vuil in de nagescheiden en gesorteerde kunststoffen zich vertalen in hogere gehalten slib en opgeloste stof in vergelijking met de gescheiden ingezamelde en gesorteerde kunststoffen.

Hierbij moet opgemerkt worden dat juist in de laatste twee jaar de kwaliteit van de sorteerprouducten uit gescheiden inzameling gemiddeld genomen is verslechterd door een toename van het gehalte restafval [20]. Zodoende zullen de verschillen in recyclingrendementen tussen gescheiden ingezamelde en nagescheiden sorteerprouducten nu waarschijnlijk minder groot zijn.

Moleculaire verontreiniging van gerecyclede kunststoffen

In de afgelopen jaren is de kennis over de polymere verontreiniging van gerecyclede kunststoffen flink toegenomen. De moleculaire verontreiniging in gerecyclede PET uitgebreid onderzocht in het kader van goedkeuringsprocedures voor het hergebruik van rPET in flessen [27]. Van de moleculaire verontreiniging in andere gerecyclede kunststoffen (PE, PP, Film, MIX) is minder bekend. Wel is er recent een artikel verschenen over de moleculaire verontreiniging van PE uit gescheiden inzameling [30]. Hier uit blijkt dat er in gerecyclede PE een groot aantal verschillende geurstoffen werden teruggevonden die verband houden met productresten als schoonmaakproducten en cosmetica. Daarnaast werd er nog een grotere hoeveelheid onbekende moleculen gedetecteerd. Het recyclingproces van PE lijkt deze moleculaire verontreiniging weinig te beïnvloeden, alleen door vacuüm-ontgassing kon een gedeelte van deze verontreiniging worden verwijderd.

Zowel geur als migratie zijn gevolgen van moleculaire verontreiniging. Niet alle moleculen die als verontreiniging in gerecyclede kunststoffen aanwezig zijn zullen echter ruiken en/of migreren. Kortom er zijn nog heel veel onbeantwoorde vragen over moleculaire verontreiniging van in het bijzonder gerecyclede PE, PP, Film en MIX. Allereerst zijn er methodische vragen over hoe moleculaire verontreiniging in gerecyclede kunststoffen het beste bestudeerd kunnen worden. Hoe kunnen we meer moleculen identificeren en hoe gaan we om met ongeïdentificeerde moleculen? Er zijn dus ook nog geen vergelijkende studies gedaan naar het verschil in moleculaire verontreiniging tussen gerecyclede kunststof uit gescheiden inzameling of nascheiding.

Dilemma's en discussie

Terwijl ongeveer twee-derde van de huishoudelijke kunststofverpakkingen worden gebruikt om levensmiddelen te beschermen, is slechts een gering aandeel van de hieruit gemaakte recyclaten^v weer geschikt om levensmiddelen in te verpakken. Door de uitgebreide moleculaire verontreiniging die niet teniet kan worden gedaan [21] zijn immers de meeste recyclaten niet *food-grade*.

Een tweede dilemma in de recycling van kunststofverpakkingen is al jaren: kwaliteit versus kwantiteit (de breedte van het inzamelportfolio). In het geval het doel van het recyclingsysteem is om een hoge kwaliteit recyclelaat te verkrijgen is een statiegeldsysteem aantrekkelijk. Ten eerste zijn er nauwelijks sorteerfouten, geen niet-verpakkingen en geen restafval in het ingezamelde materiaal. Ten tweede kan er effectief worden gestuurd om de verpakkingsontwerpen binnen het systeem ook geschikt te laten zijn voor recycling, door de directere contacten tussen verpakkende bedrijven en recyclingbedrijven. Hierdoor kan de belasting met vreemd-kunststoffen uit verpakkingscomponenten worden beperkt. Daar staat tegenover dat een statiegeldsysteem slechts beperkt is uit te breiden naar andere verpakkingen. Behalve dat dat tot enorme rijen in de supermarkten zou leiden, tot complexe herverdelingen gaat leiden tussen diverse soorten winkels (supermarkten, benzinestations, drogisterijen, bouwmarkten, etc.) wordt het door de verschillende verpakkingsvormen steeds lastiger om alles via één machine in te nemen. Ronde shampoo-flacons en wc-reiniger-flacons uit PE zouden misschien nog wel gaan, maar blokvormige schepijsbakken van PP, cilindervormige PP yoghurtbekers met resten, blokvormige PET schalen met resten en flexibele folieverpakkingen van PE en PP worden technisch al een stuk lastiger. Bovendien zou een dergelijke portfolio-verbreding automatisch leiden tot een nieuwe soort telcentrum dat dan eigenlijk meer op een sorteercentrum gaat lijken, waardoor de kans groot wordt dat het voordeel van een statiegeldsysteem (geen sorteerfouten) teniet gedaan wordt. Het is technisch en organisatorisch onmogelijk om alle kunststofverpakkingen van huishoudens terug te krijgen via een statiegeldsysteem. Om toch zoveel mogelijk kunststofverpakkingen te recyclen zijn er na 2008 gescheiden inzamel- en nascheiding-systemen gekomen. Hiermee kunnen alle kunststofverpakkingen (en recent zelfs drankenkartons, metaalverpakkingen en niet-verpakkingen) worden teruggehaald. De netto-ketenrendementen zijn helaas op nationaal niveau zo'n 20 à 30%^{vi} voor 2014 [16]. Desalniettemin is het inzamelportfolio voor dit systeem wel breder en werden er in 2014 dus meer huishoudelijke kunststofverpakkingen gerecycled dan voor 2008. Bovendien is het een jong systeem dat nog ruimte biedt voor groei. Dit dilemma –kwaliteit versus kwantiteit– doet zich in alle Europese landen voor, maar met andere uitgangssituaties.

In België koos men in de jaren negentig er voor om geen statiegeldsysteem in te voeren, maar de kwaliteit van het recyclelaar hoog te houden door alleen de kunststof flessen en flacons te gaan inzamelen en gelijktijdig een streng kwaliteitscontrolebeleid in te voeren op het niveau van de burger. De PET die uit het Belgisch inzamelsysteem komt, staat als hoge kwaliteit te boek, maar wordt net iets minder gewaardeerd als de PET uit statiegeldsystemen. Vermoedelijk is het gehalte polymere contaminanten net iets hoger dan in Nederlands PET recyclelaar uit statiegeld. Daar staat tegenover dat het PE uit het Belgische systeem een stuk zuiverder is dan het PE uit het Nederlandse systeem en dus hoger gewaardeerd wordt^{vii}. Overigens is de Belgische politiek blijkbaar niet meer tevreden met dit systeem omdat de inzamelbreedte te beperkt zou zijn. Vanaf 2017 voert Fost-Plus verschillende testen uit met verbreding van het inzamelportfolio waarbij ook andere vormvaste verpakkingen en zelfs flexibele verpakkingen worden ingezameld. In 2018 zal duidelijk worden wat de effecten zijn van deze verbreding op de kwaliteit van de sorteerproducten en de kwaliteit van de gerecyclede kunststoffen.

De drijfveer voor het verbreden van de inzamelportfolio komt mede voort uit het groeiende ongemak met lekkage van kunststoffen in het milieu, zoals zwerfafval en plastic in de zee. Op Europees niveau worden recyclingdoelstellingen verhoogd voor kunststofverpakkingen met als hoop dat dit verlichting gaat bieden voor de ongewenste lekkage van kunststoffen naar het milieu. Deze hogere Europese doelstellingen worden vervolgens in de lidstaten vertaald naar nieuw beleid. Dit leidt in alle landen tot herbezinning en nieuw beleid, dus ook in België (zoals hierboven beschreven), in Duitsland en Nederland. In Duitsland had men het beleid dat men in principe alle kunststofverpakkingen inzamelt (de volle breedte) waarbij men slechts de helft ook echt als materiaal recyclet en de andere helft als brandstof toepast. Dit was enerzijds een pragmatische oplossing voor het gegeven dat een gedeelte van de kunststofverpakkingen relatief goed recyclebaar is en het andere gedeelte dat niet is, anderzijds werd zo aan de Duitse hergebruiksdoelstelling voldaan en konden de kosten zo worden beperkt.

In Nederland heeft men in 2007 de keuze gemaakt dat alle huishoudelijke kunststofverpakkingen ingezameld en gerecycled moeten gaan worden, dus zowel de goed recyclebare verpakkingen als de minder of niet-recyclebare verpakkingen. Er mochten alleen uitzonderingen gemaakt worden voor verpakkingen die echt schade aan het recyclingsysteem brengen, zoals kitkokers, doordrukstrips, huishoud-chemicaliënverpakkingen en EPS. Zodoende worden er verschillende producten gemaakt: de zogenoemde mono- of waarde-producten (PET, PE, PP, Film) en één mengkunststofproduct (MIX). In de MIX zitten de niet-recyclebare verpakkingen geconcentreerd. Desalniettemin bestaat de MIX voor het grootste gedeelte uit goed-recyclebare verpakkingen die er deels door snel en slecht sorteren in terecht zijn gekomen en deels bewust er aan zijn toegevoegd om de MIX nog afzetbaar te houden naar de MIX-verwerkers. Het recyclen van MIX kost relatief veel geld en leidt tot producten met een relatief lage economische waarde; verkeersbord-voetjes, verkeersbaan-afscheider, dikwandige speeltoestellen, etc.

Omdat de recyclingdoelstellingen in Europa worden verhoogd en dit vertaald wordt of in een breder inzamel-portfolio of in een groter percentage ingezameld materiaal dat gerecycled moet worden, neemt de druk op verpakkende bedrijven toe om hun verpakkingsontwerp aan te passen. Dit is echter niet altijd mogelijk. Hiervoor zijn meerdere redenen en meerdere voorbeelden. Zo is bij farmaceutische producten de verpakkingsvorm in de toelatingsvergunning vastgelegd en wordt een her-aanvraag met een beter recyclebare verpakking door de farmaceutische industrie te kostbaar geacht. Bij de vleesindustrie is de sluitingssnelheid van verpakkingen heel belangrijk om competitief te blijven, vandaar dat deze industrie PET-PE schalen gebruikt, alhoewel die momenteel (nog) niet te recyclen zijn [22]. Veel producenten van luxe vers-artikelen kiezen voor een verpakking met een zwarte schaal, omdat dit het product beter laat uitkomen en dus verwacht men er meer mee te verkopen, ondanks dat die (nog) niet optisch gesorteerd kunnen worden. Voor veel producenten van vochtgevoelige en of zuurstofgevoelige producten is een goede bescherming belangrijk. Dit kan alleen met meerlaagse laminaat-folieverpakkingen en gemetalliseerde folies (ook wel chipszakken genoemd), ook al is bekend dat deze verpakkingen nu nog niet recyclebaar zijn.

Dit derde dilemma (tussen de nieuwe eis van recyclebaarheid en bestaande eisen die aan verpakkingen gesteld worden) is niet eenvoudig op te lossen. Dit is uitgebreid besproken door de Ellen Macarthur Foundation in hun *New plastic economy* document [23]. Zij stellen een aanpak voor langs vijf lijnen:

1. Fundamenteel herontwerp van verpakkingen en gebruikssystemen.
2. Innovatie stimuleren om meerlaags verpakkingen te vervangen door nieuwe recyclebare of composteerbare alternatieven.
3. Het verkennen van de mogelijkheden om PVC, PS en EPS verpakkingen te vervangen door verpakkingen die gemaakt zijn van een beperkt aantal kernmaterialen (lees PE, PP en PET), zonder dat de mogelijkheden voor materiaalinnovatie worden belemmerd.
4. Composteerbare verpakkingen implementeren voor toepassingen waar er veel productresten in verpakkingen achterblijven na gebruik.
5. Nieuwe verwerkingstechnologieën verkennen om verpakkingen die nu niet sorteer- en/of recyclebaar zijn, toch met nieuwe technologie te kunnen verwerken tot waardevolle producten, zoals chemische recycling en *design-from-recycling* [29].

De complexiteit van deze voorgestelde aanpak is een weerspiegeling van de complexiteit van het dilemma (recyclebaarheid versus traditionele eisen die aan verpakkingen worden gesteld). Er is nog veel onderzoeks- en ontwikkelingswerk nodig om het gehalte niet-recyclebare verpakkingen wezenlijk te verminderen.

De kennisgrenzen

Ondanks dat er in de laatste jaren forse stappen zijn gezet in het beter begrijpen van de kwaliteit van gerecyclede kunststoffen, zijn er nog steeds kennislacunes. In deze afsluitende paragraaf schetsen wij de kennisbehoefte voor de nabije toekomst. Deze kennislacunes liggen onder andere op het gebied van het karakteriseren van grondstoffen. We kunnen bijvoorbeeld nu niet bepalen welke grades PE aanwezig zijn een PE-recycalaat en wat de verhouding is tussen HDPE, LDPE en LLDPE, etc. Daarnaast zijn er rechtszaken gevoerd over het gehalte *recycled content*; we ontberen een meetmethode voor het bepalen van het gehalte *recycled content* in een kunststof.

Ten tweede, nu we beter begrijpen welke polymeer-zuiverheid recyclaten bezitten, wordt de vraag meer prangend welke zuiverheden we eigenlijk nodig hebben voor welke toepassingen. Welke polymere contaminanten zijn volledige stoorstoffen? En wat is het maximale gehalte aan andere contaminanten, zonder dat toepassingen onmogelijk worden? Deze informatie is leidend als men nieuwe specificaties wil opstellen. Uit de industriële praktijk zijn een aantal maximale gehalten bekend, maar deze zijn nog ver van compleet en ook niet onafhankelijk getoetst.

Ten derde hoe kunnen we het derde dilemma (in de paragraaf hierboven beschreven) praktisch het meest effectief helpen op te lossen? Deze discussie richt zich binnen de Nederlandse context al snel tot MIX-reductie. De problemen met MIX lijken het beste met een dubbelstrategie te kunnen worden aangepakt; door gelijktijdig te werken aan zorgvuldiger sorteren waardoor er minder goed recyclebare verpakkingen in de MIX terechtkomen en oplossingsroutes voor de nu nog niet-recyclebare verpakkingen te ontwikkelen. Welke niet-recyclebare verpakkingen kunnen we uit de MIX praktisch afscheiden en wat kunnen we daarmee maken? Kunnen we hiervoor chemische recycling of *design-from-recycling* verwerkingsmogelijkheden ontwikkelen?

Ten vierde, met de steeds geavanceerdere analysetechnologieën zijn we steeds beter in staat om moleculaire verontreinigingen in recycalaat te isoleren en de identificeren. Dit geldt overigens breed voor alle consumptiegoederen. Dit zal telkens leiden tot nieuwe onderzoeksvragen; waar komen de nieuw gevonden verontreinigingen vandaan, hoeveel is toelaatbaar en wat kunnen we er tegen doen. Specifieke aandacht hierbij hebben de NIAS (niet bewust toegevoegde verbindingen).

Verwijzingen

- 1 Johannes Brandrup, "Recovery and recycling of plastics", Hanser Books, 1996 Hamburg.
- 2 Maharana T, Negi YS, Mohanty B, 2007, "Recycling of polystyrene" Polymer-Plastics Technology and Engineering, 46: 729-736, 2007 DOI: 10.1080/03602550701273963
- 3 Kostadinova Loutcheva M, Proietto M, Jilov N, La Mantia FP, 1997, "Recycling of HDPE containers" Polymer Degradation and Stability 57 (1997) 77-81.
- 4 Meran C, Ozturk O, Yuksel M, 2008 "Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene" Materials and Design 29 (2008) 701-705.
- 5 Awaja F, Pavel D, 2005 "Recycling of PET" European Polymer Journal 41 (2005) 1453-1477
doi:10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005.
- 6 Thøgersen J, 1996 "Recycling and morality" Environment and behaviour 28(4), 536-558.
- 7 Heyde M, Holley W, Kremer M, 1996 "Ökobilanzen zur Verwertung Kunststoffabfällen aus Sammlungen des Duales Systems" VDI Berichte 1288, 57-77.
- 8 Björklund A, Finnveden G 2005 "Recycling revisited – life cycle comparisons of global warming impact and total energy use of waste management strategies" Resources Conservation and Recycling 44 309-317.
- 9 Perugini F, Mastellone ML, Arena U 2005 "A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes" Environmental Progress 24(2), 137-154.
- 10 Berglund C, 2005 „Economic efficiency issues with respect to recycling behaviour and waste management policy" Int. J. Sustainable Development 8(3), 222-238.
- 11 Viliplana F, Karlsson S, 2008 "Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review" Macromol. Mater. Eng. 2008, 293, 274-297.
- 12 De specificaties voor de sorteerproducten zijn opgesteld door DKR (Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe) en te vinden op hun website: <http://www.gruener-punkt.de/en/download.html>
- 13 Additionele Nederlandse specificaties, zie website KIDV: <https://www.kidv.nl/6307/kwaliteitseisen-voor-pet-bakjes-mixed-polyolefin-en-polystyreen.html?ch=DEF>
- 14 Jansen M, Thoden van Velzen EU, Pretz T "Handbook for sorting plastic packaging waste concentrates" FBR report 1604, 2015 October, Wageningen, <http://edepot.wur.nl/362985>
- 15 Thoden van Velzen EU "Technisch haalbare sorteer-rendementen" FBR report 1495, 2014 Juli, Wageningen, <http://edepot.wur.nl/311244>
- 16 Brouwer MT, Thoden van Velzen EU, Augustinus A, Soethoudt H, DeMeester S, Ragaert K 2017 "Predictive model for the Dutch post-consumer plastic packaging recycling system and implications for the Circular Economy" Waste Management, 71 (2018) 62-85, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.034>.
- 17 Thoden van Velzen, E.U., Brouwer, M.T., Molenveld, K., 2016. Technical quality of rPET. FBR 1661. Wageningen Food&Biobased Research, Wageningen, NL, pp. 1-147. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/392306>
- 18 Thoden van Velzen, E.U., Jansen, M., Brouwer, M.T., Feil, A., Molenveld, K., Pretz, T., 2016. Efficiency of recycling post-consumer plastic packages. In: Proceedings of the 32th International Conference of the Polymer Processing Society 25-29 July, Lyon, AIP Conference Proceedings 1914, 170002 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.5016785>
- 19 Leenaars Y, Boer E, Thoden van Velzen EU "Aandeel Kunststoff niet-verpakkingen in gesorteerde producten" Eureco WUR report 2016 april, <https://www.nedvang.nl/uitgelicht/rapport-onderzoek-aandeel-kunststof-niet-verpakkingen>
- 20 Thoden van Velzen EU, Brouwer MT, Picuno C, "Verbeteropties voor de recycling van huishoudelijke kunststof-verpakkingen" WFBR report, scheduled for May 2018.
- 21 Dutra C., Reyes F.G.R., Freire M.T., Nerín C., Bentayeb K., Rodriguez-Lafuente A. and Aznar M., Migration of residual nonvolatile and inorganic compounds from recycled post-consumer PET and HDPE, J. Braz. Chem. Soc. **25** (4), 2014, 686-696.
- 22 Thoden van Velzen U. "recyclingopties voor PET schalen" WFBR rapport 1761, 20 juli 2017, Wageningen <https://doi.org/10.18174/419818>
- 23 Ellen MacArthur Foundation. 2016. The new plastics economy. Rethinking the future of plastics.
- 24 Thoden van Velzen EU, Huremovic D, Keijsers ERP, Op den Kamp R, Brouwer MT, "Recycling of beverage cartons in the Netherlands 2016" WFBR report, scheduled for 2018.
- 25 VA acceptatieprocedure voor PMD materiaal, 31 mei 2017, https://www.verenigingafvalbedrijven.nl/fileadmin/user_upload/Documenten/PDF2017/VA_Factsheet_Acceptatieprocedure_PMD.pdf
- 26 KIDV, "Kunststofketen-project", zie <https://www.kidv.nl/6072/onderzoek-kunststofketen.html>
- 27 Welle, F "Wie sicher sind recycelte PET Flaschen?" Brauwelt 2015, 37-38, 1096-1098.

- 28 Hahladakis JN, Velis C, Weber R, Iacovidou E, Purnell P. 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling *Journal of Hazardous Materials* 344, 179–199 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- 29 Veelaert L, Du Bois E, Hubo S, Kets van K, Ragaert K (2017). Design from Recycling. EKSIG Conference 2017: Alive. Adaptive, Rotterdam.
- 30 Strangl M, Schlummer M, Maeurer A, Buettner A "Comparison of the odorant composition of post-consumer highdensity polyethylene waste with corresponding recycled and virgin pellets by combined instrumental and sensory analysis" *Journal of Cleaner Production* 181 (2018) 599-607 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.137>

Eindnoten

ⁱ Die toegestane 10% niet-flessen in de PET 328-1 specificatie staat onder druk. Ons is bekend dat steeds meer recyclingbedrijven lagere gehalten aan niet-flessen beginnen te eisen.

ⁱⁱ PET Schalen zijn niet alleen gemaakt van een andere grade PET, ze bevatten vaak ook een PE coating die een snelle sluiting van de schalen mogelijk maakt [22].

ⁱⁱⁱ Uit de praktijk is bekend dat de PET fractie uit nascheiding veel intensiever wordt gecontroleerd op kwaliteit door een menselijke sorteerploeg dan dat bij de PET fractie uit bronscheiding het geval is.

^{iv} Wel wordt een gedeelte van deze stroom in statiegeld-PET ingemengd in een mengverhouding zodat de 5% overall non-food-flacons niet wordt overschreden.

^v In Nederland is nu alleen PET-recycalaat uit het statiegeldsysteem potentieel food-grade. Het PET-recycalaat uit het gescheiden inzamel- en nascheiding-systeem bevat teveel non-food flessen die nu nog niet effectief machinaal kunnen worden verwijderd [17].

^{vi} Gemeten over de hele recyclingketen van het potentiaal bij de huishoudens aan kunststofverpakkingen tot geproduceerde gewassen maaggoederen.

^{vii} De opbrengsten van Fost-Plus zijn te vinden op hun website. De opbrengsten van het Nederlandse inzamelsystemen zijn niet openbaar. Echter zowel verkopende partijen als inkopende partijen laten in vertrouwen nota's zien waaruit de verschillen blijken.