



Centraal Planbureau

CPB Achtergronddocument | 13 september 2017

De circulaire economie van kunststof: van grondstoffen tot afval

Annemiek Verrips
Sander Hoogendoorn
Krista Hoekstra
Gerbert Romijn
Kees Folmer
Joost van Gemeren

CPB Achtergronddocument

De circulaire economie van kunststof: van grondstoffen tot afval

13 september 2017

**Annemiek Verrips, Sander Hoogendoorn, Krista Hoekstra, Gerbert
Romijn, Kees Folmer en Joost van Gemeren**

Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies—3

1 Inleiding—15

2 Kunststofproductie—16

2.1 Typen kunststof en toepassingen—17

2.2 Fossiele productie—17

2.2.1 Volumes van fossiele kunststoffen—17

2.2.2 Prijzen van fossiele kunststoffen—19

2.2.3 Marktmechanismen—19

2.3 Fossiele grondstoffen: olie en NGL—23

2.4 Volumes en voorraden olie en NGL—23

2.4.1 Prijzen aardolie—25

2.4.2 Prijzen NGL—27

2.4.3 Toekomst op de oliemarkt—28

2.5 Primaire productie via biomassa—29

Bioplastics: biobased versus biologisch afbreekbaar—30

2.5.1 Volumes biobased plastics—30

2.5.2 Gebruik van biomassa en benodigd areaal—31

2.5.3 Prijzen biobased plastic—31

2.5.4 Overwegingen bij biobased bioplastic—31

3 Kunststofafval en recycling—32

3.1 Afval- en recyclingbalans kunststof—32

3.2 De markt voor gerecycled kunststof—34

3.3 Toepassingen en beperkingen—37

4 Externe effecten—39

4.1 Winning van grondstoffen—39

4.2 Productie en transport—42

4.3 Afval—42

4.3.1 Afvalresidu na verbranding—43

4.3.2 Zwerfafval—43

4.3.3 Plasticsoep—44

4.4 CO₂-emissie fossiel en gerecycled kunststof—46

4.4.1 CO₂-emissies productie primair kunststof, recyclen en verbranden—46

4.4.2 Omvang CO₂-reductie recyclen huishoudelijk kunststofafval in Nederland—49

4.5 Externe effecten in de keten van biobased plastic—49

4.6 Externe effecten van andere substituten van kunststof—50

Bijlage A Volumerekening kunststof in Nederland—52

Bijlage B Afval- en recyclingbalans kunststof—53

Referenties—57

Samenvatting en conclusies

Deze studie geeft een welvaartseconomisch overzicht van de circulariteit van de kunststofketen. De studie gaat in op de belangrijkste stromen van primaire productie, recycling en afval van kunststoffen, benoemt de belangrijkste mechanismen die vraag en aanbod van kunststoffen beheersen en geeft aan waar de belangrijkste schades optreden.

De circulaire economie en circulair economisch beleid zijn erop gericht om gebruik van grondstoffen te verminderen, hergebruik en recycling te bevorderen en afvalproductie te beperken en zo de ecologische voetafdruk van menselijke activiteit te verminderen. De achterliggende gedachte is dat menselijke activiteit de aarde uitput, zowel waar het gaat om natuurlijke hulpbronnen als om de leefbaarheid van de leefomgeving. Hoewel er nationaal en internationaal veel aandacht voor dit thema is, blijkt kennis en informatie over de effectiviteit van beleid beperkt en is het bovendien niet zo duidelijk in hoeverre welk overheidsbeleid nodig is of bij machte is om markten op dit gebied bij te sturen. Het CPB onderzoekt in de onderzoekslijn circulaire economie de economische aspecten van een circulaire economie en het beleid op dat terrein. Daarbij kijken we naar de effecten van de circulaire economie op de brede welvaart. Dit begrip omvat in principe alle zaken die mensen belangrijk vinden, ook als daarvoor geen markten of marktprijzen bestaan (zoals voor natuur, veiligheid, landschap en milieu).

Deze studie naar de circulariteit van de kunststofketen is een onderdeel van de CPB-onderzoekslijn circulaire economie. In deze studie kijken we naar een hele keten. Andere studies binnen de onderzoekslijn zijn meer conceptueel van aard en kijken naar aspecten die van toepassing zijn voor meerdere ketens of kijken empirisch naar specifieke aspecten binnen één keten of onderdelen van ketens. De kunststofketen vormt één van de prioriteiten uit het Rijksbrede Programma *Nederland Circulair in 2050* (Ministeries IenM en EZ, 2016).

Redenen om de kunststofketen meer circulair te maken omvatten het beslag op schaarse grondstoffen, milieuvervuiling bij grondstofwinning en de productie van kunststof en tot slot milieuvervuiling door kunststofafval (plasticsoep, zwerfvuil, milieuvervuiling bij stortten en verbranden). In dit onderzoek brengen we op hoofdlijnen de kunststofketen in kaart, maken we genoemde problemen inzichtelijk en geven we aanzetten voor beleidsopties. De belangrijkste conclusies zijn:

1. Het productievolume van kunststof is de afgelopen vijftig jaar belangrijk sterker toegenomen dan het wereldwijde bbp. Dat zal naar verwachting de komende decennia ook het geval zijn.
2. De uitputting van fossiele grondstoffen voor kunststofproductie (olie of gas) speelt de komende decennia een bescheiden rol, aangezien mondiale verduurzaming van de transport- en energiesector maakt dat de olievoorraad naar verwachting nog voor enkele honderden jaren toereikend is voor de productie van kunststof. Ook de voorzieningszekerheid van olie en gas zal waarschijnlijk in de komende decennia geen overwegend argument zijn bij de productie van kunststof.

3. Het gebruik van kunststoffen gaat gepaard met externe schades met name als gevolg van vervuiling van de leefomgeving, de 'plasticsoep' en de uitstoot van CO₂. De (illegale) stort en de uitstoot van fijnstof, NO_x en SO_x zijn (in West-Europa) effectief aan banden gelegd door regelgeving.
4. Bioplastic en recycling van kunststof vormen maar beperkt alternatieven voor de fossiele productie van kunststof.
 - Biobased plastic, kunststof gemaakt van biomassa, biedt naar verwachting geen oplossing voor de problemen met zwerfafval en de plasticsoep.
 - Wel is sprake van een beperkte winst bij de reductie van de CO₂-uitstoot, maar er is tegelijkertijd sprake van een geïntensiveerd beslag op natuur- of landbouwgrond.
5. Het *intensiveren* van het scheiden van kunststof afval van huishoudens via bijvoorbeeld 'de plastic heroes' voor recycling is, bij de huidige technologie, vanuit het oogpunt van de maatschappelijke welvaart niet kansrijk. Het merendeel van het gerecyclede kunststofafval bestaat uit 'mix' (een samenstelling van allerlei verschillende soorten plastic) en 'folies', waarvoor de toepassingsmogelijkheden beperkt zijn. De marktprijs van 'folies' en 'mix' is laag en soms zelfs negatief. Tegelijk is recycling van kunststof uit gescheiden huishoudelijk afval nu nog erg kostbaar. De kosten van inzameling en verwerking van deze 'mix' zijn daardoor belangrijk hoger dan de marktprijs. De lage prijs komt met name door die beperkte toepassingsmogelijkheden. Daarnaast is de lage prijs van primair plastic (olieprijs en CO₂-prijs) hier debet aan. Een toename in de recycling, bijvoorbeeld door steviger te sturen op de hoeveelheid restafval van huishoudens, zal leiden tot een nog grotere stroom van een product met beperkte afzetmogelijkheden. Dit kan weer leiden tot voorraadvorming, of het alsnog verbranden van het gescheiden afval. De milieuwinst komt daarmee onder druk te staan. Recycling vormt geen oplossing voor zwerfafval en de plasticsoep. Recycling draagt in beperkte mate bij aan de vermindering van de CO₂-uitstoot.
6. De kwaliteit van het gerecyclede kunststof en daarmee de toepassingsmogelijkheden kunnen ook bij de huidige technieken al worden verbeterd door de sortering te verbeteren. Dit maakt de bewerking echter wel duurder. De financiële prikkels sturen op dit moment echter naar een zo hoog mogelijke output in plaats van een zo hoog mogelijke marktwaarde. Het inrichten van het instrumentarium met een grotere focus op kwaliteit zou de milieuwinst van het recyclen van kunststofafval kunnen doen verbeteren. Dit moet nader onderzocht worden.
7. Een bijkomend effect van het sturen op de hoeveelheid restafval van huishoudens (door tarifiering of het lastiger maken om restafval kwijt te raken door omgekeerd inzamelen) is dat hiermee de kans op vervuiling van overige afvalstromen, zoals groente- en tuinafval, toeneemt. Plastic in compost vormt in Nederland een belangrijke bron voor plastic in het oppervlaktewater en daarmee de plasticsoep.
8. Het uitbreiden van het statiegeldsysteem is een vorm van beleid die direct aangrijpt bij de preventie van zwerfafval en daarmee de reductie van de voeding van de plasticsoep vanuit Nederland. Kunststof zwerfafval bestaat voor ruim 90 procent uit verpakkingen. Uitbreiding van het statiegeldsysteem geeft gebruikers een prikkel om afval in te zamelen in plaats van weg te werpen in de leefomgeving. Of de baten ervan opwegen tegen de kosten is niet onderzocht.

9. Ook bij het tegengaan van andere bronnen van de plasticsoep kan overheidsbeleid een bijdrage leveren, bijvoorbeeld op het terrein van regelgeving, wellicht veelal in internationaal verband (zoals het tegengaan van het gebruik van kunststof in cosmetica). Andere aangrijpingspunten zijn het stimuleren van innovatie om technieken te verbeteren die kunststof uit afvalwater filteren (van bijvoorbeeld het wassen van textiel) en het terugdringen van de vervuiling door kunststof in het groente-, fruit- en tuinafval. Of de baten van de maatregelen opwegen tegen de kosten is niet onderzocht.
10. De voorgaande hoofdconclusies volgen uit een analyse die uitgaat van de huidige stand van de techniek. Technologische ontwikkelingen kunnen bijvoorbeeld de kwaliteit van het gerecyclede kunststof verbeteren en de kosten reduceren. De overheid kan bijdragen aan dit proces door het stimuleren van innovatie met subsidies, green deals of fiscale regelingen.¹ Ook kan het beprijzen van de externe effecten soelaas bieden.² Dit kan vernieuwende duurzame initiatieven vanuit de samenleving de financiële ruimte geven om tot wasdom te komen.

Hieronder volgt een toelichting op deze conclusies. De toelichting is verdeeld in een paragraaf met bevindingen en een paragraaf met beleidsimplicaties.

Bevindingen

Wereldwijd gebruik van kunststof neemt sterk toe

Sinds de jaren 60 is het mondiale gebruik van fossiele geproduceerde kunststof vertwintigvoudigd (Ellen MacArthur Foundation, 2016). Het kunststofgebruik is daarmee veel sneller gestegen dan het wereldwijde bbp. Olie en gas leveren de grondstof voor de productie van fossiele kunststof (het zogeheten 'virgin plastic'). Naar verwachting stijgt het gebruik van 'virgin plastic' van 320 Mton nu naar circa 1,1 Gton in 2050. In Nederland vormen verpakkingen een belangrijk deel van het gebruik van kunststof (circa 40 procent). Verder wordt veel kunststof gebruikt in de bouw (circa 20 procent, met name PVC), voor consumentengoederen en in auto's.

Alternatieve manieren om kunststof te produceren betreffen biomassa (biobased) of gerecycled kunststof (recyclaat). Momenteel is het mondiale aandeel van biobased plastic ongeveer 1 procent. In Nederland wordt grofweg 10 procent van de gebruikte kunststoffen gemaakt uit gerecycled kunststof.

Belangrijk deel van de kunststofstroom in Nederland is niet in beeld

Het is onduidelijk hoeveel kunststof er in Nederland wordt gebruikt en geproduceerd. Bij producten die voor een deel uit kunststof bestaan, wordt de hoeveelheid kunststof niet als zodanig geregistreerd, maar ook op andere punten bestaan er belangrijke tekortkomingen in de beschikbare data. Bij het in kaart brengen van kunststofafval en -recycling treden vergelijkbare meetproblemen op. Bovendien sluiten de definities uit verschillende bronnen niet goed op elkaar

¹ Zie Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, D. Hemous, 2012, The environment and directed technical change, AER 102 (1), pp. 131-166.

² In Aalbers, Renes en Romijn (2016) wordt aangegeven dat de CO₂-prijs waarmee de overheid nu zou moeten rekenen om de tweegradendoelstelling te halen boven 60 euro per ton zou moeten liggen voor alle activiteiten in de economie, De CO₂-prijs in het emissiehandelsstelsel (ETS) bedraagt op dit moment circa zes euro per ton en geldt voor een deel van de economie.

aan. Verschillende organisaties meten niet altijd dezelfde grootte en ze kennen elk hun eigen hiërarchie. De meeste data is beschikbaar over gescheiden ingezameld huishoudelijk kunststof. Een volledig beeld van de hoeveelheden geproduceerd kunststof, het afval dat overblijft en wat daarmee gebeurt, is van belang. Een gebrek daaraan maakt het lastig om inzicht te krijgen in de daadwerkelijke omvang van de problematiek rondom kunststof. Bovendien zijn in dat geval de kwantitatieve afval- en recyclingdoelstellingen vanuit het beleid moeilijk te onderbouwen en blijft onduidelijk of deze doelstellingen proportioneel zijn met de huidige en toekomstige externe schadelijke effecten op het gebied van kunststof.

Uitputting van grondstoffen voor fossiele kunststofproductie speelt komende decennia bescheiden rol

Vier tot acht procent van de vraag naar olie en gas wordt gebruikt voor kunststoffen (waarvan ongeveer de helft als grondstof en de andere helft als brandstof). Bij een verduurzaming van de transportsector en de industrie zal de vraag naar olie en gas voor energie en transport dalen. In dat geval is er voldoende olie en gas om nog honderden jaren kunststof te produceren. Daarbij is het ook technisch mogelijk om een groter deel van de olie- en gasvoorraden te gebruiken voor kunststof. De productiekosten nemen dan wel toe, omdat het kraakproces duurder wordt naarmate een groter deel van olie en gas naar kunststof gaat.

Vragen over voorzieningszekerheid betreffen twee aandachtspunten. De eerste gaat om de vraag of grondstoffen voldoende beschikbaar zijn en in hoeverre we afhankelijk zijn van landen waar we misschien liever niet afhankelijk van willen zijn. Het tweede punt betreft het tegengaan van grote prijsschokken die hun weerslag hebben op de reële economie. Beide punten hangen samen. Een goed ontwikkelde wereldmarkt voor een grondstof betekent dat er veel concurrerende aanbieders en vragers zijn die hun onderlinge huidige en toekomstige handelsposities kunnen verzekeren via liquide financiële markten. Dat sluit prijsschokken niet uit, maar maakt ze wel minder waarschijnlijk. Maar als toegang tot de markt voor aanbieders gerespecteerd is, markten dun zijn (weinig transacties), of als het aanbod op andere manieren niet-contestabel is, kunnen de kleinste geruchten tot prijsspieken leiden, en tot marktpanieken waarbij landen hun markten sluiten of hun marktmacht gebruiken.

De productie van olie en gas is verspreid over de wereld. Het afnemen van de vraag naar olie als gevolg van het belasten van CO₂ en het tegelijkertijd opkomen van alternatieven betekent dat de marktmacht van olieproducerende landen zal afnemen. Olie wordt dan steeds meer een grondstof in plaats van een brandstof.

De prijs van kunststof is een stuk minder volatiel dan de olieprijs. Dit suggereert in de eerste plaats dat er meer factoren zijn die de kosten van de productie van kunststof bepalen naast de prijs van de primaire grondstof. Daarnaast is de productie van kunststof verspreid over vele bedrijven over de hele wereld. Dit in tegenstelling tot de olieproductie in de afgelopen decennia. In die zin lijkt er sprake te zijn van een goed ontwikkelde markt voor de sourcing voor kunststof. Het borgen van de voorzieningszekerheid lijkt daarmee nu en in de toekomst geen sterk argument om minder olie en gas te gebruiken voor de productie van kunststoffen.

Aantasting leefomgeving

Een belangrijk extern effect komt door zwerfafval. Dit veroorzaakt schade aan landschap, natuur en milieu. Een groot deel van dit zwerfafval, dat vooral bestaat uit verpakkingen, komt

uiteindelijk terecht in de wereldzeeën. Kunststof breekt af in zogeheten microplastics, die schadelijk zijn voor de gezondheid van mens en dier. De omvang van deze plasticsoep is nog altijd groeiende.

Naast zwerfvuil is afvalwater een belangrijke bron van microplastics. Denk hierbij aan kunststof die vrijkomt bij het wassen van kleding of aan kunststof in cosmetica. Verder bevat regenwater autobandenslijpsel, kunststof als gevolg van verfslijtage, rubbergranulaatkorrels van voetbalvelden en plastic uit compost gemaakt op basis van gft-afval.

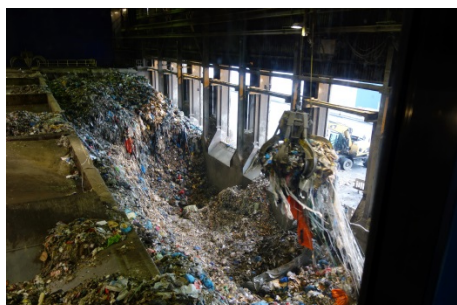
Uit recent onderzoek van de WUR (Speksnijder, 2017) komt naar voren dat ook in de Noordelijke IJszee grote hoeveelheden microplastics aanwezig zijn. Deze microplastics kunnen het smelten van de ijskappen en daarmee de effecten van klimaatverandering versnellen en bevinden zich tevens in een gebied met een relatief grote biodiversiteit. Uit een analyse van zeestromen bleken deze microplastics vooral afkomstig te zijn uit Noordwest-Europa. Zodoende kennen de externe effecten van de plasticsoep een grote internationale component. Een oplossing hiervoor vereist dan ook samenwerking tussen landen.

Uitstoot van CO₂

Van de emissies die gepaard gaan met de productie van kunststof is CO₂ verreweg de belangrijkste component. De uitstoot van stikstofoxiden (NO_x), zwaveloxiden (SO₂) en fijnstof (pm10) gerelateerd aan kunststof is in Europa relatief beperkt als gevolg van bestaande normen. Na CO₂ volgt fijnstof als het belangrijkste externe effect (bij productie in bijvoorbeeld China). CO₂ komt niet alleen vrij bij de winning en productie, maar ook bij het verbranden en recyclen.

Een deel van de CO₂-uitstoot valt onder het Europese emissiehandelssysteem (ETS). Niet alle landen zijn hierbij echter betrokken: de productie van kunststof in bijvoorbeeld China of de Verenigde Staten valt hier niet onder. Ook wordt de CO₂-uitstoot die vrijkomt bij de verbranding van kunststoffen in afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) niet meegenomen in het ETS.

In Nederland bestaat restafval voor ongeveer 14 procent uit kunststof. Bij de verbranding van dit afval in AVI's wordt ook warmte en elektriciteit opgewekt. Als deze warmte en elektriciteit op een andere wijze zou moeten worden opgewekt, dan zou CO₂ zijn uitgestoten. Bij de huidige energiemix bedraagt deze zogenaamde vermeden uitstoot ongeveer een derde deel van de CO₂-uitstoot die vrijkomt bij het verbranden van kunststofafval.



Restafval op weg naar de verbrandingsoven, Afvalverwerking Rijnmond (AVR)

Mogelijkheden van bioplastics bij het oplossen van de kunststofproblematiek beperkt

Bioplastics lijken geen oplossing voor het zwerfafval en de plasticsoep. Dit komt omdat bioplastics maar beperkt biologisch composteerbaar zijn. Op dit moment is slechts een kwart van deze plastics composteerbaar. De wel composteerbare bioplastics hebben daarbij meestal een industriële omgeving met verhitting nodig om te kunnen composteren. Dat is dus niet het geval voor het bioplastic dat eindigt als zwerfafval.

Is er winst in termen van lagere CO₂-uitstoot bij de productie van biobased plastics? Dit hangt sterk af van de soort biomassa die wordt gebruikt en de plaats waar de teelt plaatsvindt. De productie is minder efficiënt dan die uit fossiele grondstoffen. Oliepalm is het meest efficiënte gewas wat betreft landbeslag en CO₂-reductie, maar juist de teelt van palmolie gaat gepaard met ontbossing. Een alternatief is het gebruik van suikers als grondstof voor biobased plastic: dit reduceert de uitstoot van CO₂ en het risico op negatieve effecten voor de natuur is kleiner dan bij het gebruik van plantaardige oliën. Verder moet rekening worden gehouden met de negatieve effecten voor het milieu van het gebruik van water voor de teelt van biomassa en de uitstoot van verzurende stoffen en lachgas (N₂O) door het gebruik van kunstmest.

De externe effecten als gevolg van de productie van biomassa zijn in potentie omvangrijk. Het landgebruik van biomassa dat nodig is voor biobased plastic, is relatief groot. Aangezien grond schaars is, is er daarnaast concurrentie met voedsel op basis van prijsverhoudingen, met natuur (landschap en biodiversiteit) en met de energievraag. Het is onzeker of de toename van de productie per hectare door technologische ontwikkeling en de tweede en derde generatie biomassa - waarbij meer afvalstromen worden ingezet - de toenemende vraag naar biomassa volledig kunnen opvangen.

Beperking toepassingsmogelijkheden gerecycled kunststof gegeven huidige technologie

De huidige techniek is niet in staat om kunststofafval volledig te scheiden in homogene stromen van één type kunststof. Daardoor bestaat op dit moment het grootste deel van het kunststofafval van huishoudens na sortering uit gemengd materiaal met een lage en soms negatieve marktprijs ('mix') en voor een beperkt deel uit meer homogene stromen van één soort kunststof. Een deel van de 'mix' wordt geëxporteerd, maar een beperkt deel wordt ook opgeslagen of alsnog verbrand.

De situatie voor regranulaat, afkomstig uit homogene stromen, is gunstiger. Dit materiaal kent ruimere toepassingen en het heeft een hogere marktwaarde. Toch liggen de prijzen onder die van virgin plastic. Voor een deel komt dit door de lagere kwaliteit als gevolg van beperkingen in de scheidingsmethode. Ook regranulaat uit homogene stromen kent beperkingen in toepassingsmogelijkheden, omdat sommige kunststoffen de geur van het oorspronkelijke product vasthouden en door regelgeving rondom additieven en voedselveiligheid.

Recycelaat zal meer concurrerend zijn bij hogere olie- en gasprijzen en bij hogere CO₂-prijzen. Desondanks zijn beperkingen in de toepassingsmogelijkheden van het gerecyclede kunststof bij de huidige stand van de technologie nog doorslaggevend voor de lage marktprijs.



SUEZ, Rotterdam, sorteren van afval

Technologische ontwikkeling van cruciaal belang

Technologische ontwikkelingen kunnen de kwaliteit van bijvoorbeeld regranulaat verbeteren en de kosten van bijvoorbeeld recyclen reduceren. Het is de vraag in welk tempo de ontwikkeling plaatsvindt en in hoeverre bepaalde obstakels in de praktijk ook met nieuwe technieken goed oplosbaar zijn. Een voorbeeld van een nieuwe techniek is chemische recycling, waarbij de oorspronkelijke grondstof wordt teruggewonnen. In potentie kan dit belangrijke beperkingen in toepassingen wegnemen, maar momenteel gaat dit nog gepaard met hoge kosten en een hoog energieverbruik. Het is voorsnog onduidelijk of er uiteindelijk milieuwinst overblijft bij dit proces.

Ook voor andere vormen van de circulariteit is technologische ontwikkeling van groot belang. Een voorbeeld is ecodesign, waardoor producten beter recyclebaar zijn of levensduurverlengende producten en concepten. Uit eerder CPB-onderzoek (Noailly en Shestalova, 2013) blijkt dat vanuit het oogpunt van de maatschappelijke welvaart de markt onvoldoende investeert in innovatie in duurzame technologieën ten opzichte van innovatie in bestaande technieken.



Werkbezoeken CPB bij Afvalverwerking Rijnmond en bij SUEZ.

Beleidsimplicaties

Deze studie is een inventarisatie van informatie over de kunststofketen vanuit de optiek van de brede welvaart. Er is geen uitgebreide analyse uitgevoerd van mogelijke beleidsopties op dit terrein, de voor- en nadelen van deze opties en de maatschappelijke kosten en baten die daarmee samenhangen. Ook bestaat al veel beleid op dit terrein: op Europees, nationaal en gemeentelijk niveau. Europees beleid stelt bijvoorbeeld doelen voor de hoeveelheid restafval. Nationaal beleid houdt zich onder meer bezig met bijvoorbeeld subsidies en regelgeving, en gemeentelijk beleid

met het systeem voor de inzameling van afval. Verder is er ook beleid met een belangrijke rol voor de industrie, zoals de convenanten die zijn ondergebracht bij het Afvalfonds Verpakkingen. Toch geven de bevindingen uit deze studie op hoofdlijnen wel een zekere richting van mogelijk kansrijke en mogelijk minder kansrijke beleidsopties voor Nederland.

Uit de analyse komt naar voren dat de belangrijkste externe effecten in relatie tot kunststof veroorzaakt worden door zwerfafval, de 'plasticsoep' en de uitstoot van CO₂. Hieronder wordt beknopt uiteengezet welk type beleid daar meer of juist minder bij aangrijpt. Het is geen uitputtende beschrijving en een analyse van de kosten en baten van dergelijk beleid vergt aanvullend onderzoek.

Minder gebruik van kunststof: minder CO₂-uitstoot en minder afval

Minder gebruik van kunststof betekent ook minder zwerfafval, en dus minder plastics in de wereldzeeën en minder CO₂-uitstoot. Idealiter zouden de externe effecten die gepaard gaan met productie, gebruik en afval van een bepaald product in de prijs geïnternaliseerd zijn, bijvoorbeeld door een heffing. De gedachte is dat door de heffing er minder van het vervuilende wordt goed gekocht wat deels leidt tot een lagere consumptie van dat product en deels leidt tot een verschuiving richting andere producten.

Een voorbeeld van een dergelijke heffing is de afvalbeheersbijdrage. De inzameling en recycling van (kunststof)verpakkingen wordt in Nederland gefinancierd vanuit het Afvalfonds Verpakkingen. Dat fonds wordt bekostigd door het verpakkend bedrijfsleven. In 2015 werden door het fonds ca 230 mln euro aan kosten gemaakt, waarvan ca 200 mln euro voor inzameling, sortering en recycling. Ongeveer driekwart daarvan heeft betrekking op kunststof verpakkingen. De kosten voor producenten van verpakte producten nemen hierdoor toe. Producenten hebben daarmee een (beperkte) prikkel om minder verpakkingen te gebruiken dan wel over te gaan op een substituut. De kosten worden (gedeeltelijk) doorberekend in de prijs van producten en uiteindelijk betaalt hiermee de consument. Dezen zullen door de hogere prijs wat minder van de verpakte producten kopen. Op deze manier is het mogelijk (een deel van de) externe effecten van het gebruik van kunststof te internaliseren in de prijs van de producten. In deze analyse is in dit tijdsbestek niet gekeken naar de omvang van de heffing, de kosten, de gedragseffecten en de effecten van de heffing voor de maatschappelijke welvaart.

De externe effecten die gepaard gaan met kunststofproducten zullen variëren met het type kunststof en de toepassing. Daarnaast zijn zeker de gevolgen van het gebruik van kunststof voor de plasticsoep zeer lastig in te schatten. Een heffing zal leiden tot substitutie naar andere materialen, maar ook die hebben weer hun eigen effecten voor maatschappij en milieu. Een verschuiving van kunststof naar andere materialen leidt niet per definitie tot milieuwinst.

Een andere manier om de hoeveelheid kunststof terug te dringen, is regelgeving, waarbij vanzelfsprekend een taak is weggelegd voor de overheid. De industrie kan zelf ook afspraken vastleggen in convenanten of overeenkomsten. Prikkel voor ondernemers om dit te doen zijn gelegen in wetgeving en kostenbesparingen (door heffingen), maar kunnen ook worden gedreven vanuit de consument (duurzaam imago en maatschappelijk verantwoord ondernemen).

Verder kan ook voorlichting aan bedrijven en consumenten bijdragen aan een bewustwording en een afname van de negatieve effecten die gepaard gaan met het gebruik van kunststof.

Beleid in relatie tot zwerfafval en plasticsoep

De plasticsoep is een internationaal probleem dat voor een belangrijk deel ook vraagt om internationaal gecoördineerd beleid. Tegelijk wordt ook vanuit Nederland de plasticsoep gevoed door diverse bronnen en is zwerfafval en kunststof in het water ook deels een nationaal probleem.

Het uitbreiden van het statiegeldsysteem is een vorm van beleid die direct aangrijpt bij de preventie van zwerfafval en daarmee de reductie van de plasticsoep. Het kunststof zwerfafval bestaat voor ruim 90 procent uit verpakkingen; uitbreiding van het statiegeldsysteem geeft gebruikers een prikkel om het afval in te zamelen in plaats van weg te werpen in de leefomgeving³. Ook het verbod op de gratis uitgifte van plastic tasjes is waarschijnlijk effectief in het reduceren van zwerfafval. Andere vormen van beleid om zwerfafval tegen te gaan liggen voor de hand, zoals een uitbreiding van de schoonmaakcapaciteit en handhaving (en sancties) alsook voldoende capaciteit van afvalbakken (om verwaaiing tegen te gaan).



Overvolle prullenbak, Haagsche bos

Zwerfafval is een belangrijke, maar niet de enige bron van de plasticsoep. Ook bij het tegengaan van andere oorzaken van de plasticsoep kan overheidsbeleid een bijdrage leveren. Bijvoorbeeld op het terrein van regelgeving, wellicht veelal in internationaal verband (zoals het tegengaan van het gebruik van kunststof in cosmetica). Een ander aangrijpingspunt is het stimuleren van innovatie om technieken te verbeteren die kunststof uit afvalwater (van bijvoorbeeld het wassen van textiel) filteren. Kunstgraskorrels komen via regenwater in het milieu terecht, waarbij regelgeving een mogelijke beleidsmaatregel is. Het reduceren van de vervuiling door kunststof in het GFT dat via compost in het milieu terechtkomt wordt later in deze paragraaf behandeld.

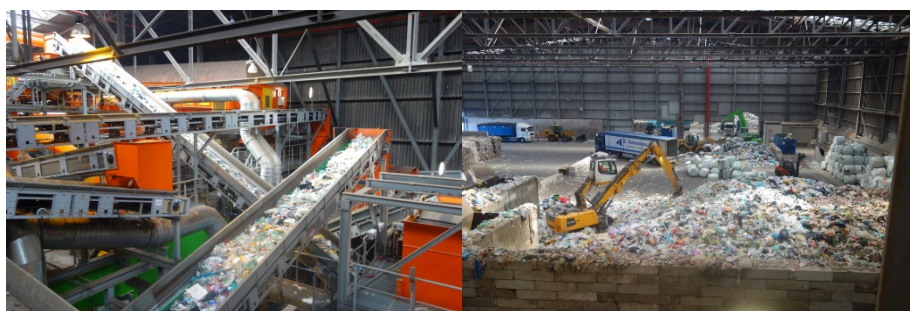
Nederland kan ook een bijdrage leveren door zowel het stimuleren van innovatie om de hoeveelheid plastic in de oceanen te reduceren als door een directe bijdrage aan die schoonmaak. Zo zou wellicht een Nederlands initiatief als 'Ocean clean up' een succesvolle bijdrage kunnen leveren aan de problematiek.

³ CE heeft recent de kosten en effecten onderzocht van diverse varianten van het uitbreiden van het statiegeldsysteem (CE, 2017a).

Vraagtekens bij intensivering van recycling gescheiden kunststofafval

Hiervoor is geconstateerd dat op dit moment het merendeel van het gescheiden huishoudelijk kunststofafval bestaat uit een mix met een lage marktwaarde vanwege grote beperkingen in de toepassingsmogelijkheden. Een grotere inzet met betrekking tot de recycling van kunststof, bijvoorbeeld door steviger te sturen op de hoeveelheid restafval van huishoudens, zal leiden tot een nog grotere stroom van een product met beperkte afzetmogelijkheden. Dit kan weer leiden tot voorraadvorming of het alsnog verbranden van het gescheiden afval. Een deel van 'onze mix' gaat naar Duitsland om er laagwaardige producten van te maken, terwijl Duitsland de eigen mix voor een deel verbrandt met energietेरugwinning (nemokennislink.nl, 2017). De milieuwinst komt daarmee onder druk te staan.

Gerecycled kunststof van homogene stromen kent ruimere toepassingen, maar tevens beperkingen door bijvoorbeeld geur en voedselveiligheid. De beperkingen zullen door technologische ontwikkeling in de scheidingstechnieken waarschijnlijk verminderen en ook regelgeving of afspraken door de industrie voor het gebruik van bepaalde typen kunststof, additieven en kleurstoffen kunnen daarbij helpen. Toch zal dit geen eenvoudige opgave zijn. Dit komt door de vele soorten kunststof en de additieven die nodig zijn vanwege de eigenschappen van producten en de randvoorwaarden rond voedselveiligheid.



SUEZ, Rotterdam, sorteren van afval

Grotere focus op kwaliteit dan op kwantiteit

Volgens het Kennisinstituut Duurzame Verpakkingen (KIDV) en het Afvalfonds zou de kwaliteit van het gerecyclede kunststof en daarmee de toepassingsmogelijkheden en de prijs ook bij de huidige technieken al kunnen worden verbeterd. Het vertragen van het proces van sorteren kan de sortering verbeteren en daarmee een lager aandeel van het laagwaardige 'mix' bewerkstelligen en daarnaast een 'mix' van een hogere kwaliteit opleveren. Dit maakt de bewerking echter wel duurder. De financiële prikkels sturen op dit moment echter naar een zo hoog mogelijke output, met als randvoorwaarde een maximum van 55 procent 'mix', in plaats van een zo hoog mogelijke marktwaarde. Voor inzameling en sorteren wordt een vast tarief betaald vanuit het Afvalfonds. Gemeenten sturen meer op kwantiteit vanwege doelstellingen van het verminderen van de hoeveelheid restafval per inwoner. Het inrichten van het instrumentarium met een grotere focus op kwaliteit zou de milieuwinst van het recyclen van kunststofafval kunnen doen verbeteren. Dit zou een plaats kunnen krijgen in de nieuwe Raamovereenkomst Verpakkingen van komend jaar.

Minder restafval geeft meer risico op vervuiling in GFT als bron van de plasticsoep

Een bijkomend effect van het sturen op de hoeveelheid restafval van huishoudens (door tarifiering of het lastiger maken om restafval kwijt te raken door omgekeerd inzamelen) is dat hiermee de kans op vervuiling van het groente- en tuinafval (GFT) toeneemt. Hoewel cijfers hierover ontbreken, lijkt deze tendens in de praktijk al zichtbaar bij AVI's. Van dat GFT wordt compost gemaakt. Plastic in compost vormt in Nederland een van de bronnen voor plastic in het oppervlaktewater.

Effect van recycling van kunststof voor CO₂-uitstoot

Tussen het scheiden van plastic afval (bijvoorbeeld met de 'plastic heroes' of nascheiding) en een reductie van zwerfafval of de plasticsoep lijkt geen directe relatie te bestaan. Recycling van kunststof is dan ook geen oplossing voor deze problemen. Eerder in deze analyse is geconstateerd dat de beschikbaarheid van grondstoffen voor kunststof weinig aanknopingspunten biedt voor overheidsbeleid op dit terrein. Recycling van kunststof leidt wel tot een lagere uitstoot van CO₂. Voor een indicatie van de omvang bij een specifieke beleidsmaatregel is een grove berekening uitgevoerd van de CO₂-reductie van de hoeveelheid plastic afval die huishoudens op dit moment gescheiden inzamelen. Deze reductie bedraagt ongeveer 175-250 duizend ton CO₂ op jaarbasis. Dit is 0,1 tot 0,15 procent van de totale CO₂-uitstoot in 2015 in Nederland (circa 165 megaton) of bijvoorbeeld minder dan 1 procent van de CO₂-uitstoot in Nederland door wegverkeer. Dit lijkt bescheiden in verhouding tot de omvang van de maatregel.

Hergebruik, reparatie, verlenging levensduur producten en ecodesign

Hergebruik, reparatie, verlenging van de levensduur van producten en ecodesign (producten zodanig ontwerpen dat hergebruik of recycling later eenvoudiger is) zijn mogelijke oplossingen om de vraag naar kunststof en daarmee ook de hoeveelheid kunststofafval te reduceren. Ook het overgaan van bezit naar gebruik van producten door consumenten (bijvoorbeeld in de 'deeleconomie') kan het gebruik van kunststof doen afnemen. Beleid gericht op de primaire problemen (grondstoffen of afval) zou kunnen leiden tot een stimulering van deze businessmodellen als oplossing. In het kader van deze studie is dit niet nader onderzocht. Nadere analyse is vereist.

Biobased plastic: kwaliteitscriteria voor CO₂-reductie en neveneffecten

Biobased plastic kan bijdragen aan een reductie van de CO₂-uitstoot. De CO₂-winst loopt sterk uiteen naar gelang gewas en locatie. De benodigde biomassa is in concurrentie met voedsel, energie en natuur: het landgebruik is potentieel fors en er zijn neveneffecten (zoals stikstof, fosfaat, water). Uit onderzoek van CE Delft komt naar voren dat kwaliteitscriteria behulpzaam kunnen zijn om de milieuwinst door minder CO₂-uitstoot te borgen en ongewenste neveneffecten voor bijvoorbeeld natuur zoveel mogelijk tegen te gaan. Hier ligt een taak voor de (internationale) overheid.

Investeren in beter inzicht in de kunststofstroom

Voor het ontwerp en de evaluatie van beleid is inzicht in de stromen van kunststofproducten en afval in Nederland van belang. Gegeven de geconstateerde hiaten bij deze informatie, kan een investering in het verzamelen en ordenen van data op dit terrein bijdragen aan het meten van de effectiviteit van beleid.

Stimuleren technologische ontwikkeling duurzame technologieën van groot belang

Tot slot is het van belang te constateren dat veel van de in deze studie genoemde beperkingen een momentopname zijn, dat wil zeggen: gegeven de huidige stand van de techniek. De overheid kan een belangrijke bijdrage leveren aan een vermindering van de negatieve milieueffecten die gepaard gaan met het gebruik van kunststof door het stimuleren van innovatie met subsidies, green deals of fiscale regelingen. Dit is nodig omdat er een suboptimale innovatiebias is richting vervuilende technologie. Door de subsidie worden duurzame energietechnologieën sneller rendabel en verdwijnt de innovatiebias (Acemoglu et al., 2012). Dit kan vernieuwende duurzame initiatieven vanuit de samenleving de financiële ruimte geven om tot wasdom te komen.

1 Inleiding

In september 2016 verscheen het Rijksbrede Programma *Nederland Circulair in 2050*. Daarin stelt de overheid zich het doel om te streven naar een grotendeels circulaire economie in Nederland in 2050.⁴ De afgelopen jaren verschenen ook rapporten over de circulaire economie van onder meer TNO (Bastein et al., 2013), PBL (Rood en Hanemaaijer, 2016), CBS (Delahaye en Baldé, 2016), SER (2016), RWS en RIVM (Schut et al., 2015), Rabobank (Stegeman, 2015), Rli (2015), CE Delft (Bijleveld et al., 2016), Afvalfonds Verpakkingen (2016), KIDV (2015), Studiegroep Duurzame Groei (2016) en de Europese Commissie (2015). Kortom: de beleids- en onderzoeks aandacht voor circulaire economie is groot.

Een circulaire economie heeft mogelijk grote gevolgen voor de maatschappelijke welvaart. Een circulaire economie gebruikt immers minder (primaire) grondstoffen dan een lineair systeem. Daardoor is de ecologische voetafdruk kleiner en kan de voorraad beschikbare grondstoffen langer mee. Ook blijft in een lineair systeem meer afval over aan het einde van de levensduur van een product; dit brengt schade voor de leefomgeving met zich mee. Aan de andere kant kan een meer circulaire economie mogelijk ten koste gaan van economische groei (bbp) ten opzichte van een lineaire economie. Al met al is er nog maar weinig bekend over de effectiviteit en efficiëntie van (beleid gericht op) de circulaire economie (Aalbers, 2016a; Werkgroep Duurzaamheid, 2016).

De CPB-onderzoekslijn circulaire economie heeft als doel het opbouwen van een kennisbasis rondom dit beleidsthema. De inzichten die hieruit voortvloeien, kunnen worden gebruikt om beleidskeuzes te onderbouwen en te optimaliseren. Daarbij kiezen we voor een welvaartseconomische invalshoek, waarbij we naar de effecten op de brede welvaart kijken. Het primaire doel is om inzicht te verschaffen in de economische aspecten van een circulaire economie en circulair-economisch beleid. Dit betreft de werking van markten, marktfalen en externe effecten, en de rol van de overheid. De inzichten kunnen worden betrokken bij de voorbereiding van de transitieagenda voor de prioriteit kunststoffen van het programma *Nederland Circulair in 2050*.

De studie naar de circulariteit van de kunststofketen is een onderdeel van de CPB-onderzoekslijn circulaire economie. In deze studie kijken we naar een hele keten⁵. Andere studies binnen de onderzoekslijn zijn meer conceptueel van aard en kijken naar aspecten die van toepassing zijn voor meerdere ketens of kijken empirisch naar specifieke aspecten binnen een keten of onderdelen van ketens. De kunststofketen vormt een van de prioriteiten uit het Rijksbrede Programma *Nederland Circulair in 2050* (Ministeries IenM en EZ, 2016).

⁴ Een circulaire economie is een economisch systeem met een laag grondstoffenverbruik en lage afvalproductie door hergebruik van grondstoffen. Daarmee vormt een circulaire economie de tegenpool van een lineaire economie, waarin producten gemaakt, gebruikt, weggegooid en opnieuw gemaakt worden (zie ook SER, 2016).

⁵ Een groot aantal betrokkenen heeft met hun commentaar een constructieve bijdrage geleverd aan deze studie. Het gaat naast de ministeries van Economische Zaken, Financiën, en Infrastructuur en Milieu onder meer om Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Rijkswaterstaat (RWS), Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV), Afvalfonds Verpakkingen en Vereniging Afvalbedrijven. In het bijzonder bedanken we Afvalverwerking Rijnmond (AVR) en SUEZ voor de gastvrijheid tijdens onze werkbezoeken.

Voorliggende studie geeft een welvaartseconomisch overzicht van de circulariteit van de kunststofketen. De studie gaat in op de belangrijkste stromen van primaire productie, hergebruik, recycling, en afval van kunststoffen en benoemt de belangrijkste mechanismen die vraag en aanbod van kunststoffen beheersen, en geeft aan waar de belangrijkste schades optreden. Dit alles doen we op basis van een brede inventarisatie van bestaande data in combinatie met een beknopt literatuuroverzicht.

Als redenen om de kunststofketen meer circulair te maken, worden genoemd het beslag op schaarse grondstoffen, milieuvervuiling bij grondstofwinning en de productie van kunststof, en tot slot milieuvervuiling door kunststofafval (plasticsoep, zwerfvuil, milieuvervuiling bij storten en verbranden). Dit onderzoek probeert op hoofdlijnen de kunststofketen in kaart te brengen, de genoemde problemen inzichtelijk te maken en geeft aanzetten voor beleidsopties. In het verlengde hiervan vormt het identificeren van ontbrekende data en kennis eveneens een belangrijk onderdeel van deze studie. Tot slot hopen we via een analyse van de kunststofketen te leren over de bepalende mechanismen voor andere materiaalketens.

De rest van dit achtergronddocument leest als volgt. Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de markt voor kunststoffen en de primaire productie daarvan. Hoofdstuk 3 beschrijft het eind van de kunststofketen: afval en recycling. Hoofdstuk 4 biedt inzicht in de relevante externe effecten die optreden in de kunststofketen.

2 Kunststofproductie

In dit hoofdstuk beschrijven we de toepassingen en grondstoffen van primaire kunststofproductie. Kunststoffen kunnen op twee manieren primair worden geproduceerd: op basis van fossiele grondstoffen (olie en gas) en met hernieuwbare grondstoffen (biomassa). Kunststof uit de eerste categorie noemen we virgin plastic; kunststof uit de tweede categorie is *bioplastic* of *biobased plastic*. Daarnaast kan kunststof worden geproduceerd via secundaire grondstoffen (recycling); dit komt in het hoofdstuk 3 aan bod.

Het aandeel biobased plastics is op dit moment circa één procent.⁶ Voor het aandeel gerecycled kunststof lopen de schattingen uiteen, maar naar verwachting is dit aandeel minder dan tien procent van de totale kunststofproductie (Ellen MacArthur Foundation, 2016). Dat betekent dat circa 90 procent van het kunststof uit fossiele grondstoffen wordt gemaakt.

Paragraaf 2.1 geeft een beknopt overzicht van de verschillende typen kunststof en de toepassingen ervan. Paragraaf 2.2 gaat in op fossiele productie, inclusief een gestileerde weergave van het marktmechanisme dat hierbij een rol speelt. Paragraaf 2.3 gaat in op de benodigde grondstoffen (olie en gas) met daarin onder andere een korte bespiegeling over wat een verduurzaming van de economie betekent voor de markt voor kunststoffen. Paragraaf 2.4 geeft een indruk van de productie van bioplastics en de overwegingen die hierbij van belang zijn.

⁶ Zowel wereldwijd als in Nederland (European Bioplastics, 2017, Van den Oever et al., 2017).

2.1 Typen kunststof en toepassingen

Kunststof bestaat globaal in twee typen: thermoplasten en thermoharders (zie tabel 2.1).⁷ Veel kunststof zit verwerkt in verpakkingsmateriaal, met een aandeel van bijna 40 procent van de Europese markt (Plastics Europe, 2016).⁸ Het meeste verpakkingsmateriaal is gemaakt van PE (polyetheen). De bouw staat op de tweede plaats met ongeveer 20 procent van het totale verbruik van kunststoffen, met name PVC. Andere relatief omvangrijke gebruikers zijn de sector consumentengoederen en de auto-industrie (Biron, 2012; Rabobank, 2016).

Tabel 2.1 Aandeel van verschillende typen kunststoffen in geïndustrialiseerde landen

Type kunststof	Voorbeelden van toepassingen (a)	Marktaandeel (%) (b)
Thermoplasten		81
wv. Polyetheen (PE)	Verpakkingen, tasje, speelgoed, melkflessen	27 - 33
Polypropreen (PP)	Auto-onderdelen, verpakkingen, textiel	18 - 19
Polyvinylchloride (PVC)	Vloeren, raamkozijnen, buizen	11 - 12
Polyethyleentereftalaat (PET)	Flessen, potten, textiel (Polyester)	7 - 9
Polystyreen (PS)	Brilmonturen, wegwerpbekertjes, voedselverpakkingen	6 - 8
Polyamide (PA)	Textiel (Nylon, Kevlar), elektronica	1
Thermoplastisch elastomeer (TPE)	Rubber, siliconen, elastiek	1
Andere thermoplasten		3 - 4
Thermoharders		14
wv. Polyurethaan (PUR)	Isolatie, matrassen, coatings	5 - 7
Aminoharsen (UF, MF (c))	Textiel, isolatie, laminaat	2 - 5
Onverzadigd Polyesterhars	Glasvezelversterkt polyester (zeil), koordlaag voor autobanden	2 - 3
Fenolharsen	Coatings, biljartballen	1
Andere thermoharders		1
Andere kunststoffen (met name composieten)		6
(a) Plastics Europe (2016; 2017a), Singh et al. (2016).		
(b) Bron: Tabel 2.3 in Biron (2012). Cijfers betreffen hoogstwaarschijnlijk 2010.		
(c) UF staat voor Ureumformaldehyde en MF staat voor Melaminehars of Melamineformaldehyde.		

2.2 Fossiele productie

2.2.1 Volumes van fossiele kunststoffen

Sinds 1964 is de wereldwijde fossiele productie van kunststof in volume vertwintigvoudigd (Ellen MacArthur Foundation, 2016; Plastics Europe, 2016), zie figuur 2.1. De kunststofproductie is daarmee veel sneller gestegen dan het wereldwijde bbp, dat in deze periode met een factor zeven is toegenomen. China is momenteel de grootste fossiele producent van kunststoffen (90 megaton in 2015). In Europa lag de fossiele productie van kunststof in datzelfde jaar op ongeveer 58 megaton (Plastics Europe, 2016).

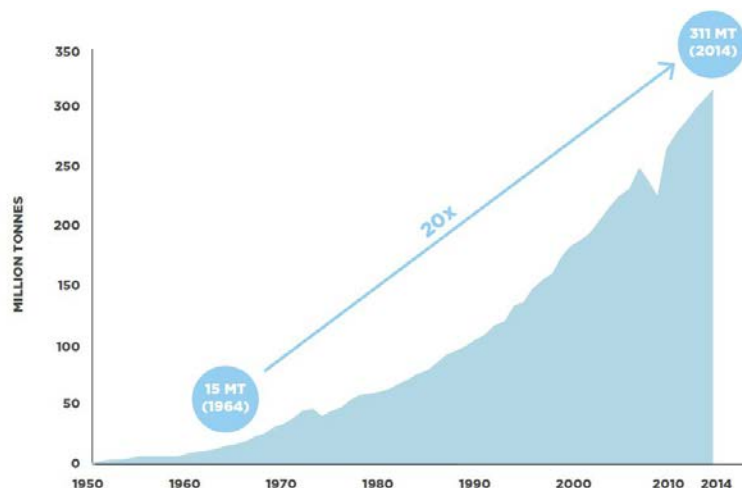
Voor de toekomstige groei van kunststofproductie bestaan verschillende ramingen. De Ellen MacArthur Foundation (2016) raamt de wereldwijde productie van kunststof op ruim 1100 megaton in 2050, een verviervoudiging ten opzichte van 2014 (in het 'business-as-usual'-

⁷ Thermoplasten smelten als ze warm worden en zijn daarmee recyclebaar. Thermoharders daarentegen zijn nauwelijks meer te vervormen na initiële productie.

⁸ Rabobank (2016) gaat uit van 20 procent bij de verpakkingsindustrie. Het is niet helder of dit voor Nederland, voor Europa of voor de wereld zou gelden.

scenario). In dit scenario is de groei ongeveer 3,5 procent per jaar. Biron (2012) noemt een groei van 5,5 procent per jaar, tot 400 megaton in 2020. Deze groei doet zich vooral voor in China en Azië (8,5 procent per jaar); in Noord-Amerika en Europa is de groei naar verwachting 3 procent per jaar. Plastics Europe (2016) gaat uit van een groei van 1,5 procent per jaar in Europa. Het is onbekend hoe groot de groei in Nederland zal zijn.

Figuur 2.1 Wereldwijde productie van fossiele primaire kunststof in megaton



Bron: Ellen MacArthur Foundation (2016).

Het blijkt lastig om vast te stellen hoeveel kunststof in Nederland wordt verbruikt (zie bijlage A). Het gebruik betreft niet alleen de Nederlandse productie, maar ook het saldo van import en export van kunststof. Bestudering van de beschikbare statistiek van het CBS brengt twee aan elkaar gerelateerde meetproblemen aan het licht.

Ten eerste wordt niet alle import en export van kunststof als zodanig geregistreerd in de internationale handelsstatistieken. Dit betreft kunststof die is verwerkt in andere producten, zoals de banden of het dashboard van een auto. Daarbij lijkt de vraag naar producten die volledig uit kunststof zijn gemaakt, relatief beperkt ten opzichte van de vraag naar producten waarin kunststof is verwerkt. De totale vraag naar kunststoffen bevat daarmee een relatief grote onbekende component. Een mogelijke oplossing hiervoor is om per productgroep te schatten hoe groot het gehalte aan kunststof is (bijvoorbeeld in percentages van het gewicht) en op basis daarvan een raming te maken van het totaalvolume van kunststof in producten die niet volledig uit kunststof bestaan. Ook deze informatie is echter niet zonder meer voorhanden. Dit vraagt daarmee een afzonderlijk toegespitst onderzoek, hetgeen buiten de scope valt van deze verkennende studie.

Ten tweede is voor een relatie met de hoeveelheden kunststofafval (zie hoofdstuk 3) niet alleen de jaarlijkse *flow* van kunststof van belang, maar de *stock*. Op elk moment is immers een voorraad geheel of gedeeltelijk uit kunststof bestaande producten in gebruik. De productie van kunststoffen zijn toevoegingen aan die voorraad. Als dergelijke producten worden afgedankt, ontstaat afval. Voor een begrip van de hoeveelheid kunststofafval is dus de voorraad in gebruik zijnde kunststof een belangrijker determinant dan de jaarlijkse toevoeging aan die voorraad. Onlangs is een eerste studie gedaan die de hoeveelheid plastic op de wereld in kaart brengt. Geyer et al. (2017)

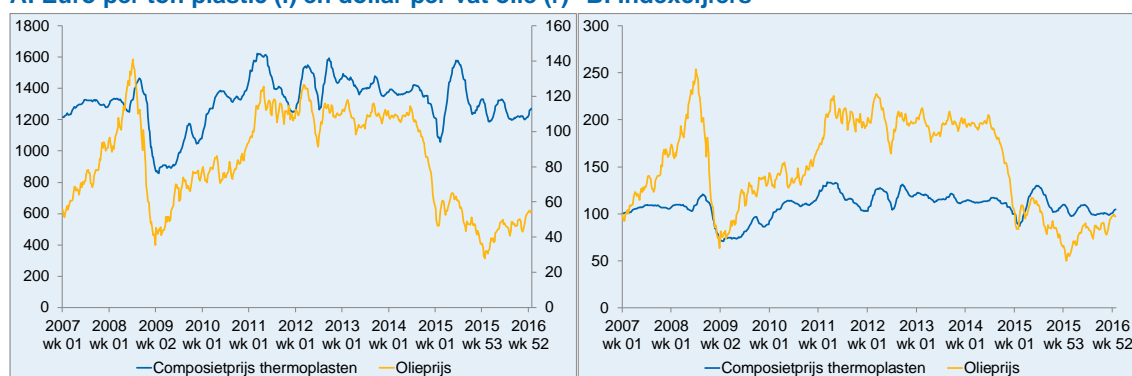
schatten dat op dit moment 2,5 miljard ton plastic in gebruik is, wat neerkomt op 30 procent van al het plastic dat sinds de jaren 50 is geproduceerd.

2.2.2 Prijzen van fossiele kunststoffen

De kunststofprijs (de marktprijs van thermoplasten) vertoont samenhang met de olieprijs⁹, maar is minder volatiel (figuur 2.2).¹⁰ De prijsontwikkelingen suggereren dat de oliemarkt van invloed is op de kunststofmarkt, maar niet allesbepalend is. Dit kan komen doordat kunststoffen ook via andere wegen geproduceerd kunnen worden dan met olie: via aardgas, biomassa of recycling. Verder maakt olie als grondstof maar een deel uit van de kosten om kunststof te produceren.

Figuur 2.2 Composietprijs van primair geproduceerde thermoplasten afgezet tegen de olieprijs

A: Euro per ton plastic (l) en dollar per vat olie (r) B: Indexcijfers



Bron: Berekening CPB op basis van data EIA (olieprijs Brent FOB) en VraagEnAanbod.nl (kunststoffen, http://www.vraagenaanbod.nl/marktprijzen/id15349-Kunststofprijzen_week.html). De composietprijs is afgeleid van de prijzen van HDPE (16%), LDPE (10%), LLDPE (10%), PP (21,5%), PVC (13,5%), PS (9%), ABS (5%), PA6 (1,5%), PET (9,5%), PC, PBT, POM en PMMA (allemaal 1%), de gewichten zijn gebaseerd op gebruik volgens Biron (2012).

2.2.3 Marktmechanismen

De prijsontwikkeling van fossiel geproduceerde kunststoffen is de resultante van vraag en aanbod. Hieronder schetsen we kort een gestileerd beeld van de determinanten van vraag en aanbod en wat dit betekent voor de ontwikkeling van de productie van kunststoffen en de prijs ervan. De analyse blijft conceptueel, maar het is in principe mogelijk om op basis hiervan een empirisch gekalibreerd beeld te krijgen van de belangrijkste krachten die de wereldwijde markten voor kunststoffen beïnvloeden. Dat valt buiten de scope van deze studie.

De vraag

De ontwikkeling van de vraag naar kunststoffen kan bij wijze van eerste benadering worden gekoppeld aan de wereldwijde ontwikkeling van het bbp. Kunststoffen kunnen immers gezien worden als een intermediaire input voor het produceren van allerlei finale goederen en diensten.¹¹ Daarbij concurreert kunststof als intermediaire input met alternatieve materialen die als substituut kunnen dienen. Naarmate kunststof goedkoper wordt ten opzichte van deze substituten zal meer kunststof worden gebruikt in plaats van de substituten ervoor. De mate waarin dat gebeurt, wordt bepaald door de zogeheten substitutie-elasticiteit, die aangeeft hoe een

⁹ De correlatiecoëfficiënt bedraagt 0,65.

¹⁰ De prijs van tussenproducten tussen ruwe olie en kunststoffen, namelijk nafta (Asche et al., 2003) en alkenen als etheen en propeen (Masih et al., 2010), blijken ook samen te hangen met de olieprijs.

¹¹ Een verdere verfijning die hierbij al gelijk kan worden aangegrepen is door rekening te houden met materiaal-intensieve goederen en diensten en minder materiaal-intensieve goederen en diensten.

relatieve verandering in de prijsverhouding van twee substituten tot een verandering in de vraagverhouding leidt. Op dezelfde manier is ook de verhouding met de prijs van het bbp¹² van belang voor de vraag naar kunststof. Met andere woorden: er zijn verschillende manieren waarop de prijs van kunststoffen, relatief ten opzichte van andere prijzen, van invloed is op de vraag naar kunststoffen. Deze verschillende manieren komen tot uitdrukking in de prijselasticiteit van de vraag, die aangeeft in welke mate een relatieve stijging van de prijs van kunststof leidt tot een daling van de relatieve vraag naar kunststof. Zo krijgen we dus het beeld dat de vraag naar kunststof wordt beïnvloed door de wereldwijde productie (bbp) en door de relatieve prijs van kunststof ten opzichte van andere intermediaire goederen en ten opzichte van de prijs van het bbp.

Het aanbod

Het aanbod van fossiele kunststoffen wordt op korte termijn vooral bepaald door de geïnstalleerde productiecapaciteit. De productie van kunststoffen is kapitaalintensief en vraagt grote, kostbare installaties. Met dergelijke installaties is de mate waarin het mogelijk is (of economisch verstandig is) om de productie snel op of af te schalen, beperkt. Aangezien sprake is van hoge vaste kosten is het, ook als het tegenzit, verstandig is om te blijven produceren zolang de prijs hoger is dan de variabele kosten (zie Varian, 1992). Als gevolg hiervan kunnen kortetermijnvraagschommelingen zo nauwelijks worden opgevangen door aanpassing van de productie. Dat kan overigens wel via de voorraadvorming.

Op lange termijn kan capaciteit worden uitgebreid of uit productie worden gehaald, afhankelijk van de verhouding tussen prijzen en kosten. Op lange termijn zijn dus alle kosten variabel. Mogelijke kortetermijnoverwinsten worden op lange termijn teniet gedaan door uitbreiding van capaciteit en/of toetreding van concurrenten. Dit betekent dat op lange termijn de aanbodprijs wordt bepaald door de (marginale) kosten. In de mate dat ook op lange termijn sprake is van marktconcentratie, bijvoorbeeld door toetredingsbelemmeringen, (*market contestability*) kan sprake zijn van een zogeheten mark-up op de marginale kosten (zie Tirole, 1988).

Vanwege de discrepantie tussen de korte- en langetermijnaanpassingsmogelijkheden, kan het proces van capaciteitsuitbreiding voor de productie van kunststoffen worden gekenmerkt als een voorraadaanpassingsproces (zie bijvoorbeeld Romijn, 2000). Dergelijke processen worden gekenmerkt door een geleidelijke aanpassing van de voorraad of capaciteit aan veranderende marktomstandigheden vanwege de inherente onmogelijkheid of extreme kostbaarheid om die aanpassing onmiddellijk te bewerkstelligen. De snelheid waarmee de productiecapaciteit kan worden aangepast, wordt daarbij bepaald door de snelheid waarmee nieuwe capaciteit tegen redelijke kosten kan worden bijgebouwd (of de snelheid waarmee bestaande capaciteit kan worden afgebouwd). Daarbij vormen de grote installaties die nodig zijn om de capaciteit uit te breiden onomkeerbare investeringen die een aanvullende belemmering vormen om capaciteit snel uit te breiden of af te bouwen (zie Dixit en Pindyck, 1994).

Volumes, prijzen en dynamiek

De confrontatie van vraag en kortetermijnaanbod geeft de kortetermijnevenwichtsprijzen. Een confrontatie van deze prijzen met de kosten leidt tot besluiten om de capaciteit uit te breiden of in

¹² De prijs van het BBP is beter bekend als de BBP-deflator. Zie CBS voor een definitie.

te krimpen. Capaciteitsmutaties zorgen er uiteindelijk voor dat op lange termijn de evenwichtsprijs tendeert naar de marginale kosten van productie (gecorrigeerd voor marktconcentratie) en de volumes convergeren naar de vraag die past bij de marginale kosten.

Ontwikkelingen in het wereldwijde bbp, de dematerialisering, de relatieve prijzen, technologische ontwikkelingen, en marktconcentraties betekenen dat het kortetermijnevenwicht en het langetermijnevenwicht continu in beweging zijn, waarbij dus ook het aanpassingsproces steeds opnieuw een nieuwe impuls krijgt. Twee voorbeelden:

1. Een wereldwijde economische crisis zorgt er bijvoorbeeld voor dat er sprake is van vraaguitval op korte termijn. Dit betekent dat prijzen onder druk komen te staan en dat zou op zichzelf tot uitstel van investeringen in nieuwe productiecapaciteit leiden. Tenzij de marginale kosten van productie (olieprijzen) nog sneller dalen. Daardoor kan de rentabiliteit van kunststofproductie mogelijk zelfs toenemen in tijden van crisis.
2. De toename van de productie en het gebruik van kunststoffen die in de afgelopen decennia veel sneller is gegaan dan de groei van het wereldwijde bbp kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van technologische ontwikkeling, waardoor kunststoffen steeds goedkoper kunnen worden geproduceerd en steeds effectiever worden ingezet als intermediaire input in het productieproces. Dat omvat ook de ontwikkeling van nieuwe toepassingen.

Empirische invulling

De analyse blijft conceptueel, maar met het onderliggende model en korte termijn- en langjarige gegevens over volume- en prijsontwikkelingen van kunststoffen, en enkele belangrijke substituten daarvoor, de wereldwijde vraag en de kostenontwikkeling voor de productie van kunststoffen is het in principe mogelijk om een empirisch gekalibreerd beeld te krijgen van de belangrijkste krachten die de wereldwijde markten voor kunststoffen beïnvloeden. Daarbij geldt dat er steeds meer detail aan de analyse kan worden toegevoegd en daarmee ook steeds meer informatie vergt om een steeds gedetailleerder beeld te krijgen. De zeggingskracht van de analyse wordt daarmee niet per definitie groter.

Voor deze studie is veel informatie verzameld. Er is geen poging gedaan om de verzamelde informatie te consolideren tot een empirische invulling van dit conceptuele analysekader. Dat valt buiten de scope van deze studie. Wellicht zijn er marktstudies gemaakt door de kunststofsector die geheel of gedeeltelijk langs de lijnen van de bovenstaande conceptuele analyse zijn opgezet. Deze studies kennen wij echter niet.

Een gestileerd model

De overwegingen in deze paragraaf kunnen worden samengevat in een gestileerd model. Dat model kan empirisch gekalibreerd worden om belangrijkste mechanismen bloot te leggen. Ook kan zo worden nagegaan in hoeverre het model verrijkt moet worden om de gewenste accuratesse te verkrijgen.

De vraag naar kunststoffen (k_d) kan worden gemodelleerd als een functie van het bbp(y), een maatstaf voor de materiaalintensiteit van de productie (λ ; deze parameter ondervangt de trends van verdienstelijking en dematerialisatie), de relatieve prijs van kunststoffen (p_k) ten opzichte van andere intermediaire inputs (p_z) en de relatieve prijs ten opzichte van de prijs van het bbp (p_y):

$$k_d = D\left(y, \frac{p_k}{p_z}, \frac{p_k}{p_y}; \lambda\right) = \lambda y \left(\frac{p_k}{p_z}\right)^{-\zeta} \left(\frac{p_k}{p_y}\right)^{-\gamma} = \lambda y p_z^{\zeta} p_y^{\gamma} p_k^{-\zeta-\gamma} = \lambda y p_z^{\zeta} p_y^{\gamma} p_k^{-\eta}$$

Hierin is voor het gemak een iso-elastische vorm gekozen voor de vraagfunctie met η de prijselasticiteit van de vraag naar kunststoffen.

Het aanbod (k_s) is op elk moment gegeven door $k_s = K$, de productie die mogelijk is met de geïnstalleerde capaciteit. Het invullen hiervan in de vraagfunctie levert de korte termijn evenwichtsprijs op.^a Op lange termijn is de aanbodprijs gegeven als $p_k = (1+\mu)c$ met c de marginale kosten van productie^b en μ een opslag op de marginale kosten die marktconcentratie weergeeft.^c Het invullen hiervan in de vraagfunctie geeft het langetermijnaanbod.

Voor het aanpassingsproces kan bijvoorbeeld gerekend worden met:

$$1 + \dot{K} = \beta \left(\frac{p_k}{(1+\mu)c}\right)^{\rho}, \quad \dot{K} = \frac{dK}{K} \quad (\text{groeiwoet van } K)$$

Met andere woorden, zolang de prijs van kunststoffen hoger is dan de marginale kosten (gecorrigeerd voor marktconcentratie) is sprake van een positieve groeiwoet van de productiecapaciteit.^d De toename van de productie leidt tot een daling van de prijs, waardoor het expansietempo van de capaciteit wordt beperkt en uiteindelijk een nieuw langetermijnevenwicht wordt bereikt.^e

^a Hierbij is niet gerekend met voorraadmutaties, maar dat zou in principe wel kunnen worden mee gemodelleerd. Voorraadmutaties dempen overigens de kortetermijnprijsreacties op vraagsschommelingen en dempen zo ook het proces van capaciteitsaanpassing. Maar zie voetnoot e.

^b De marginale kosten kunnen verder worden door gemodelleerd. Specifiek zou kunnen worden ingezoomd op de invloed van de prijs van de benodigde grondstoffen (met name olie) en trendmatige technologische verbeteringen. Bij de prijs van olie op de lange termijn spelen ook mechanismes een rol die zien op optimale winningsstrategieën van eindige voorraden, zoals de Hotelling regel (Hotelling, 1931), maar ook Salant (1976) die optimale winningsstrategieën uitbreid met overwegingen over marktconcentratie.

^c Deze opslag is een functie van de prijselasticiteit van de vraag (η). Naarmate de vraag minder elastisch is, is er meer ruimte voor bedrijven met marktmacht om prijzen op te drijven. Salant (1976) geeft bovendien aan dat de mate van marktconcentratie het privaat optimale winningspad beïnvloedt, en dus de ontwikkeling van marginale kosten (c). Zie ook voetnoot b.

^d Een nette afleiding van de capaciteitsontwikkelingsfunctie start met de bepaling van de waarde van bestaande capaciteit door de NCW van de netto cashflow stroom te nemen, waarbij de waarde van de gehanteerde discontovoet en verwachting over de ontwikkeling van afzetprijzen en marginale kosten een centrale rol spelen. Door die waarde te vergelijken met de kosten van het neerzetten van nieuwe capaciteit ontstaat een beslisregel over het al of niet bouwen van nieuwe capaciteit (een soort maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) dus). Onomkeerbaarheid komt tot uitdrukking in een verhoogde discontovoet. De verwachte ontwikkeling van de netto batenstroom is gebaseerd op het huidige verschil tussen verkoopprijs en opportunitykosten: $p_k / [(1+\mu)c]$. Uiteindelijk resulteert een functie van de hier gespecificeerde vorm. De verwachtingen over de toekomstige ontwikkeling van de prijs-kostenverhouding en de discontovoet die gehanteerd zou moeten worden bij het contant maken van de netto batenstroom verloopt via β . Dat omvat dus impliciet ook een eventuele opslag op de discontovoet die de kosten van de onomkeerbaarheid weergeeft.

^e Hierbij speelt ook de verwachtingsvorming een rol. Als we er vanuit kunnen gaan dat marktpartijen een algemene kennis van deze mechanismen hebben en het onderling grosso modo eens zijn dat dit de relevante mechanismen zijn, heeft dit invloed op de verwachtingsvorming. Er is dan sprake van *rational expectations*. Daarbij houden investeerders rekening met het volledige toekomstige prijs- en kostenpad en wordt het toekomstige prijspad mede bepaald door de huidige investeringen. Dit legt een extra laag van complexiteit in de interactie tussen vraag en aanbod. Dit heeft in veel omstandigheden geen invloed op het bereikte langetermijnevenwicht, maar wel op de snelheid waarmee dit wordt bereikt en de prijs- en volumevolatiliteit tijdens het aanpassingsproces. Rationele verwachtingen dempen deze over het algemeen ten opzichte van andere verwachtingsvormingsmechanismen (zoals adaptieve verwachtingsvorming; zie Romijn, 2000, H1; en Donders et al. 2010, H4).

2.3 Fossiele grondstoffen: olie en NGL

Aardolie en in mindere mate aardgas zijn veruit de belangrijkste grondstoffen voor fossiele kunststofproductie. In Europa wordt aardolie gebruikt voor kunststofproductie. Dit gebeurt via het destillaat nafta en het proces dat 'kraken' wordt genoemd. In de Verenigde Staten zijn *natural gas liquids* (NGL) de belangrijkste grondstof voor kunststoffen (EIA, 2017; American Chemistry Council, 2015).

De kunststoftypen PE, PP en PS bestaan (bijna) volledig uit aardolie en aardgas. Voor PVC en PUR is ook natriumchloride (zout) een belangrijke grondstof. Daarnaast worden olie, gas, steenkool en bruinkool gebruikt als brandstof in de productie.

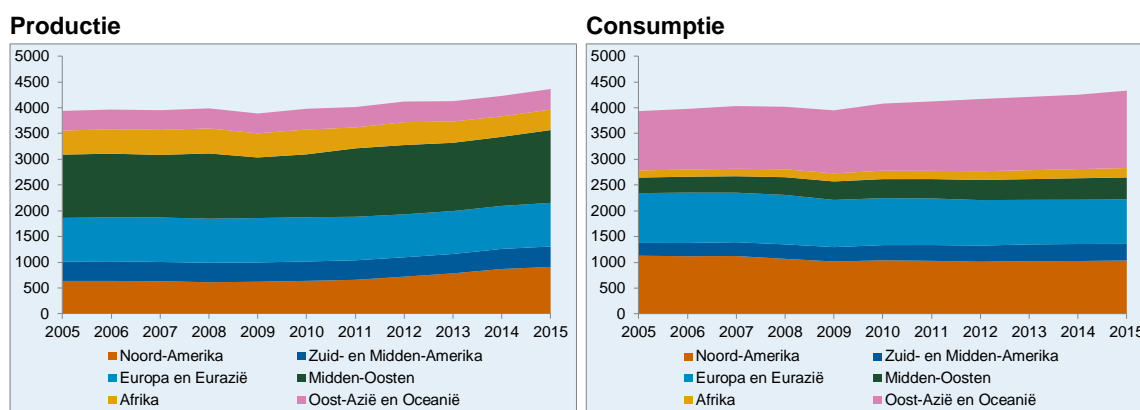
Kunststof kan worden gezien als een 'bijproduct' van de brandstof- en energiefunctie van olie en gas. Ongeveer 4 tot 8 procent van de globale olieproductie wordt gebruikt voor kunststoffen (Plastics Europa, 2016, Ellen MacArthur Foundation, 2016).¹³ Ter vergelijking, voor de transportsector wordt bijna de helft van de olieproductie (45 procent) gebruikt (Plastics Europe, 2017, OPEC, 2016).

2.4 Volumes en voorraden olie en NGL

In 2015 werd wereldwijd 4,3 gigaton ruwe olie en NGL geproduceerd (IEA, 2016a). Het aandeel NGL is 9 procent en groeit gestaag. Van de totale olieproductie kwam circa 32 procent uit het Midden-Oosten en ongeveer 25 procent uit OESO-landen. De grootste producenten waren Saoedi-Arabië en de Verenigde Staten (beide 570 megaton) en Rusland (530 megaton).

Europa plus de landen van de voormalige Sovjetunie consumeren min of meer een vergelijkbare hoeveelheid als die de regio zelf produceert (zie figuur 2.3). Dit is voor Noord-Amerika sinds kort ook het geval door de winning van schalieolie. Ruim 60 procent van de olieproductie van Eurazië in 2015 kwam uit Rusland. Zonder Rusland is Europa een grote netto olie-importeur.

Figuur 2.3 Olie- en NGL-productie (links) en -consumptie (rechts) per regio in megaton



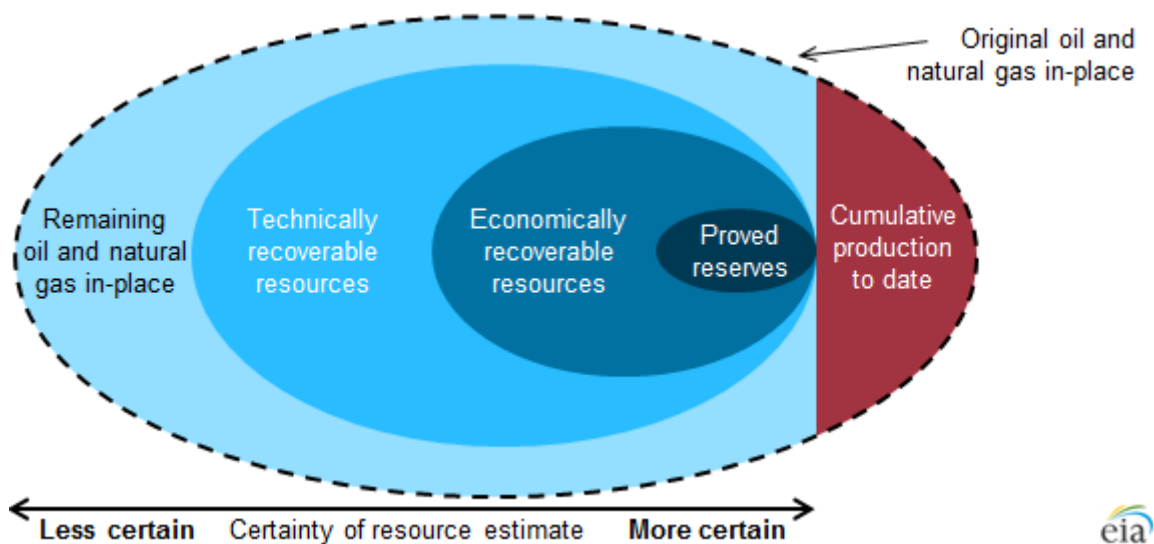
Inclusief ruwe olie, schalieolie, oliezanden en NGL.
Bron: BP (2016a).

¹³ Plastics Europe schat 4 tot 6 procent. De Ellen MacArthur Foundation noemt 4 tot 8 procent, waarvan ongeveer de helft voor proceswarmte en de rest voor het product zelf.

De olie- en gasvoorraden bestaan uit verschillende winningsklassen. Van de bewezen reserves (*'proved reserves'*) is de kans groot is (meer dan 90 procent) dat die met bestaande technieken winbaar zijn. De waarschijnlijke reserves (*'probable reserves'* of *"economically recoverable reserves"*) hebben meer dan 50 procent kans op ontginning. Voor de mogelijke reserves (*'possible reserves'* of *"technically recoverable reserves"*) is de kans op ontginning met de huidige technieken groter dan 10 procent. Ten slotte zijn er misschien nog niet ontdekte oliebronnen. De schattingen van de omvang van deze reserves worden steeds onzekerder naarmate de winningskans kleiner is, zie figuur 2.4.

De reserves kunnen uiteraard veranderen door nieuwe ontdekkingen. Zo waren de wereldwijde bewezen reserves in 2015 ruim 50 procent *groter* dan in 1995 (BP, 2016a). Daarnaast kan technologische vernieuwing ervoor zorgen dat bestaande reserves technisch winbaar worden en kunnen prijsstijgingen ertoe leiden dat moeilijk ontginbare bronnen economisch winbaar worden. De bewezen reserves geven dus geen volledig overzicht van het 'opraken van grondstoffen'.

Figuur 2.4 Schematische weergave olie- en gasvoorraden



Noot: De categorieën zijn niet op schaal getekend. De afbeelding heeft alleen betrekking op olie- en aardgasbronnen.
Bron: IEA (2014).

Tabel 2.2 beschrijft de bewezen en technisch haalbare reserves per regio. De bewezen reserve is in totaal 1700 miljoen vaten (239 gigaton). De reserve/productieverhouding geeft aan hoe lang er nog geproduceerd kan worden gegeven de (bewezen) reserves en de huidige productie, prijzen en technologie. Dat is voor de wereld nog ruim 50 jaar. De technisch haalbare reserves liggen ruim een factor drie hoger dan de bewezen reserves (IEA, 2016b). Op basis van bewezen en technische haalbare reserves kan de olie- en gasvoorraad op basis van de huidige vraag nog bijna tweehonderd jaar mee.

Tabel 2.2 Bewezen en technisch haalbare reserves per regio

Regio:	Bewezen	Bewezen en technisch haalbaar
	Miljoen vaten	Miljoen vaten
Amerika's	563	3109
Midden-Oosten	803	1166
Afrika	130	459
Eurazië	155	1091
Oost-Azië en Oceanië	50	295
Totaal	1701	6120
Reserve/productieverhouding (jaar)	51	186 (a)

(a) Eigen berekening op basis van huidig gebruik van 90 miljoen vaten per dag.
De oliereserves bestaan uit ruwe olie en NGL en onconventionele middelen (extra-heavy oil and bitumen, kerogen oil en tight oil).
Bron: IEA (2016b).

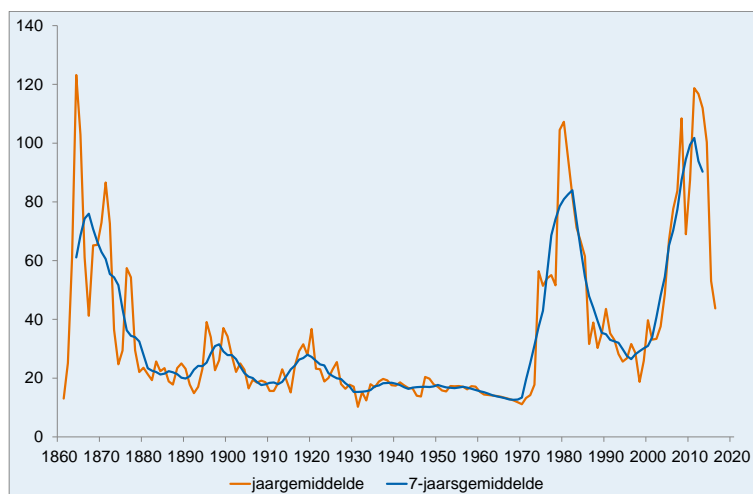
Hoe lang de olievoorraad daadwerkelijk meegaat, is afhankelijk van de ontwikkeling van de productie en consumptie. In paragraaf 2.2.3 hebben we gezien dat een stijging van de vraag op korte termijn niet leidt tot uitbreiding van de productiecapaciteit. Dit heeft, als ook de voorraad zich niet aanpast, een prijsstijging tot gevolg. Die prijsstijging kan de vraag naar kunststof weer doen afnemen, afhankelijk van de substitutie- en prijselasticiteit. Op de lange termijn kunnen hogere prijzen een uitbreiding van de productiecapaciteit tot gevolg hebben, als de hogere prijs de kosten van deze uitbreiding dekt. Ook maken hogere prijzen het economisch rendabel om olie uit moeilijk ontginbare bronnen te winnen.

De verwachting is echter eerder dat de wereldwijde vraag naar olie zal afnemen. IEA (2016b) rekent met drie scenario's waarbij in het hoogste scenario de vraag onverminderd groeit in het tempo van de afgelopen 30 jaar. In het laagste scenario is daarentegen sprake van een vermindering van de vraag als gevolg van technologische verandering en overheidsbeleid om de opwarming van de aarde tegen te gaan. Bollen et al. (2010) simuleren de uitputting van de bewezen olievoorraad in acht beleidsscenario's. Zij concluderen dat een combinatie van energiebeleid, klimaatbeleid en luchtverontreinigingsbeleid leidt tot een significante vertraging in de mondiale vraag naar olie, waardoor de voorraad halverwege de 22^{ste} eeuw nog niet is uitgeput. In scenario's zonder deze combinatie van beleidsingrijpen is de olievoorraad aan het einde van de 21^{ste} eeuw uitgeput.

2.4.1 Prijzen aardolie

Figuur 2.5 toont de olieprijs van de afgelopen anderhalve eeuw (exclusief NGL). De oliecrisis van de jaren zeventig en de stijging van de olieprijs sinds 2000 zijn hierin duidelijk terug te zien. In de afgelopen jaren is de olieprijs weer gedaald: tussen 2014 en 2016 is de olieprijs meer dan gehalveerd. Deze daling wordt veroorzaakt door een combinatie van afnemende vraag, vooral uit China, en overproductie van schalieolie en -gas en door relatief hoge productie door OPEC-landen (Notten et al., 2016; Schoots et al., 2016).

Figuur 2.5 Olieprijs, in dollar per vat, prijzen 2016



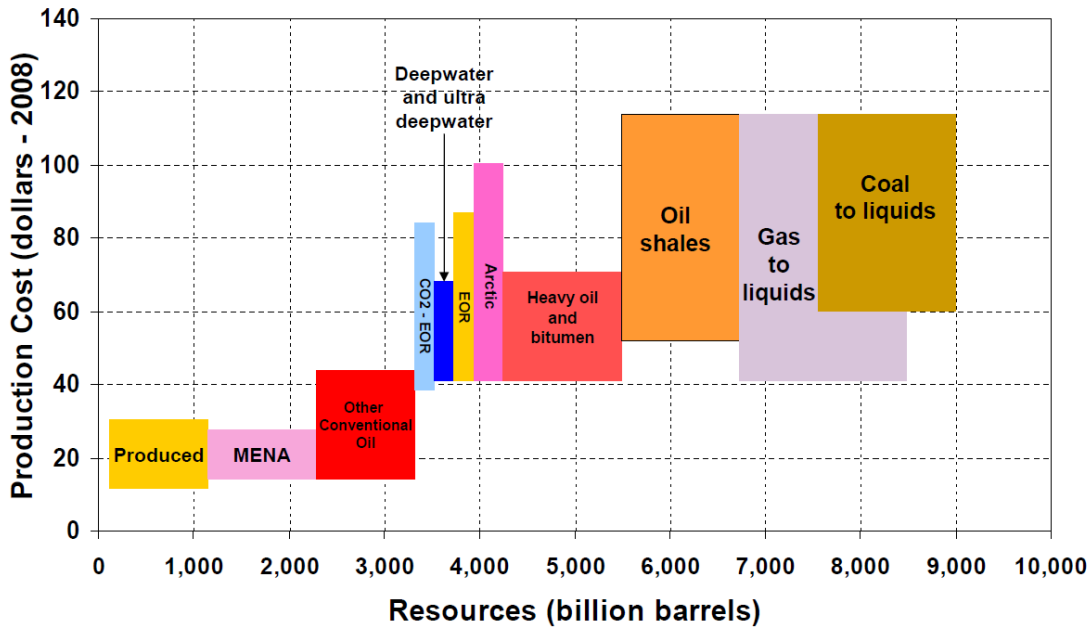
Noot: De voortschrijdende 7-jaarsgemiddelde olieprijs is berekend van jaar t-3 tot en met jaar t+3, voor elk jaar t.
Bron: BP (2016).

Een structureel beeld van de olieprijs is te analyseren met een model van oprakende reserves en technologische vooruitgang die nieuwe bronnen rendabel maakt, zie ook Hotelling (1931) en Neher (1990). Volgens Kilian (2009) bepalen vooral vraagveranderingen de olieprijs, bijvoorbeeld als gevolg van een globale recessie of hoogconjunctuur. Aanbodschokken, zoals beperking van olieproductie, spelen volgens dit artikel slechts een kleinere rol. Toch vallen politieke ontwikkelingen in het Midden-Oosten vaak samen met grote prijsschommelingen en ook in recentere jaren blijkt OPEC nog een significante invloed te hebben op de olieprijs (BP, 2016a; Kaufmann et al., 2004). Waarom stijgt de olieprijs dan rond politieke onrust in olieproducerende landen? Dit komt volgens Kilian door de extra *vraag* naar olie die ontstaat vanwege onzekerheid over de toekomstige oliemarkt ('precautionary demand').

Volgens Baumeister en Kilian (2016) is er een aantal veranderingen waarop de olieprijs reageert. Wereldwijde aanbodschokken door politieke veranderingen in olie-exportlanden, nieuwe olie-ontdekkingen en technologische vooruitgang, conjuncturele veranderingen in de vraag en schokken in de vraag naar bovengrondse olieopslag, als de verwachting verandert over de toekomstige toereikendheid van olieaanbod.

Ten slotte geeft figuur 2.6 een illustratie van de kosten van de productie van olie en andere goed substitueerbare fossiele bronnen. Let wel: dit betreft de kosten van de grondstof voor het maken van kunststof. Als eerste valt op dat de productiekosten in MENA (Middle East and North Africa) lager zijn dan die van alle andere resterende bronnen. Alleen als door voortdurende politieke problemen de olieprijs structureel hoger blijft dan 40 dollar per vat, kunnen de alternatieve bronnen een rol spelen. MENA heeft nog 1,2 biljoen vaten aan reserve. Daarmee kunnen ze de huidige wereldvraag (35 miljard vaten per jaar) nog circa 35 jaar van relatief goedkope olie voorzien. De totale resources bedragen 9 biljoen vaten, hetgeen optelt tot een reserve/productieverhouding van ruim een kwart millennium (257 jaar). Als we 'gas to liquids' en 'coal to liquids' eruit halen resulteert een reserve/productieverhouding van 186 jaar (zoals in tabel 2.2).

Figuur 2.6 Productiekosten olie en andere fossiele bronnen

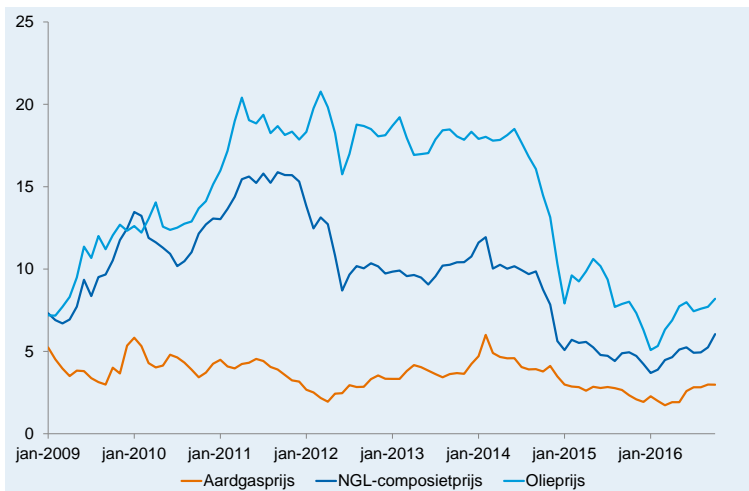


Bron: IEA (2009).

2.4.2 Prijzen NGL

De prijs van NGL houdt het midden tussen die van olie en aardgas (figuur 2.7). In 2009 en 2010 volgde de ‘NGL-composietprijs’ de olieprijs (EIA, 2014). Sinds 2010 is de NGL-prijs gedaald ten opzichte van de olieprijs, en heeft zich meer richting de aardgasprijs bewogen. De logische oorzaak hiervan is de schaliegasrevolutie in de Verenigde Staten die voor een groot aanbod van aardgas zorgde, dat deels uit NGL's bestaat (American Chemistry Council, 2015).

Figuur 2.7 Prijzen van natural gas liquids in dollar per miljoen British thermal unit (mmBtu)



De aardgasprijs betreft de Henry Hub spotprijs (Amerika). De NGL-composietprijs is een index van spotprijzen van ethaan, propaan, butaan, isobutaan en gasbenzine (bron: Bloomberg), gewogen naar volume (Amerika). De olieprijs is de Brent spotprijs (Europa).
Bron: EIA.

Technologische ontwikkelingen en prijsprikkels hebben een sterke invloed op de kunststofmarkt. Omdat NGL's direct concurreren met olie als grondstof voor kunststoffen, zullen ook de olieprijsen indirect hun weerklink hebben op de markt voor NGL's.

2.4.3 Toekomst op de oliemarkt

Wat er in de toekomst gaat gebeuren op de oliemarkt, hangt af van verschillende onzekere factoren. Als sprake is van een redelijk harmonieuze wereldwijde ontwikkeling waarin landen gemakkelijk tot afspraken kunnen komen, kan in het kader van het mondiale klimaatbeleid tot stringente en handhaafbare afspraken worden gekomen over vergaande CO₂-uitstootreducties. Dit heeft een sterk drukkend effect op de vraag naar olie. Bovendien gedijen internationale handelsbetrekkingen in een dergelijke wereld goed, waardoor internationale concurrentie wordt bevorderd. Dit bevordert op zijn beurt een relatief snelle technologische ontwikkeling, waardoor ook alternatieven voor fossiele brandstoffen relatief snel goedkoper worden. Ten slotte past in dit wereldbeeld dat geopolitieke spanningen beperkt zijn. Dus hoewel de economische groei wereldwijd hoog is, neemt de vraag naar fossiele brandstoffen snel af en is de prijsstijging beperkt (huidige prijs is laag, dus toekomstige prijs is ook relatief laag). Dit is het beeld dat in het scenario Hoog van de toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving (WLO; CPB en PBL, 2015) wordt geschetst voor de komende decennia.

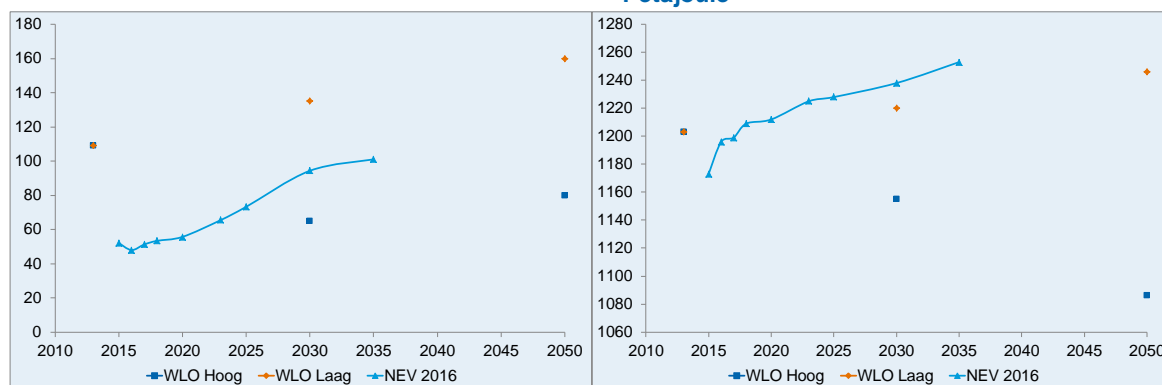
Maar het kan ook anders gaan, zoals bijvoorbeeld wordt geschetst in het WLO-scenario Laag. Er is sprake van grote geopolitieke spanningen die op zichzelf de olieprijsen opdrijven. Het betekent ook dat er geen vergaand klimaatakkoord bereikbaar blijkt, waardoor de wereld er niet in slaagt een betekenisvolle CO₂-uitstootreductie te realiseren. Het aandeel van olie en andere fossiele brandstoffen in de energievoorziening blijft hardnekkig hoog. Bovendien fragmenteert de wereld in handelsblokken waardoor concurrentie wordt ingeperkt en technologische ontwikkeling – ook voor groene technologieën – wordt vertraagd. De vraag naar olie en andere fossiele brandstoffen blijft relatief hoog en het aanbod onzeker. Dit zorgt voor een hoge olieprijs. Olie is zo de dure brandstof voor een arme wereld.

Dit geeft aan dat het aanzicht van de toekomstige oliemarkt inherent onzeker is. De toekomstverkenning WLO (CPB en PBL, 2015) geeft aan welke brede wereldwijde ontwikkelingen daarbij een rol spelen. De WLO geeft ook aan dat de gevolgen voor de prijs van en vraag naar olie sterk uiteen kunnen lopen. Ook de Nationale Energieverkenning 2016 (NEV) (Schoots et al., 2016) levert een projectie over de toekomstige aardoliemarkt. Beide studies zijn in onderstaande figuur samengevat.

Figuur 2.8 Toekomstige oliemarkt volgens WLO en NEV 2016

A: Prijzen vat ruwe Brent olie in dollar per vat

B: Volumes primair energieverbruik met aardolie in Petajoule



Bron: CPB en PBL (2015) en Schoots et al. (2016).

Bespiegeling: transitie naar een CO₂-arme economie

Als de wereld erin slaagt om tot vergaande afspraken te komen over het beperken van de CO₂-uitstoot, zal de vraag naar olie en andere fossiele brandstoffen voor de energieopwekking in de komende decennia drastisch minder worden. Dan gaat de voorraad olie en gas veel langer mee. Dat betekent dat er veel langer kunststof kan worden gemaakt van olie. Het is technisch bovendien mogelijk een groter aandeel van de olieproductie aan te wenden voor de vervaardiging van kunststoffen. Tot nu toe wordt dat niet zo gedaan, omdat de aanwending van die fracties voor brandstof rendabeler is. De vraag is wel in hoeverre het economisch haalbaar zal zijn om alle olie in te zetten voor kunststoffen. Het kraken wordt duurder naarmate een groter deel van de olie naar kunststoffen gaat. Daar staat tegenover dat de prijs van aardolie zelf zou kunnen dalen vanwege vraaguitval uit de transportsector. Dit maakt kunststoffen dan weer goedkoper. Hoe dan ook betekent een CO₂-arme economie dat de grondstof voor primair kunststof veel langer beschikbaar zal zijn dan de inschattingen op basis van huidig fossiel brandstofgebruik.

2.5 Primaire productie via biomassa

Bioplastics of biobased plastics zijn een substituuat voor de productie van kunststof uit olie. Bioplastics worden vervaardigd uit biologisch en hernieuwbare bronnen (biomassa), zoals maïs, rietsuiker, tarwe of aardappelen. Dat de kunststof wordt gemaakt van biologische grondstoffen betekent niet dat het ook biologisch afbreekbaar is (zie het kader 'Bioplastics: biobased versus biologisch afbreekbaar').

Bioplastics: biobased versus biologisch afbreekbaar

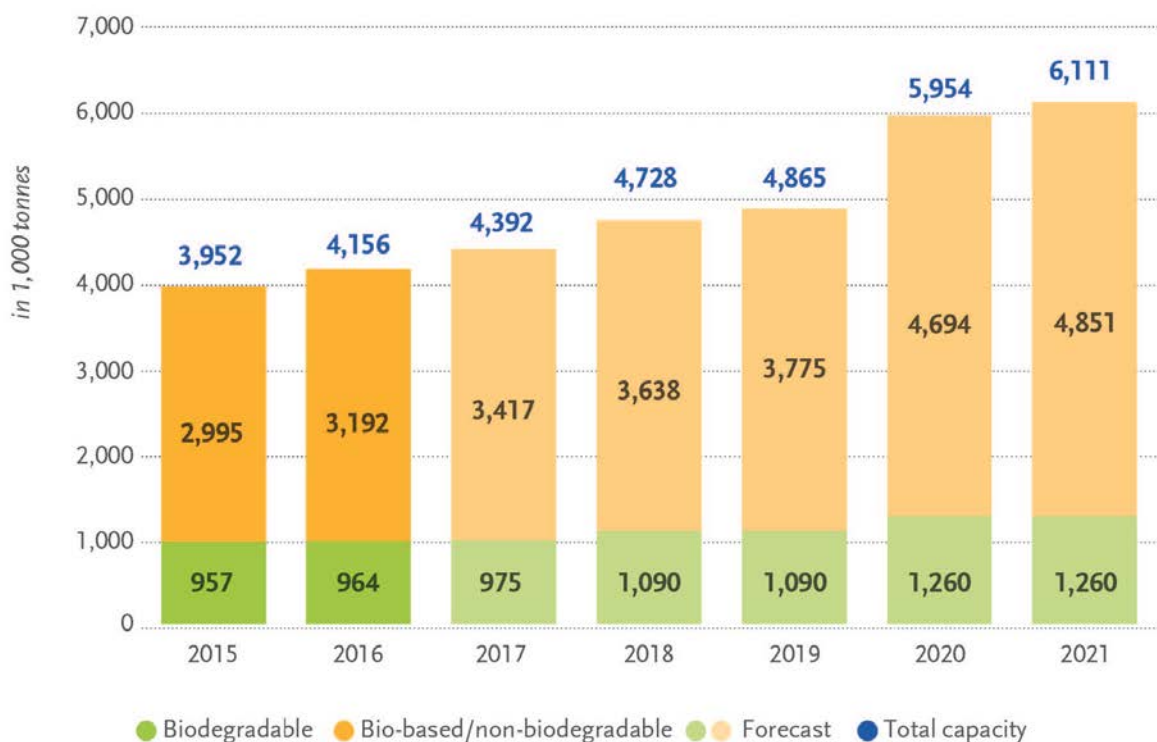
In dit paper onderscheiden we fossiele productie (virgin plastic) en productie via biomassa (biobased plastic). Het woord bioplastic wordt bijvoorbeeld door Plastics Europe (2016) gebruikt voor zowel biobased plastic als biologisch afbreekbare plastic. Het begrip biobased plastic moet echter niet worden verward met biologisch afbreekbaar (of composteerbaar) plastic.

Want niet alle biobased plastics zijn ook biologisch afbreekbaar. Biobased verwijst naar de herkomst van de grondstof (biomassa). Biologisch afbreekbaar daarentegen verwijst naar een eigenschap van het materiaal, niet naar de herkomst. Biologisch afbreekbare kunststoffen kunnen zowel van fossiele grondstoffen als uit biomassa zijn gemaakt. Zo zijn de meeste biologisch afbreekbare verpakkingen een mengsel van biobased plastic en synthetische composteerbare polyesters. De synthetische polyesters worden bijgemengd om het materiaal bijvoorbeeld sterker en waterdicht te maken.

2.5.1 Volumes biobased plastics

Momenteel is de bijdrage van bioplastics aan de productie van kunststoffen beperkt. De wereldwijde productie is circa 4,2 megaton, zie figuur 2.8. Dat is ongeveer 1 tot 2 procent van het totaal (European Bioplastics en Nova Institute, 2016; European Bioplastics, 2017).

Figuur 2.6 Wereldwijde geraamde productiecapaciteit biobased plastics (in kton)



Source: European Bioplastics, nova-Institute (2016).

More information: www.bio-based.eu/markets and www.european-bioplastics.org/market

Bron: European Bioplastics, novo-instituut (2016); www.bio-based-eu/markets en www.european.bioplastics.org/market

Wat opvalt uit bovenstaande figuren is dat slechts een beperkt deel biologisch afbreekbaar is - circa een kwart van de totale productie van bioplastics in 2015. Dit percentage neemt in de

toekomst naar verwachting af omdat de groei van biobased plastic zich voordoet in de niet biologisch afbreekbare bioplastics.

Binnen Europa wordt bijna 40 procent van de bioplastics gebruikt voor verpakkingen. Andere belangrijke toepassingen zijn consumentengoederen en de bouw en de auto-industrie. De toepassing van composteerbaar bioplastic kent beperkingen die inherent zijn aan die composteerbaarheid (bijvoorbeeld in de bouw) (WPI, 2009).

2.5.2 Gebruik van biomassa en benodigd areaal

Voor de productie van biomassa is land nodig. De hoeveelheid landbouwgrond op de wereld is 5 miljard hectare. Het grootste gedeelte daarvan betreft echter extensieve graslanden, die ongeschikt zijn voor de teelt van gewassen voor biobased plastic. In 2014 werd circa 680.000 hectare gebruikt voor bioplastics (European Bioplastics, 2017).

De productie van plastic uit biomassa is relatief inefficiënt, omdat in verhouding veel grondstof nodig is per kilo geproduceerd plastic. Bij kunststof uit fossiele brandstof ligt de gewichtsverhouding rond de één, maar voor de productie van bijvoorbeeld PLA (polylactic acid, een thermoplastische polymeer van melkzuur) is zo'n 1,5 maal de massa aan biomassa nodig in verhouding tot de hoeveelheid geproduceerd plastic (WPI, 2009).

Een Amerikaanse studie (WPI, 2009) analyseert hoeveel biomassa nodig zou zijn om de vraag naar plastic in de Verenigde Staten (52,5 megaton) volledig te vervangen door biobased plastic (PLA). Dit komt neer op een kwart van de wereldwijde maïs- of rijsttoest, de helft van het suikerriet of 5,5 keer de wereldproductie van aardappelen. Deze gedachtenexercities zijn grof, gegeven één soort bioplastic en gegeven de stand van de technologie op dat moment, maar geven wel een indicatie van de orde van grootte van het benodigde areaal bij een grootschalige omschakeling naar biobased plastics.

De ramingen van het potentieel aan biomassa lopen sterk uiteen. Het potentieel in Nederland is relatief beperkt. Het merendeel van de geraamde vraag voor Nederland zal geïmporteerd moeten worden (PBL, 2014).

2.5.3 Prijzen biobased plastic

De prijzen voor plasticgranulaat uit biomassa variëren, afhankelijk van verschillen in kwaliteiten en toepassingen van het bioplasticgranulaat. De prijzen van biobased plastic liggen beduidend ver boven de prijs van virgin plasticgranulaat en van regranulaat (zie hoofdstuk 3). Dat betekent dat van substitutie op basis van relatieve prijzen nog geen sprake is.

2.5.4 Overwegingen bij biobased bioplastic

Biomassa is een hernieuwbare grondstof in de zin dat het op basis van biologische processen kan worden geteeld en geoogst. Dit verschilt van niet-hernieuwbare grondstoffen in de zin dat niet-hernieuwbare grondstoffen worden gewonnen en na eerste winning niet op dezelfde plaats opnieuw in dezelfde economische concentraties gewonnen kunnen worden. De ingewikkelde bewoording geeft aan dat het onderscheid niet altijd helder te maken is. Wat is het verschil tussen

open mijnbouw, waarbij delfstoffen aan de oppervlakte worden ontgonnen, en uitputtende landbouw?

Eigenlijk is er niet zo'n groot verschil. De productie van beide soorten grondstoffen zijn bij de huidige stand van de techniek begrensd. Beide tasten de leefomgeving aan waar het gewonnen/verbouwd wordt. Meer vraag leidt tot hogere prijzen en meer winning/cultivatie. In het geval van mijnbouw is de restrictie de winbaarheid van reserves en in het geval van uitputtende landbouw is dat de vruchtbaarheid van de grond. Prijsontwikkelingen en technologie zorgen er in beide gevallen voor dat er meer productie mogelijk en rendabel wordt, want minder gunstige reserves (of terugwinning) of minder vruchtbare landbouwgronden worden daardoor aantrekkelijk om in productie te nemen.

3 Kunststofafval en recycling

Dit hoofdstuk richt zich op kunststofafval en de recycling daarvan. Paragraaf 3.1 gaat over volumes. Hoeveel afval wordt er geproduceerd en hoe wordt het verwerkt? In paragraaf 3.2 staan kosten en prijzen centraal. Hoeveel kost het inzamelen, scheiden en recyclen van kunststofafval? Kan gerecycled kunststof concurreren met vergelijkbare materialen op basis van aardolie (virgin plastic)? Paragraaf 3.3 tot slot gaat over de toepassingen van gerecycled kunststof: wat is wel en wat is niet mogelijk?

3.1 Afval- en recyclingbalans kunststof

In deze paragraaf wordt met behulp van een afval- en recyclingbalans een analyse gemaakt hoeveel kunststofafval in Nederland wordt geproduceerd of geïmporteerd en wat de verschillende bestemmingen van kunststofafval zijn. Het kunststofafval is afkomstig uit drie bronnen: huishoudens, bedrijven en invoer. Vervolgens zijn er grofweg vier bestemmingen: toepassingen zoals recycling, verbranden (met energierecuperatie) en storten¹⁴ of uitvoer.

Het blijkt lastig om vast te stellen hoeveel kunststofafval er in Nederland overblijft en wat daarmee gebeurt. Eén van de redenen is dat Nederland huishoudelijk restafval importeert (voor energierecuperatie) en dat niet bekend is hoeveel kunststof dit ingevoerde afval bevat. Een ander probleem is dat gegevens uit verschillende bronnen niet altijd goed op elkaar aansluiten. Ze meten niet altijd dezelfde grootte en hebben elk hun eigen hiaten.

We gebruiken drie belangrijke informatiebronnen voor een kunststofafval- en recyclingbalans (zie bijlage B voor een volledig overzicht). De eerste bron betreft gegevens over ingezameld kunststofafval van het Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV). Voor bedrijven gaat het daarbij alleen om verpakkingsafval; voor huishoudens zijn de gegevens over verpakkingen aangevuld met cijfers over niet-verpakkingen. Uit deze gegevens blijkt dat circa 38 procent

¹⁴ Sinds 1996 geldt in Nederland een stortverbod voor afval van kunststof. Wat overblijft, is illegaal storten, bijvoorbeeld als zwerfafval.

huishoudelijk kunststofafval gescheiden wordt ingezameld, 50 procent bij het restafval blijft en 12 procent via milieustraten wordt ingezameld. Deze data gaan alleen over de inzameling van afval, niet over de toepassing, en internationale handel ontbreekt.

De tweede bron is daarom de materiaalmonitor van het CBS. Het voordeel van de CBS-gegevens is dat ook de internationale handel er deel van uitmaakt. Ook bevat deze informatie een grote mate van detail qua bedrijfstakken. In de CBS-data mist dan weer informatie over kunststof in het restafval of grof huishoudelijk afval en de manier van inzameling en scheiding. In de CBS-data valt op dat zowel de in- als uitvoer van afval omvangrijk is. Ook blijkt dat een klein gedeelte van het kunststofafval dat wordt aangeboden aan recyclingbedrijven, alsnog wordt verbrand.

De derde bron, Rijkswaterstaat (RWS) vult een aantal gegevens aan die bij KIDV en CBS ontbreken. De RWS-data bevat behalve gescheiden ingezameld afval en restafval, ook via bewerking verkregen kunststofafval, zoals kunststof uit autowrakken of afgedankte apparaten.

Daarbij geeft RWD ook specifieke informatie over de verschillende sectoren waarvan het afval afkomstig is en de wijze van inzameling.

Conclusies uit beschikbare gegevens

Om een volledig beeld te krijgen van de kunststofketen is inzicht in de hoeveelheden op de markt gebracht kunststof, het afval dat overblijft en wat daarmee gebeurt van groot belang. Een gebrek daaraan maakt het lastig een overzicht te krijgen van de daadwerkelijke omvang van de problematiek rondom kunststof (zie paragraaf 4). Bovendien zijn in dat geval kwantitatieve afval- en recyclingdoelstellingen vanuit beleid moeilijk te onderbouwen en blijft onduidelijk of deze doelstellingen proportioneel zijn met de huidige en toekomstige kunststofproblematiek.

De beschikbare gegevens leveren geen sluitende balans op voor het kunststofafval en de recycling hiervan. Ondanks de combinatie van informatiebronnen, blijft sprake van hiaten en onzekerheden. Hierbij is wellicht het belangrijkste probleem dat organisaties in dit veld vanuit hun eigen optiek cijfers verzamelen. Zodoende ontbreken nog veel gegevens, zoals over de hoeveelheid kunststof in het zwerfafval en restafval van bedrijven.¹⁵ Hoewel de informatie over afval van consumenten vrij gedetailleerd is, geldt dit niet voor sommige bedrijfssectoren, terwijl het bij bedrijven naar verwachting om substantiële hoeveelheden gaat. Verder bevatten de beschikbare cijfers geen informatie over kunststofhoudende stromen zoals matrassen, vloerbedekking en textiel. Ook zijn onderdelen van de cijfers gebaseerd op aannames.

Om een beeld te krijgen van afvalvolumes is het verder van belang om te weten dat in verschillende stappen van de kunststofketen deze volumes verschillend worden gemeten. In de ketenstappen productie en distributie worden volumes doorgaans schoon en droog gemeten. Bij gebruik en afdanking (de afvalfase waar dit hoofdstuk zich op richt) is meestal sprake van

¹⁵ Desondanks is het met het nodige aanvullende zoekwerk wellicht mogelijk een macro-economische inschatting te geven van de problematiek rondom kunststof; deze vraag valt echter buiten het bestek van de huidige studie.

aanhangend vocht en vuil, zoals voedselresten.¹⁶ Om hiervoor te corrigeren hanteert het KIDV een gemiddelde omrekeningsfactor van 0,65 (KIDV, 2017).

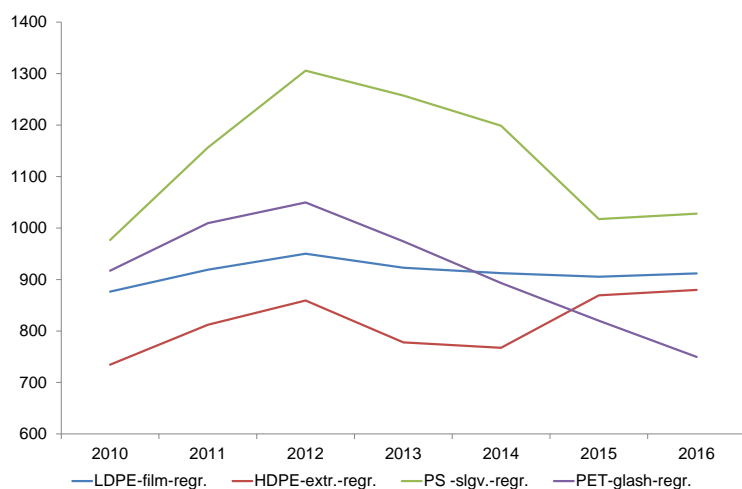
3.2 De markt voor gerecycled kunststof

Het recyclingproces van kunststof begint met het verzamelen en sorteren van kunststofafval tot verschillende homogene stromen. Vervolgens wordt de gesorteerde kunststof gereinigd en tot zogeheten maalgoed verwerkt. Ten slotte wordt dit maalgoed gesmolten en tot korrels verwerkt, ook wel bekend als regranulaat. In deze paragraaf gaan we na welke kosten er tijdens het proces van recycling worden gemaakt en hoe deze kosten zich verhouden tot de marktprijzen waartegen de verschillende typen regranulaat worden verhandeld. We beginnen met dat laatste.

Marktprijzen gerecycled kunststof

Figuur 3.1 geeft een indruk van de marktprijzen van verschillende typen regranulaat uit kunststof. Deze marktprijzen vertonen een verschillend beeld: voor *low* en *high density* polyethyleen (LDPE en HDPE) zijn ze redelijk stabiel tot licht stijgend, terwijl die van polystyreen (PS) en PET vanaf 2012 een flinke daling vertonen. Een vergelijking met de marktprijs van primair kunststof uit aardolie leert dat regranulaat uit kunststof gemiddeld genomen aanzienlijk goedkoper is (zie figuur 2.2). Dit prijsverschil suggereert dat er belangrijke beperkingen zijn met betrekking tot de kwaliteit en toepassingsmogelijkheden van gerecycled kunststof (ten opzichte van virgin plastic).

Figuur 3.1 Marktprijzen kunststofregranulaat in euro/ton



Bron: berekeningen CPB op basis van gegevens van www.vraaganaanbod.nl.

Eurostat publiceert een aantal indicatoren voor de prijs waartegen ingezameld en gesorteerd kunststofafval wordt verhandeld (zonder onderscheid naar type kunststof). De gemiddelde marktprijs van kunststofafval schommelt rond de 300 euro per ton en volgt in grote lijnen de conjunctuur met een bandbreedte van ongeveer 100 euro per ton.¹⁷ Op basis van deze

¹⁶ Bij de gescheiden inzameling van huishoudelijk kunststofafval worden ook drankkartons ingezameld. Drankkartons bestaan voor ongeveer een kwart uit kunststof.

¹⁷ Dit bedrag betreft een *gemiddelde* van verschillende soorten kunststof met uiteenlopende prijzen.

gemiddelde marktprijs en de onderliggende gegevens uit figuur 3.1 kan voor dezelfde vier typen kunststof als hierboven een index worden samengesteld van de gemiddelde marktprijzen van de verschillende (tussen)producten uit kunststofafval voor de periode 2010-2016 (zie tabel 3.1). Ter vergelijking is tevens de gemiddelde marktprijs van virgin plastic weergegeven.

Tabel 3.1 Marktprijzen ten opzichte van de prijs van kunststofafval, 2010-2016

Type kunststof	Kunststofafval (ingezameld en gesorteerd)	Maalgoed	Regranulaat	Virgin plastic
LDPE	100	146	264	387
HDPE	100	138	275	372
PS	100	278	327	418
PET	100	147	264	342

Bron: berekeningen CPB op basis van gegevens van Eurostat en www.vraagenaanbod.nl.

Tabel 3.1 bevestigt dat er aanzienlijke verschillen bestaan tussen de marktprijzen van virgin plastic en die van regranulaat. Regranulaat uit kunststof is namelijk geen perfect substituuut voor virgin plastic. Tijdens de productie wordt in de praktijk dan ook vaak een mix gebruikt van primair en gerecycled kunststof (NRK recycling, 2015). Gemiddeld genomen geldt dat hoe hoger de kwaliteit en hoe meer toepassingsmogelijkheden gerecycled kunststof heeft, hoe hoger de vraag naar gerecycled kunststof en hoe hoger prijs van gerecycled kunststof ten opzichte van de prijs van virgin plastic. Ook hogere olie- en gasprijzen (of de prijs van CO₂-emissierechten) maken het duurder om virgin plastic te produceren en dus aantrekkelijker om gebruik te maken van gerecycled kunststof. Dit is het substitutie-effect dat is beschreven in paragraaf 2.2.3. Opnieuw geldt echter dat beide typen kunststof slechts beperkt substitueerbaar zijn. Paragraaf 3.3 gaat dieper in op de toepassingen en beperkingen van gerecycled kunststof die ten grondslag liggen aan het prijsverschil met virgin plastic.

Recycling kunststofafval rendabel?

Volgens de Raamovereenkomst Verpakkingen 2013-2022 zijn gemeenten verantwoordelijk voor het inzamelen, scheiden, schoonmaken, verwerken en vermarkten van kunststofafval afkomstig uit verpakkingen (verreweg het grootste deel van het gescheiden kunststofafval; zie paragraaf 3.1). In de praktijk besteden ze deze taken uit aan gespecialiseerde bedrijven. Tegenover deze stappen in het recyclingproces staat een integrale vergoeding die wordt gefinancierd uit het Afvalfonds Verpakkingen. Er bestaan alleen een vergoeding voor gescheiden kunststofafval van verpakkingen en niet voor ander kunststof. Tabel 3.2 geeft de vergoeding voor 2016 uitgesplitst naar onderdelen en inclusief vermarkting. In totaal gaat het voor de verwerking van kunststofafval naar verwachting om een bedrag van ongeveer 150 miljoen euro in 2016 (Afvalfonds Verpakkingen, 2017).

Tabel 3.2 Vergoedingen voor verwerking kunststofafval uit verpakkingsmateriaal

Stap in recyclingproces	Vergoeding in euro/ton
Integrale vergoeding	
wv Inzameling	519
wv Overslag en transport	87
wv Sortering	183
Vergoeding vermarkting	65
Totaal	853

Bron: Buijze (2016).

Ondanks dit vergoedingensysteem lijkt recycling niet voor alle typen kunststof kostendekkend. Als uitvoeringsinstantie van de Raamovereenkomst Verpakkingen gebruikt Nedvang een centraal monitoringinstrument waarin gemeenten volumes en opbrengsten van de verschillende typen kunststof rapporteren. Gemiddelde waardes hiervan zijn momenteel nog niet beschikbaar. De algemene indruk is wel dat mix (een mix van verschillende soorten kunststof) en in mindere mate folies (ofwel LDPE) verliesgevend zijn. Het grootste deel van het kunststofafval van gemeenten bestaat uit mix en folies. Hiervoor gelden lage en soms negatieve prijzen¹⁸ (KIDV, 2017). Volgens SUEZ wordt op de verkoop van mix ongeveer een verlies van 100 euro per ton geleden; bij folies gaat het om een kleiner bedrag. In een artikel van Buijze (2016) rekt één gemeente op basis van eigen gegevens uit dat op mix 160 euro per ton moet worden toegelegd en op folies ongeveer de helft van dit bedrag. Daarentegen lijkt de opbrengst van gerecycled PET en HDPE wel positief, maar het aandeel van deze typen kunststof in de totale hoeveelheid gescheiden ingezameld kunststof is relatief bescheiden. Belangrijk om op te merken is dat de bovenstaande informatie een momentopname betreft die door de tijd kan veranderen en dat de gegevens uit verschillende bronnen niet altijd eenduidig zijn.

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat het grootste deel van het gemeentelijk kunststofafval bestemd voor recycling op dit moment wordt gekenmerkt door een lage marktwaarde. De prijs waartegen dit type gerecycled kunststof kan worden verkocht is momenteel veel lager dan de kosten die gepaard gaan met de verschillende stappen in het recyclingproces.¹⁹ De marktprijs van de mix is zo laag vanwege beperkingen met betrekking tot de kwaliteit en toepassingsmogelijkheden van gerecycled kunststof (zie paragraaf 3.3). Daarbij komt dat de productie van gerecycled kunststof op dit moment extra onder druk staat, omdat het alternatief (primair kunststof) relatief goedkoop is door de huidige lage olie- en gasprijzen. In afwachting van gunstigere prijzen en betere recycletechnieken wordt een deel van het laagwaardige kunststofafval daarom nu opgeslagen, hoewel een beperkt deel ook wordt verbrand in verband met de kosten van opslag.

De markt voor gerecycled kunststof in een notendop

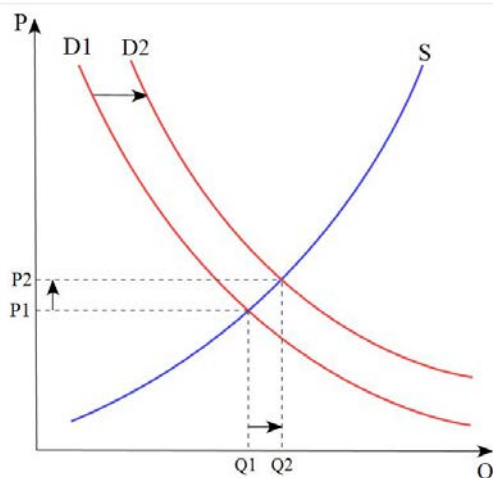
Zoals hierboven aangegeven zijn virgin plastic en gerecycled kunststof imperfecte substituten als gevolg van beperkingen in de kwaliteit en toepassingsmogelijkheden van gerecycled kunststof. De

¹⁸ Dit betreft de prijzen die de recycler aan de sorteerder betaalt voor uitgesorteerde balen kunststof verpakkingsafval.

¹⁹ Zonder vergoedingensysteem zijn de kosten voor alle typen gerecycled kunststof hoger dan de financieel-economische opbrengsten, maar er kunnen belangrijke externe effecten een rol spelen die een dergelijk systeem rechtvaardigen (zie hoofdstuk 4).

prijzen van beide typen kunststof volgen elkaar slechts gedeeltelijk. Figuur 3.2 illustreert dit prijsmechanisme aan de hand van (een verandering in) de vraag naar gerecycled kunststof.

Figuur 3.2 Vraag en aanbod gerecycled kunststof



In de uitgangssituatie wordt de prijs van gerecycled kunststof bepaald door het marktevenwicht tussen vraag en aanbod, ofwel het snijpunt van de initiële vraagcurve D1 en de aanbodcurve S (met op de X-as evenwichtshoeveelheid Q1 en op de Y-as evenwichtsprijs P1). Als de vraag naar gerecycled kunststof stijgt door een verbetering in de relatieve kwaliteit en/of de mogelijkheden voor toepassing, dan verschuift de initiële vraagcurve D1 naar rechts tot de nieuwe vraagcurve D2 met als gevolg een nieuwe en hogere marktprijs P2 (gegeven de aanbodcurve S). Tegelijkertijd neemt in dat geval de vraag naar virgin plastic af, maar waarschijnlijk slechts deels vanwege het feit dat virgin plastic en gerecycled kunststof geen perfecte substituten zijn.

3.3 Toepassingen en beperkingen

In de vorige paragraaf is geconstateerd dat een groot deel van het ingezamelde en gesorteerde kunststofafval van huishoudens bestaat uit laagwaardig materiaal, waarvan de marktprijs niet opweegt tegen de kosten die gepaard gaan met de verschillende stappen in het recyclingproces. Ook de afzet van relatief homogeen gerecycled kunststof dat kostendekkend of zelfs winstgevend is, kent echter beperkingen. Deze paragraaf gaat in op de oorzaken hiervan. Daarnaast is er aandacht voor de relatie tussen technologische ontwikkeling en deze beperkingen.

Afvalscheiding is maar beperkt mogelijk

Huishoudelijk kunststofafval is zeer heterogeen. Bij het sorteren worden de verschillende soorten kunststof zoveel mogelijk gescheiden, maar goed scheiden is kostbaar en in de praktijk niet volledig mogelijk. Naarmate scheidingstechnieken beter en goedkoper worden, wordt deze reststroom kleiner. Op dit moment blijft een vrij grote reststroom over van lage kwaliteit (folies en mix) met een lage en soms negatieve marktprijs. Daar komt bij dat niet al het gescheiden ingezameld kunststofafval te recyclen is.

Kwaliteitsverschillen tussen regranulaat en granulaat

Zelfs bij een gescheiden stroom kunststof van een bepaald type zal recycling vrijwel altijd leiden tot een laagwaardiger product met een beperktere toepassing dan vergelijkbaar virgin plastic. Dit komt tot uitdrukking in een lagere prijs voor het regranulaat. De reden hiervoor is dat aan veel kunststof additieven zijn toegevoegd, zoals kleurstoffen. Een voorbeeld hiervan zijn zogeheten zwarte PET-trays die worden gebruikt in supermarkten. Daarbij wordt recycling ook bemoeilijkt doordat de concentratie en samenstelling hiervan uiteen loopt tussen verschillende toepassingen, fabrikanten en landen van herkomst. Een andere factor die de toepassing van gerecycled kunststof beperkt, zijn de eisen aan verpakkingen ten aanzien van voedselveiligheid. Om die reden bestaan kunststofverpakkingen vaak slechts voor een deel uit gerecycled kunststof en deels uit virgin plastic.

Het gebruik van kleurstoffen is te beperken door regelgeving of afspraken met producenten. In het geval van andere additieven is dat complexer, omdat deze zijn gebruikt om het product bepaalde wenselijke eigenschappen te geven. Een bekend probleem is dat verpakkingen van bijvoorbeeld polypropreen de geur van het product opnemen. Ook na recycling is dus te ruiken wat er oorspronkelijk in verpakt was en dit beperkt de toepassingsmogelijkheden.

Biobased plastic

Bij de huidige technologie kan het mixen van biobased plastic met andere typen kunststoffen bij het recyclingsproces technische problemen geven (WPI, 2009; SUEZ, 2017; NOS, 2017). Volgens CE (2017) en WUR (2017) zijn deze problemen relatief beperkt zolang het aandeel biobased plastic in de afvalstroom niet te hoog is. Bij het composteren en vergisten van groenafval geven bioplastics op dit moment grotere problemen dan bij de recycling van kunststof.

Chemische recycling

Chemische recycling gaat nog een stap verder dan de huidige recycling van kunststoffen: plastics worden afgebroken tot herbruikbare basisstoffen (zoals olie). Deze techniek staat echter nog in de kinderschoenen. Het bedrijf Blue Alp uit Gouda test de afbraak van een mengsel aan plastics (poly-olefinen) via een proces bekend als thermolyse. Dit proces vereist een temperatuur van 400 graden en kost dus veel energie, maar het verwerkt wel precies de grote reststroom die nu na scheiding van het kunststofafval overblijft en in de verbrandingsoven terecht komt.

Volgens een artikel van Aan de Brug (2016) zijn Chinese en Amerikaanse onderzoekers er onlangs in geslaagd om polyethyleen af te breken tot diesel, benzine en was. Dit proces vereist een lagere temperatuur van 170 graden, maar is nog niet op industriële schaal toegepast. Het Eindhovense bedrijf Ioniqa tot slot ontwikkelt technologie om PET met behulp van magnetisme af te breken tot grondstoffen. Ook deze techniek is momenteel nog niet operationeel.

Met chemische recycling kunnen de huidige beperkingen in de toepassingsmogelijkheden van gerecycled kunststof sterk afnemen, omdat wordt teruggegaan tot de basisstoffen. De kosten van deze techniek zullen in de loop der tijd afnemen door leereffecten. Het is wel de vraag of de techniek zover kan worden ontwikkeld dat sprake is van milieuwinst. De benodigde energie is vooralsnog een belangrijke belemmering.

4 Externe effecten

Externe effecten zijn niet gecompenseerde, door derden gemaakte kosten, geleden schade of genoten voordelen als gevolg van een economische activiteit.²⁰ Deze kunnen optreden als personen, bedrijven of overheden geen rekening houden met de effecten van hun handelen op de welvaart van derden. Bij circulaire economie kunnen externe effecten te maken hebben met het uitputten van grondstoffen, en met milieuschades zoals emissies van CO₂ en vervuilende stoffen of aantasting van de leefomgeving. Het bestaan van deze externe effecten legitimeert sturend beleid van de overheid.²¹

Dit hoofdstuk analyseert de externe effecten van grondstoffenwinning voor en productie van kunststoffen. Daarnaast is er aandacht voor afval en recycling van kunststof en het daarbij komende transport. Dit hoofdstuk gaat ook in op vraagstukken die in economische zin wellicht niet tot externe effecten behoren, maar die in de praktijk worden aangevoerd als reden voor extra beleid, zoals voorzieningszekerheid.

Het hoofdstuk is ingedeeld naar de verschillende schakels in de kunststofketen: winning van grondstoffen (paragraaf 4.1), transport en productie (paragraaf 4.2), en afval (paragraaf 4.3). Omdat CO₂-uitstoot in alle delen van de keten plaatsvindt, gaat paragraaf 4.4 hier specifiek op in. Paragraaf 4.5 gaat over de externe effecten van biobased plastic in de gehele keten, terwijl in paragraaf 4.6 kort de externe effecten bij het gebruik van andere alternatieven voor kunststof (materialen) worden aangestipt.

4.1 Winning van grondstoffen

De grondstoffen voor kunststof zijn olie, gas en biomassa. Deze paragraaf gaat in op de externe effecten en overige effecten die vanuit beleidsoogpunt van belang zijn die optreden bij de winning van grondstoffen. We bespreken achtereenvolgens milieuschade, winningstempo en verdeling van de voorraad over generaties, voorzieningszekerheid, arbeidsomstandigheden en landgebruik in concurrentie met voedsel en energie en natuur.

De externe effecten bij de productie van olie en gas komen maar voor een deel voor rekening van de productie van kunststof (zie hoofdstuk 2). Het aandeel van kunststof in de productie uit olie kan toenemen indien mondiaal fossiele brandstoffen worden vervangen door duurzame energiebronnen.

²⁰ Zie ook Varian, H., 1992, Teulings, C.N., Bovenberg en Van Dalen, 2003. en Teulings C.N., Bovenberg en Van Dalen 2005.

²¹ Het bestaan van marktfalen, waaronder externe effecten kunnen worden geschaard, legitimeert overheidsingrijpen. Dat overheidsingrijpen probeert het marktfalen te repareren, maar brengt tegelijk ook nadelen met zich mee: dat wordt overheidsfalen genoemd. De aard en omvang van dat overheidsfalen hangen af van de gekozen beleidsoptie. Uiteindelijk dient er een afweging te komen van de voordelen van het reduceren van de marktfalens en de nadelen van het daarmee geïntroduceerde overheidsfalen.

Milieuschade

De winning van fossiele grondstoffen gaat gepaard met emissies²² en mogelijk ook met verontreiniging van bodem, oppervlaktewater of zee. Denk hierbij ook aan ongelukken met boorplatforms bij de productie of het afzinken. De gevolgen voor Nederland zijn beperkt, omdat de winning van fossiele grondstoffen voornamelijk plaatsvindt in het buitenland (zie hoofdstuk 2). De omvang van de effecten is ook afhankelijk van het soort grondstof (bijvoorbeeld schaliegas versus bronnen van ruwe olie) en verschillen in milieuwetgeving in de landen van herkomst.

Winningstempo en welvaart van toekomstige generaties

De winning van niet-hernieuwbare grondstoffen beïnvloedt de welvaart van huidige en toekomstige generaties. Hotelling (1931) laat zien dat het optimale winningspad van een gegeven voorraad grondstof zo moet zijn dat de ontwikkeling van de schaarstepremie (verschil tussen prijs en marginale kosten) gelijk is aan de discontovoet bij constante winningkosten, volledige zekerheid en het ontbreken van technologische ontwikkeling. Dan is er sprake van een Pareto-optimum waarin de totale welvaart niet kan toenemen door een verschuiving tussen perioden. Een te snelle extractie, bijvoorbeeld vanwege de politieke instabiliteit in een land betekent dat toekomstige generaties over minder grondstoffen beschikken dan vanuit het welvaartseconomisch perspectief optimaal is. Dit is een vorm van marktfalen, veroorzaakt door niet goed gedefinieerde eigendomsrechten.

De analyse over een optimaal winningstempo gaat nog voorbij aan de vraag of dit tempo intergenerationeel rechtvaardig is. Dat is een meer ethische vraag waarbij verschillende overwegingen een rol kunnen spelen. Dit valt buiten het bestek van dit onderzoek.

Voorzieningszekerheid

Vragen over voorzieningszekerheid betreffen twee aandachtspunten. De eerste gaat om de vraag of grondstoffen voldoende beschikbaar zijn en in hoeverre we afhankelijk zijn van landen waar we misschien liever niet afhankelijk van willen zijn. Het tweede punt betreft het tegengaan van grote prijsschokken die hun weerslag hebben op de reële economie²³. Beide punten hangen samen. Een goed ontwikkelde wereldmarkt voor een grondstof betekent dat er veel concurrerende aanbieders en vragers –mogelijk via intermediaire posities- zijn die hun onderlinge huidige en toekomstige handelsposities kunnen verzekeren via liquide financiële markten. Dat sluit prijsschokken niet uit, maar maakt ze wel minder waarschijnlijk. Maar als toegang tot de markt voor aanbieders gerestricteerd is²⁴, markten dun zijn (weinig transacties), of als het aanbod op andere manieren niet-contestable is, kunnen de kleinste geruchten tot prijspieken leiden, en tot marktpanieken waarbij landen hun markten sluiten of hun marktmacht gebruiken.

Het afnemen van de vraag naar olie als gevolg van het belasten van CO₂ en het tegelijkertijd opkomen van alternatieven betekent dat de marktmacht van olieproducerende landen zal afnemen. Olie wordt dan steeds meer een grondstof in plaats van een brandstof.

²² De uitstoot van CO₂ in de gehele keten wordt besproken in paragraaf 4.4.

²³ Strikt gesproken is dit geen marktfalen (CE, 2017b). De prijsvolatiliteit kan wel leiden tot macro-economische aanpassingskosten. Dit geeft een mogelijk handvat om voorzieningszekerheid te waarderen (zie ook Verrips, Aalbers en Huizinga, 2013).

²⁴ Het kan zijn dat de toegang tot markten wordt bepaald door een nationaal monopolie, maar dat hoeft niet. Een land met grote reserves kan ook concurrentie toelaten tussen verschillende exploitanten.

Zoals figuur 2.2 laat zien is de prijs van kunststof een stuk minder volatiel dan de olieprijs. Dit suggereert in de eerste plaats dat er meer factoren zijn die de kosten van de productie van kunststof bepalen naast de prijs van de primaire grondstof. Daarnaast is de productie van kunststof verspreid over vele bedrijven over de hele wereld. Dit in tegenstelling tot de olieproductie in de afgelopen decennia. In die zin lijkt er sprake te zijn van een goed ontwikkelde markt voor de sourcing voor kunststof. Het borgen van de voorzieningszekerheid lijkt daarmee nu en in de toekomst geen sterk argument om minder olie en gas te gebruiken voor de productie van kunststoffen.

Arbeidsomstandigheden

In sommige landen waar olie of gas wordt gewonnen zijn de arbeidsomstandigheden en sociale condities slecht. Vaak gaat het om complexe vraagstukken. Werknemers kunnen soms beter af zijn in een baan onder slechte omstandigheden dan zonder baan. Er is geen studie bekend die heeft geprobeerd om dit effect te kwantificeren. Een uitgebreide analyse van deze problematiek ligt buiten het kader van dit onderzoek.

Landgebruik, landschap, biodiversiteit en concurrentie met voedsel en energie

Biomassa is de grondstof voor bioplastic. In hoofdstuk 2 werd al geconstateerd dat het landgebruik per ton plastics uit biomassa relatief omvangrijk is. De productie van biomassa voor kunststof concurreert met de productie van voedsel en met de productie van biomassa voor energie. Het benodigde areaal kan ten koste gaan van landbouwgrond met mogelijk effect op voedselprijzen.

Een grotere inzet van biomassa als grondstof voor plastic doet een groter beroep op het beschikbare areaal landbouwgrond. De vraag naar biomassa neemt naar verwachting snel toe, maar uitbreidingsmogelijkheden van het aanbod van biomassa lijken relatief beperkt ten opzichte van de vraagontwikkeling. De ontginning van nieuwe landbouwgronden kan ten koste gaan van landschappelijke waarden en natuur vanwege de ontbossing. Nederland kan de groei in de binnenlandse vraag naar biomassa alleen opvangen door meer in te voeren (PBL, 2014).

Het is nog onduidelijk wat dit betekent voor de voedselprijzen. Door technologische ontwikkeling zal het benodigde areaal per hoeveelheid biomassa kunnen afnemen. Ook kunnen reststromen in de landbouw beter worden benut, maar ook deze ontwikkeling stuit op fysieke grenzen. Zo kan een groter deel van de maisplanten na de oogst gebruikt worden als biomassa, maar een deel blijft nodig ter verbetering van de bodemkwaliteit, nodig voor de verbouw van mais in de daaropvolgende jaren (PBL, 2014). Ramingen van het mondiale potentieel aan biomassa voor de toekomst lopen sterk uiteen.

Ook de productie van fossiele grondstoffen heeft gevolgen voor landgebruik, landschap en biodiversiteit. Zeker de productie van schaliegas en -olie heeft negatieve gevolgen voor landschap en het milieu (Europese Parlement DG for Internal Policies, 2011). De productie van fossiele grondstoffen gaat met minder landgebruik gepaard dan de productie van een vergelijkbare hoeveelheid biomassa.

4.2 Productie en transport

Emissies

Productie en transport gaan gepaard met emissies. Afgezien van CO₂ gaat het om fijnstof (pm10), stikstofoxiden (NO_x) en zwaveloxiden (SO₂). De uitstoot van deze stoffen is (binnen Europa) relatief beperkt door opgelegde normen. Uit diverse ketenanalyses blijkt het aandeel van milieuvervuilende emissies bij transport bescheiden in verhouding tot die bij de productie (Tauw, 2016; TNO, 2015; Shen et al., 2011).

Uit een ketenanalyse van TNO van plastic draagtassen (TNO, 2015) blijkt dat fijnstof (pm10)²⁵ een substantieel deel uitmaakt van de externe effecten die gemoeid zijn met de productie van een plastic tas van 'cradle to grave'²⁶. Deze variëren van gemiddeld 6,3 kg pm10 per 'ton plastic draagtas' (LDPE) tot 9 kg (PET), waarvan circa een derde deel te relateren is aan transport en ongeveer de helft aan de productie van granulaat. Daarbij meldt het rapport dat er grote verschillen in pm10-uitstoot bestaan tussen producerende landen. De uitstoot van pm10 bij productie in China is circa een factor vier hoger dan in Europa.

De in geld uitgedrukte maatschappelijke kosten hangen af van de schaduw prijzen die worden toegekend aan de emissies van de verschillende stoffen. Deze schaduw prijzen volgen uit de literatuur en kennen een zekere bandbreedte. De gemonetariseerde effecten van CO₂-uitstoot maakten in de ketenanalyse van de plastic draagtas²⁷ het leeuwendeel uit van de totale externe effecten. Daarna volgden de effecten van fijnstof (enkele procenten) en ten slotte de impact van een sterke algengroei in het water door NO_x.

Milieuvervuiling door ongelukken

Bij het transport van olie en tussenproducten treden soms ongelukken op met aanzienlijke milieuvervuiling tot gevolg. Zoals eerder gemeld kunnen deze slechts voor een beperkt deel aan de productie van kunststof worden toegerekend. De totale transportstromen zijn omvangrijk, het aantal incidenten is relatief beperkt, zij het met soms grote gevolgen. De omvang van deze effecten is niet bekend.

4.3 Afval

In Nederland wordt kunststofafval verbrand (voornamelijk via het restafval) of gerecycled. Sinds 1996 geldt een stortverbod voor afval. In het buitenland, bijvoorbeeld in landen rond de Middellandse Zee, vindt nog wel stort van (kunststof)afval plaats. In sommige landen is ook illegale stort een probleem, maar in Nederland is dat beperkt. In ons land zit nog wel kunststof in de grond op oude stortplaatsen.

²⁵ Een deel van de pm10-fractie bestaat uit deeltjes die kleiner zijn dan 2,5 micrometer. Juist deze deeltjes zijn het meest schadelijk voor de gezondheid.

²⁶ *Cradle to grave* refereert aan de hele levensduur van een product, vanaf het winnen van de grondstof tot de uiteindelijke vernietiging, dus inclusief recycling en hergebruik. De verwante uitdrukking *Cradle to gate* neemt alleen de levensduur mee totdat het product gereed is voor gebruik (zie paragraaf 4.4).

²⁷ Uiteraard betreft dit een ketenanalyse van een specifiek product, de plastic tas. Naar verwachting is het wel mogelijk de effecten van deze analyse *grosso modo* te generaliseren naar andere producten en zeggen de verhoudingen uit deze ketenanalyse dus wel iets over de orde van groottes van verschillende effecten.

Afvalverbranding brengt externe effecten met zich mee. Daarnaast gaan belangrijke externe effecten gepaard met het zogenoemd zwerfafval als gevolg van kunststof dat niet wordt verbrand of gerecycled (paragraaf 4.3.2). Zwerfafval kan via de wind, het strand of sloten en rivieren uiteindelijk in zee terecht komen en daar plasticsoep vormen (paragraaf 4.3.3).

4.3.1 Afvalresidu na verbranding

Het gescheiden ingezamelde kunststof bestaat voor circa 35 procent uit aangehecht vuil en niet-recyclebaar kunststof. Dit wordt voor het grootste deel verbrand en deels opgeslagen in afwachting van nieuwe technologieën. Bij verbranding van afval resteert uiteindelijk circa 30 procent van het oorspronkelijke gewicht van het afval. Deze reststoffen bestaan voor het grootste deel uit bodemmassen, die onder andere worden gebruikt als fundering voor de aanleg van wegen. Uit de restanten van het verbrande materiaal wordt ook metaal gehaald dat niet is verbrand (non-ferro-metalen) en dat nog gerecycled kan worden. Het aandeel onbruikbaar residu dat overblijft, is uiteindelijk 3 procent van het gewicht van het oorspronkelijke afval (Vereniging Afvalbedrijven, 2016). Dit wordt verglaasd opgeslagen voor zeer lange tijd tot wellicht een techniek is uitgevonden om dit alsnog te bewerken en gebruiken. De opslag van het materiaal en het ruimtebeslag dat dit met zich meebrengt, is een extern effect (van afvalverbranding in zijn totaliteit).

Bij de verbranding en recycling van kunststofafval komen schadelijke emissies vrij. De CO₂-component daarvan komt in de volgende paragraaf aan de orde. Aangezien afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) schadelijke rookgassen afvangen, zal de uitstoot van deze stoffen relatief beperkt zijn in Nederland (Gradus et al, 2016).

4.3.2 Zwerfafval

Dit afval komt zowel op land voor als in mariene omgevingen (zee, rivieren, oppervlaktewater, zie volgende paragraaf). Zwerfafval ontstaat zowel door afval dat achteloos wordt weggegooid of achtergelaten als door verwaaiing bij onvoldoende capaciteit van prullenbakken.

In Nederland belandt per jaar naar schatting 50 miljoen kilo (kiloton) afval in de leefomgeving. Dit zwerfafval bestaat voor circa 20 procent uit plastic, waarvan circa 92 procent uit verpakkingen (KplusV, 2015, milieucentraal.nl).²⁸ Het aandeel zwerfafval in het totale verpakkingsafval van Nederlandse huishoudens is daarmee enkele procenten. Dat lijkt zo gezien beperkt, maar een relatief kleine stroom kan zorgen voor relatief grote maatschappelijke kosten. De kosten van preventie en verwijdering van zwerfafval in Nederland zijn geraamd op 250 miljoen euro in 2010, grotendeels voor rekening van gemeenten (KplusV, 2015).

Verder gaat zwerfafval gepaard met externe schade en daaraan gekoppelde maatschappelijke kosten. In de eerste plaats 'ontsiert' het de leefomgeving en het landschap. Dat vinden mensen lelijk; het leidt tot ergernis en verloedering van de leefomgeving. De maatschappelijke kosten die door deze schade ontstaan, kunnen bijvoorbeeld zichtbaar worden in lagere prijzen van woningen of in minder bezoekers van recreatie- en natuurgebieden. Verder kan zwerfafval leiden

²⁸ Dit is een percentage van het gewicht. Plastic heeft een relatief laag soortelijk gewicht, waardoor het percentage in het volume hoger zal zijn. 25 procent van het zwerfafval bestaat uit sigaretten en kauwgom en ruim 20 procent uit papier.

tot bodem- of watervervuiling. Dieren kunnen rondzwervend plastic eten en stikken als gevolg daarvan.

4.3.3 Plasticsoep

In de oceanen en zeeën drijft en zinkt steeds meer kunststofafval dat door verwerking, zonlicht en golfslag uiteen valt in kleine stukjes (microplastics, kleiner dan 5 mm of nog kleinere deeltjes, nanoplastics). In het dagelijks spraakgebruik wordt dit aangeduid als 'plasticsoep'. Volgens EPA (2016) bestaat 90 procent van het plastic afval in oceanen uit microplastics. Ook de Waddenzee, de Noordzee, rivieren, kanalen en grachten in Nederland bevatten plastics. Dit plastic kan door vissen en andere dieren worden aangezien voor voedsel. Zo komt het ook in ons voedsel terecht (milieuorganisatie van de Verenigde Naties, de UNEP).

Volgens de UNEP is het gerapporteerde aantal diersoorten dat gevolgen ondervindt van plastic gestegen van 247 in 1997 naar 663 in 2012. Het merendeel van de problemen met zwerfafval in het water (82 procent) heeft te maken met plastics (Rochman et al., 2016). 75 procent van het zwerfvuil uit de zee dat op land aanspoelt, bestaat uit plastics. Afval in zee komt ook op het strand terecht. Dit kan toeristen afschrikken; ook is stranden schoonmaken kostbaar.

Er is nog weinig bekend over de langetermijneffecten van microplastics in de zee en in de voedselketen. Wel is duidelijk dat kunststof zeer lang in het zeemilieu aanwezig blijft. Dat komt doordat verreweg de meeste kunststoffen niet goed afbreekbaar zijn. Ook is duidelijk dat zeedieren via hun voedsel (micro)plastics²⁹ opnemen. Daarom lopen meerdere onderzoeken naar de aanwezigheid van (micro)plastics, de verspreiding in het milieu, de effecten op organismen en de gevolgen voor de voedselketen. Ook blijkt dat verontreinigende stoffen in het water zich relatief goed hechten aan kunststofafval. Volgens WEF (2016) drijven er met het plastic ook naar schatting 23 miljoen ton aan additieven uit de plastics in zee. Deze toevoegingen (ftalaten, abisphenol) komen vrij in het milieu en zorgen voor gezondheidsschade. Het terugdringen van plastic afval is daarom een van de speerpunten van het Nederlandse en Europese milieubeleid (RIVM, 2014).

De schattingen over de hoeveelheid plastic in oceanen lopen uiteen. Volgens World Economic Forum (WEF) (2016) wordt jaarlijks 8 miljoen ton plastic in de oceaan 'gedumpt' (National Geographic). Volgens *Nederschoon.nl* gaat het om ca 4,7 miljoen ton. WEF verwacht een verviervoudiging tot 2050. EPA (2016) raamt op basis van Jambeck et al, 2015 een ruimte bandbreedte van 4,8-12,7 megaton plastic in oceanen en zeeën op jaarbasis. Veel plastic is afkomstig van verpakkingsmateriaal.

Een recent onderzoek van de WUR bracht een nieuw effect aan het licht van de plasticsoep. Kleine plastic deeltjes in de Noordelijke ijszee zouden het smelten van de ijskappen en daarmee de effecten van klimaatverandering kunnen versnellen. Daarnaast is het gebied waar relatief grote hoeveelheden microplastics werden aangetroffen relatief rijk aan leven ten opzichte van bijvoorbeeld het gebied in de Grote Oceaan waar grote hoeveelheden plastic drijven met daarmee potentieel grotere gevolgen voor het zeeleven. Een ander interessante conclusie betrof de

²⁹ Dat het niet alleen gaat om microplastics maar dat ook grotere stukken plastic een probleem kunnen vormen voor zeedieren kwam naar voren uit de maaginhoud van verschillende aangespoelde dode walvissen.

herkomst van deze plastics. Uit een analyse van zeestromen bleken deze hoofdzakelijk afkomstig uit Noordwest Europa (Speksnijder, 2017).

Plasticsoep kent verschillende bronnen. Behalve afval van de scheepvaart, visserij³⁰ (bijvoorbeeld slijtage van visnetten), boorplatforms en strandafval dat rechtstreeks in zee belandt, gaat het om diverse landbronnen die hieronder worden besproken.

Zwerfvuil

Zwerfvuil, met name van verpakkingsmateriaal, dat via wind of regen het oppervlaktewater bereikt, wordt als een belangrijke bron van microplastics aangemerkt en wordt door het RIVM als hoogste prioriteit aangemerkt. Het RIVM (2014) heeft een inventarisatie gemaakt van de landbronnen van microplastics in het oppervlaktewater. Volgens de publicatie is circa 80 procent van het plastic afval in het water afkomstig van bronnen op land.³¹

Afvalwater

Zwerfafval is niet de enige bron van de plasticsoep, een andere bron is kunststof uit afvalwater. Dit kunststof is afkomstig uit cosmetica (tandpasta en scrubs) of ontstaat door slijtage bij het wassen van kunststof kleding, maar ook door slijtage van verf. Recent worden ook de rubbergranulaatkorrels van voetbalvelden genoemd als bron van microplastics in het milieu (Afvalonline, 24 mei 2017). Het is met de huidige techniek lastig om alle microplastics in afvalwaterzuiveringsinstallaties (RWZI) uit het water te filteren. Gegevens over de verwijderingsefficiëntie van microplastics in RWZI's zijn beperkt. Volgens een studie die in opdracht van NLWKN (het waterbedrijf van Nedersaksen), uitgevoerd door de Universiteit van Osnabrück, zou 98 procent van de hoeveelheid kunststof in afvalwater te zuiveren zijn door RWZI's (Afvalonline, 6 juni 2017).

Ook door regenwater komen microplastics in het water. Per jaar komt er in Nederland naar schatting 17 kiloton autobandenslijpsel vrij in het milieu. Daar komt bij dat bij gescheiden afvalwaterinzameling regenwater dat afspoelt van verharde oppervlakken niet meer wordt gezuiverd en direct, inclusief meekomende kunststofdeeltjes (uit bandenslijpsel, verfslijtage, zwerfafval), geloosd op het oppervlaktewater.

Groente- fruit- en tuinafval

Ook plastic uit compost dat gemaakt is op basis van groenafval (gft) is een belangrijke bron van microplastics in het oppervlaktewater. Het gft bestaat, na sorteren, voor 1 tot 2 procent uit plastic dat wordt vermalen en via compost uiteindelijk in het oppervlaktewater belandt. Ook composteerbaar bioplastic dat in de praktijk onvoldoende lang in composteerinstallaties is behandeld om volledig af te breken, draagt hieraan bij (CE Delft, 2017).

Bioplastic en zwerfafval

Meer gebruik van bioplastic biedt, gegeven de huidige stand van de technologie, (nog) geen oplossing voor de problematiek van zwerfafval en de plasticsoep. In hoofdstuk 2 trokken we de

³⁰ Een doel van de beleidsvisie over circulaire economie is "minimalisatie van zwerfafval van scheepvaart". Dat zou dan gaan om 13 kton per jaar (TNO, 2017).

³¹ Afval vanuit de scheepvaart, visserij (bijvoorbeeld slijtage van visnetten), boorplatforms en strandafval wordt niet geschaard onder landbronnen.

conclusie dat op dit moment slechts een kwart van het bioplastic biologisch afbreekbaar is. Dit percentage zal naar verwachting in de toekomst zelfs dalen (European bioplastics, 2016). Het bioplastic dat wél biologisch afbreekbaar is, dat meestal alleen is bij verhitting in een industriële omgeving (www.biobasedpress.eu). Bioplastic op de composthoop, als zwerfafval op het land of in het water in de 'plasticsoep' zal dus blijven voortbestaan en de effecten zijn gelijk aan dat van *virgin* plastic (Nova Institute, 2017; CE Delft, 2017; WUR, 2017; RIVM, 2014).

4.4 CO₂-emissie fossiel en gerecycled kunststof

Deze paragraaf geeft op basis van de literatuur de CO₂-emissies weer van de productie (en transport) van primair kunststof, recycling van kunststof en van het verbranden van kunststofafval. De CO₂-emissie die gepaard gaat met de productie van een kunststof voorwerp (of verpakking) uit (re)granulaat is vanzelfsprekend niet alleen afhankelijk van de soort kunststof, maar ook van het product. Een uitgebreide analyse hiervan ligt buiten het bestek van deze studie.

Op basis van de ketenanalyse van TNO kan de orde van grootte van de CO₂-emissies die gepaard gaat met de productie van een product uit granulaat worden berekend voor een plastic draagtas. De hoeveelheid CO₂ die gemoeid is met de productie van een plastic tas uit granulaat bedraagt een kwart van de hoeveelheid CO₂ die vrijkomt bij de productie van granulaat uit fossiele grondstoffen.

4.4.1 CO₂-emissies productie primair kunststof, recyclen en verbranden

CO₂-emissie productie van primair kunststof

Plastics Europe heeft een uitgebreide database van grondstoffen en milieueffecten die gepaard gaan met de productie van verschillende typen primair kunststof van 'cradle to gate'. De CO₂-uitstoot bij de productie van primair kunststof uit aardolie verschilt enigszins per type kunststof en bedraagt grofweg 2 ton per ton product. Dit spoort met de uitstoot die Shen et al. (2011) rapporteren voor de productie van primair kunststofgranulaat. Het is niet bekend of er een substantieel verschil is met het gebruik van LNG als grondstof.

CO₂-emissie productie van recycling van kunststof

Een ketenanalyse van Tauw (2016) van de recycling van kunststof huishoudelijk afval door SUEZ laat zien dat bij de productie van een ton gerecycled kunststof (regranulaat) 0,85 ton CO₂ vrijkomt (zie tabel 4.1). De keten omvat op- en overslag, transport, sorteren, het verwerken tot granulaat en het verbranden van restanten die niet goed recyclebaar zijn. De uitstoot komt overeen met de 0,87 ton die Gradus et al. (2016) rapporteren op basis van Benner et al CE Delft, 2007.

Tabel 4.1 CO₂-emissies van recycling van huishoudelijk plastic afval in de keten bij SUEZ in 2015 (Tauw, 2016)

	Percentage totale CO ₂ -uitstoot (%)	Opmerkingen
Op- en overslag (exclusief inzamelen)	2	
Transport naar sorteren	3	
Sorteren	5	
Transport naar recyclers	3	
Verbranden niet-recycleerbaar	15	
Recycling tot plasticgranulaat	73	86% recycling, 14% verbranden restafval
Totaal	100	

Tabel 4.2 CO₂-emissies van verwerking van één ton gescheiden kunststofafval tot recycleaat (Gradus et al., 2016)

	Mton
Verbranden restanten	0,65
Recyclen	0,2
Transport	0,02
Totaal	0,87

CO₂-emissie bij verbranding van kunststof in huishoudelijk restafval

Bij het verbranden van een ton huishoudelijk restafval (waar kunststof onderdeel van uitmaakt) komt, afhankelijk van het type installatie, gemiddeld 1 tot 1,8 ton CO₂ vrij (SUEZ, 2016). De emissies bij inzameling, op- en overslag maken slechts enkele procenten hiervan uit. Een rapport van CE Delft (2007) rapporteert een CO₂-uitstoot van 2,6 ton per ton verbrand kunststofafval en is vrijwel geheel toe te rekenen aan de verbranding zelf.

Analyse vergelijking CO₂-emissies

In een artikel in *Ecological Economics* (Gradus *et al*, 2016) vergelijken de auteurs de CO₂-uitstoot van recycling van kunststof met het verbranden met energierecuperatie³². Het verschil in CO₂-emissies tussen recyclen en verbranden bedraagt 2,6 minus circa 0,9 is circa 1,7 ton CO₂ per ton gescheiden kunststofafval. In het artikel wordt uitgegaan van een besparing van ca 1,2 ton CO₂ per ton gerecycled plastic dat niet wordt verbrand. Dat is ingegeven vanuit de redenering dat iedere toepassing niet alleen CO₂ uitstoot, maar ook bespaart.

Het recyclen van kunststofafval genereert CO₂, maar je krijgt er kunststof voor terug. Omdat je dat kunststof niet op een andere manier hoeft te produceren, is er volgens de auteurs ook weer een besparing van 0,2 ton CO₂ als vermeden uitstoot van de productie van regranulaat. Volgens dezelfde redenering veroorzaakt het verbranden van kunststofafval voor energieopwekking weliswaar CO₂-emissie, maar er is ook een besparing, omdat diezelfde energie nu niet met een (fossiele) brandstof opgewekt hoeft te worden. De vermeden uitstoot bedraagt 0,78 ton CO₂.

Een dergelijke vergelijking van CO₂-uitstoot tussen verschillende processen met inachtneming van de vermeden CO₂-emissies wordt veel toegepast. CE Delft (2016) gaat uit van een reductie van 1,2 ton CO₂ per ton plastic door te recyclen in plaats van verbranden. Ook de ketenanalyses

³² Op basis van emissiedata van Benner et al CE Delft (2007). Door technologische ontwikkeling ligt de uitstoot bij verbranding volgens de auteurs op dit moment waarschijnlijk lager dan 2,6 ton CO₂ per ton verbrand kunststof.

van Tauw (2016) passen dit principe toe, evenals ketenanalyses van toepassingen van biobased plastic.

Aan deze wijze van vergelijken kleven wel diverse bezwaren, zowel wat betreft de vermeden CO₂-uitstoot van de productie van kunststof als van de vermeden CO₂-uitstoot van opwekking van elektriciteit en warmte. Als er in de marge minder kunststof wordt gerecycled, dan is er weliswaar minder regranulaat, maar het is maar de vraag of dit opgevangen zal worden met de productie van meer kunststof. Er zijn andere alternatieven, ieder met eigen kosten en baten.

De vermeden uitstoot van CO₂ die gepaard gaat met het opwekken van eenzelfde hoeveelheid elektriciteit en warmte zou geraamd moeten worden op basis van de CO₂-uitstoot van de 'marginale opwekkingstechniek'. Welke opwekkingstechniek verdwijnt uit de zogenaamde 'merit order' bij het opwekken van de elektriciteit en warmte doordat de AVI kunststof verbrandt ten opzichte van de situatie dat de kunststof niet zou zijn verbrand? De CO₂-uitstoot van deze *marginale* energieopwekking is niet gelijk aan de *gemiddelde* uitstoot van de energiemix. Welke marginale opwekkingstechniek uit de 'merit order'³³ zal verdwijnen ten gevolge van de energieopbrengst van de AVI zal per situatie verschillen. Dit kan opwekking met kolen zijn (met een relatief hoge CO₂-uitstoot), maar ook opwekking met windenergie (zonder CO₂-uitstoot). Hoe hoog de vermeden CO₂-uitstoot in de praktijk zal zijn, vergt nader onderzoek. Deze zal liggen tussen nul en de vermeden CO₂-uitstoot van een kolencentrale en zal daarnaast niet constant zijn over de tijd.

De hoeveelheid CO₂ die ontstaat bij energieopwekking hangt evident af van de samenstelling van de energiemix en die is aan verandering onderhevig. Als meer energie op een duurzame wijze wordt opgewekt, zal de CO₂-uitstoot die gepaard gaat met het opwekken van eenzelfde hoeveelheid warmte en elektriciteit afnemen. Verder heeft de ontwikkeling van CO₂-opslag invloed op de hoeveelheid CO₂ die in de atmosfeer komt. Enerzijds voor de marginale energieopwekking om eenzelfde hoeveelheid warmte en elektriciteit op te wekken. Anderzijds zou CO₂-afvang misschien in de toekomst ook kunnen worden toegepast bij de AVI's. Op dit moment wordt op kleine schaal al CO₂ die ontstaat bij afvalverbranding gebruikt in de glastuinbouw.

De vermeden CO₂-uitstoot bij het recyclen van een ton kunststofafval in plaats van het verbranden van dit afval zal in de praktijk in Nederland op dit moment liggen tussen de 1,2 (CE Delft en Gradus et al.) en 1,7 ton (2,6 minus 0,9 zonder rekening te houden met vermeden CO₂-uitstoot van energieopwekking of productie van materialen).

Onderstaande tabel geeft de CO₂-uitstoot weer van het recyclen en verbranden van kunststofafval en van de productie van primair kunststof.

³³ De volgorde waarin elektriciteitscentrales worden ingezet, vastgesteld op basis van hun specifieke, variabele productiekosten.

Tabel 4.3 CO₂-uitstoot (ton) recycling en verbranden 1 ton gescheiden kunststof huishoudelijk afval en van de productie van een ton virgin plastic

	CO ₂ -uitstoot
Recycling 1 ton kunststofafval (levert 0,65-0,75 ton regranulaat)	0,9
Verbranden 1 ton kunststof (met energierugwinning)	2,6
Productie 1 ton primair kunststof	2

4.4.2 Omvang CO₂-reductie recylen huishoudelijk kunststofafval in Nederland

In 2015 werd door een Nederlands huishouden op jaarbasis gemiddeld 19 kilo plastic³⁴ gescheiden. Dit betekent een potentiële reductie van ongeveer 23 tot 32 kilo CO₂ per huishouden op jaarbasis. Hierbij is uitgegaan van volledige recycling en nuttige toepassing van deze hoeveelheid en een besparing van ca 1,2 tot 1,7 ton CO₂ per ton gescheiden kunststofafval. De CO₂-reductie van alle huishoudens samen komt bij deze aannames neer op 175 tot 250 duizend ton op jaarbasis. Dit is 0,1 tot 0,15 procent van de totale CO₂-uitstoot in 2015 in Nederland (ca 165 megaton) of bijvoorbeeld minder dan 1 procent van de CO₂-uitstoot in Nederland door wegverkeer.

4.5 Externe effecten in de keten van biobased plastic

CO₂-uitstoot

Biobased kunststof wordt gezien als een duurzaam alternatief voor fossiel geproduceerde kunststof. De uitstoot van CO₂ van de meeste biobased plastic producten is lager dan van vergelijkbare producten op basis van fossiele grondstoffen. De reductie bedraagt 'cradle to grave' circa 10 tot 50 procent (Nova Institute, 2017). Zo is de CO₂-uitstoot van het kunststoftype PLA uit mais, 27 procent lager dan bij het gebruik van fossiele grondstoffen³⁵ (Nova Institute, 2015). De uitstoot van broeikasgassen (in CO₂-equivalenten) bij de productie van PET-flessen uit bioplastic is gemiddeld 25 procent lager dan bij het gebruik van aardolie als grondstof (Shen et al., 2011). Tabel 4.4 toont de CO₂-uitstoot in de keten.

WUR (2017) heeft de reductie van CO₂ per hectare uiteengezet van het gebruik van mais, tarwe, suikerbiet, suikerriet en olifantsgras. De reductie van CO₂ bij het gebruik van PLA in vergelijking tot PET (substituut) is meer dan twee maal zo hoog als bij het gebruik van BioPE in vergelijking tot LDPE (substituut). Voor de teelt in Nederland komt suikerbiet als beste naar voren wat betreft de te behalen besparing in de uitstoot van broeikasgassen (WUR, 2013).

CE Delft (2017) heeft de bijdrage aan de uitstoot van CO₂ geanalyseerd van diverse typen bioplastic ten opzichte van *virgin* plastic. De reductie van CO₂ bedraagt volgens dit rapport tussen 0 en 100 procent bij PLA, tussen 50 en 60 procent bij Bio-PET en meer dan 100 tot zelfs 200 procent bij Bio-PE.

³⁴ Gecorrigeerd voor vuil. Aantal huishoudens Nederland 2016 7,7 mln (CBS Statline).

³⁵ Hierbij is rekening gehouden (zowel aan de kant van de biobased producten als bij de fossiele producten) met vermeden uitstoot van CO₂ bij energieopwekking.

Uit de analyses volgen dat het type materiaal de meeste invloed heeft op de CO₂-uitstoot, gevolgd door het type biomassa dat wordt gebruikt en waar dit wordt geteeld en of er sprake is van energierugwinning. Transportstromen blijken nauwelijks van invloed.

Tabel 4.4 Uitstoot CO₂-equivalenten in de keten van PLA en *virgin* PE

	PLA van mais (CO ₂ -eq/kg kunststof)	Virgin PE (CO ₂ -eq/kg kunststof)
Opname uit atmosfeer	-1,8	-
Productie granulaat	2,4	1,9
Productie product	0,7	0,7
Verbranding	1,8	2,8
Elektriciteitsopwekking	-1,1	-2,5
Totaal (cradle-to-cradle)	2,1	2,9

Bron: Nova Institute, 2015 op basis van Plastic Europe 2012.

De methodiek³⁶ die gevolgd wordt om een levenscyclusanalyse (LCA) te maken kan daarnaast ook een groot verschil uitmaken in de uitkomsten. Verder maakt het voor de resultaten uit of al dan niet wordt uitgegaan van energierugwinning.

Andere externe effecten biobased plastic

CO₂-uitstoot is slechts een van de externe effecten. Oliepalm komt in de studie als meest efficiënte gewas naar voren met de minste broeikasgasuitstoot en het kleinste landbeslag. Tegelijkertijd bestaan er juist rond dit gewas de grootste maatschappelijke zorgen, omdat de enorme uitbreiding van de teelt in de afgelopen decennia ten koste is gegaan van regenwoud.

Biobased producten hebben een grotere impact op het gebied van eutrofiëring en verzuring in vergelijking tot producten die op basis van fossiele grondstoffen zijn bereid door het gebruik van bemesting (Nova Institute, 2017; WUR, 2017). Bij het gebruik van kunstmest komt tevens N₂O (lachgas) vrij. Het broeikas effect van dit gas is bijna 300 maal zo groot als van CO₂. Verder is het watergebruik hoger bij het gebruik van biobased grondstoffen in vergelijking tot fossiele grondstoffen.

Met het gebruik van suikers kan beduidend meer CO₂ worden gereduceerd dan bij het gebruik van mais. Het risico op indirect verandering van landgebruik (bijvoorbeeld ontbossing) is bij de teelt van suikers aanzienlijk lager dan bij gebruik van olies. Bij ontbossing ten behoeve van landbouwgrond ontstaat er een groot negatief effect op CO₂ en biodiversiteit (CE, 2017).

4.6 Externe effecten van andere substituten van kunststof

Voor kunststof bestaan vele alternatieven, afhankelijk van het gebruik. Zo kan het plastic in verpakkingen vervangen worden door papier of metaal, een plastic tas door een papieren of katoenen tas, nylon en polyester kleding door katoen, kunststof kozijnen of tuinmeubelen door hout enzovoort. Daarbij gaat het ene materiaal gepaard met relatief veel landgebruik (hout,

³⁶ De studie heeft een LCA uitgevoerd met zowel de systeemexpansiemethode als met de allocatiemethode. Volgens de ISO-methodiek LCA geniet de systeemexpansiemethode de voorkeur, maar om verschillende redenen wordt ook vaak voor de allocatiemethode gekozen.

papier), wordt bij andere materialen weer veel water gebruikt (katoen) en zijn effecten bij de grondstoffenwinning bij sommige metalen weer relatief groot. De uitstoot van CO₂ en andere emissies, zoals fijnstof verschillen, afhankelijk van de gebruikte materialen en toepassingen en de plaats van de productie. Ook in de afvalfase zullen verschillen bestaan; sommige materialen zijn gemakkelijker te recycleren (papier, glas) sommige materialen zijn relatief goed composteerbaar (papier, hout) andere veroorzaken relatief meer milieuschade (metaal).

De eerder aangehaalde ketenanalyse van de plastic tas van TNO uit 2015 geeft een indicatie van deze verschillen voor dit specifieke voorbeeld. De effecten voor het milieu bij het vervangen van een plastic draagtas door één van papier zijn zwaar negatief. Dit komt door het beslag op land en water en meer emissies vanwege bij het transport van de zwaardere tassen. Ook bij de katoenen tas pakt het effect voor het milieu ten opzichte van een plastic tas veelal negatief uit, tenzij de katoenen tas vele malen wordt hergebruikt. Belangrijk hierbij is wel te vermelden dat de effecten van zwerfafval en 'plasticsoep' hierin niet zijn meegenomen en juist negatief zijn voor plastic ten opzichte van papier of katoen. Het is heel lastig om het effect van een plastic draagtas op dit punt te kwantificeren.

Een vergelijking van de volledige externe effecten van kunststof met die van mogelijke substituten valt buiten het bestek van deze studie. TNO en CE Delft hebben de milieueffecten geanalyseerd van de Raamovereenkomst Verpakkingen 2013-2022. Het rapport geeft de geraamde effecten weer van verschillende maatregelen in zogenaamde 'milieupunten'. Een van de maatregelen is meer kunststof recycleren; deze maatregel pakt volgens het rapport gunstig uit voor het milieu. Opvallend daarbij is de post 'landgebruik' goed is voor de helft van de geraamde milieupunten. Deze effecten zijn echter hoofdzakelijk ingegeven door de aanname dat het recyclaat voor een derde deel primair kunststof vervangt, voor een derde deel beton maar ook voor een derde deel hardhout met bijbehorend landbeslag (TNO, CE, 2015). Voor de effecten voor het milieu is het dus van groot belang wat nu in de praktijk vervangen wordt door het regranulaat.

Bijlage A Volumerekening kunststof in Nederland

Ondanks de in paragraaf 2.2.1 beschreven omissies en onzekerheden probeert deze bijlage een overzicht op te stellen voor Nederland.

Tabel A.1 geeft een overzicht van het aanbod en gebruik van kunststof in Nederland. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen polymeren ('ruwe kunststof'), verpakkingen, overige producten die volledig van kunststof zijn gemaakt en producten die gedeeltelijk van kunststof zijn gemaakt. Deze groepen kunnen niet zonder meer bij elkaar worden opgeteld, aangezien polymeren als grondstof voor kunststofproducten worden gebruikt. Op basis van CBS-data is hieronder een met nadruk mogelijke invulling van de aanbod- en gebruikstabel voor kunststof gegeven. De vorming of onttrekking aan voorraden is in onderstaand overzicht niet weergegeven.

De invoer bestaat uit grondstoffen (in de vorm van polymeren), direct ingevoerde producten van kunststof (waaronder verpakkingen) en kunststof die is verwerkt in alle mogelijke andere ingevoerde producten. Kunststof wordt gebruikt door Nederlandse bedrijven en huishoudens of (weder)uitgevoerd. Daarnaast treedt bij de productie ook uitval op: het reguliere bedrijfsafval en producten die om allerlei redenen uit roulatie worden genomen.

De tabel laat zien dat essentiële informatie over de hoeveelheid kunststof in andere producten mist. Daarnaast is de post uitval tijdens productie onbekend. De onzekerheid rondom de producten die gedeeltelijk uit kunststof bestaan, maakt dat misschien nog wel meer volume niet in kaart is gebracht dan wel. Voor zover mogelijk geeft het geheel van kunststofaanbod en -gebruik toch enig gevoel voor de orde van grootte, en hoe de verschillende stromen zich ongeveer tot elkaar verhouden.

Tabel A.1 Volumerekening kunststoffen in Nederland (2014)

Aanbod	Mln kg	Gebruik	Mln kg
<u>Binnenlandse productie</u>		<u>Levering aan bedrijven en huishoudens</u>	
Polymeren ('ruwe kunststof')	7600	Polymeren ('ruwe kunststof')	2400
		Kunststof verpakkingen	1500
		Overige producten 100% kunststof	2900
		Kunststof in andere producten	onbekend
<u>Invoer</u>		<u>Uitvoer (incl. wederuitvoer)</u>	
Polymeren ('ruwe kunststof')	3100	Polymeren ('ruwe kunststof')	8300
Kunststof verpakkingen	800	Kunststof verpakkingen	600
Overige producten van 100% kunststof	1600	Overige producten van 100% kunststof	1500
Kunststof in andere producten	onbekend	Kunststof in andere producten	onbekend
		<u>Uitval tijdens productie</u>	
		Verpakkingen	onbekend
		Overig	onbekend
Totaal aanbod	onbekend	Totaal gebruik	onbekend

Bron: berekeningen CPB op basis van CBS detaildata (2016) en KIDV (2017).

Bijlage B Afval- en recyclingbalans kunststof

KIDV

KIDV (2017) bevat een overzicht van de inzameling van kunststofafval van Nederlandse huishoudens en bedrijven (zie tabel B.1).³⁷ Voor het totaal aan huishoudelijk kunststofafval zijn cijfers over verpakkingen aangevuld met cijfers over niet-verpakkingen.³⁸ Deze aanvulling tot een volledig overzicht is voor huishoudens mogelijk, aangezien over huishoudelijk afval veel data zijn verzameld (onder andere door Rijkswaterstaat via het project Van Afval Naar Grondstof). Voor bedrijven bevat de tabel alleen informatie over kunststof verpakkingsafval: het KIDV heeft geen gegevens over de verwerking van niet-verpakkingsafval bij bedrijven.

Tabel B.1 Ingezameld kunststofafval op basis van gegevens KIDV, 2015

	Mln kilogram
Kunststofafval huishoudens	488
<i>Verpakkingen (326 mln kilogram)</i>	
- bronscheiding	145
- nascheiding	22
- in restafval	154
- in milieustraten grof huishoudelijk afval (a)	5
<i>Niet-verpakkingen (162 mln kilogram)</i>	
- bronscheiding	15
- nascheiding	2
- in restafval	90
- in milieustraten grof huishoudelijk afval (a)	55
Kunststofafval bedrijven	>147
<i>Verpakkingen (147 mln kilogram)</i>	
- brongescheiden verpakkingsafval (incl. grote PET-flessen) (b)	121
- verpakkingen in restafval	26
<i>Niet-verpakkingen</i>	
- overig kunststofafval	n/b
Invoer kunststofafval	n/b
- invoer gescheiden kunststofafval	n/b
- invoer via restafval	n/b
(a) Grof huishoudelijk kunststofafval dat via milieustraten binnenkomt, bevat onder meer zaken als tuinstoelen.	
(b) Dit betreft grote PET-flessen die voornamelijk afkomstig zijn van huishoudens (ingezameld via het statiegeldsysteem).	
Bron: KIDV (2017).	

Uit tabel B.1 blijkt dat circa 180 miljoen kilogram (38%) huishoudelijk kunststofafval gescheiden is ingezameld via bronscheiding en nascheiding. Daarnaast zit er nog veel kunststof in het huishoudelijk restafval. De schattingen van het percentage kunststof in deze afvalstroom variëren weliswaar per bron, maar zijn over het algemeen redelijk consistent. RWS (zie hieronder) en KIDV hanteren hiervoor een percentage van circa 14 procent.

³⁷ In de afgelopen 5 à 10 jaar is de hoeveelheid gescheiden ingezameld kunststofafval van zowel huishoudens als bedrijven flink gestegen. Deze stijging hangt samen met het minimumpercentages voor recycling die de overheid hanteert. Voor verpakkingen van kunststof betreft dit een recycledoelstelling van 52 procent in 2022; momenteel zitten we in Nederland al rond de 50 procent recycling (Afvalfonds Verpakkingen, 2015). Hoe dit recyclingpercentage eruit ziet voor het overige kunststofafval, is onbekend.

³⁸ In die laatste categorie zitten ook vuilniszakken, omdat deze niet onder verpakkingen vallen.

CBS

Het KIDV mist gegevens over het niet-verpakkingsafval van bedrijven. Daarnaast gaan de data alleen over de inzameling van afval, niet over de toepassing, en ontbreekt internationale handel. Daarom worden de gegevens van het KIDV aangevuld met CBS-data. Tabel B.2 bevat de optelsom van gedetailleerde data over het aanbod en gebruik van kunststofafval over een groot aantal bedrijfstakken.

Het totaalbeeld van aanbod en gebruik van kunststofafval uit tabel B.2 is incompleet. De onderstaande balans richt zich namelijk op kunststofafval dat geschikt is voor verwerking door recyclingbedrijven en houdt geen rekening met kunststof in het restafval of grof huishoudelijk afval. Ook valt huishoudelijk afval dat wordt ingevoerd voor energieteerugwinning, niet in de invoer, gezien de kleine omvang van de post *verbranding*.

Tabel B.2 Gescheiden kunststofafval en -recycling op basis van CBS-data, 2014

Aanbod	Mln kilogram (a)	Gebruik	Mln kilogram (a)
Huishoudens	147	Aangeboden aan recyclingbedrijven	661
Bedrijven	344	- recycling	617
Invoer	520	- verbranding/energieterugwinning	44
		Uitvoer	350
Totaal aanbod	1011	Totaal gebruik	1011

(a) Schoon en droog, dus gecorrigeerd voor aanhangend vuil en vocht.
Bron: berekeningen CPB op basis van CBS detaildata (2016).

Het aanbod van kunststofafval van huishoudens (147 mln kilogram) stemt overeen met de gegevens van Rijkswaterstaat uit de VANG-database (Van Afval Naar Grondstof), zie tabel B.3. Uit deze laatste bron blijkt dat het hier gaat om gescheiden ingezameld kunststofafval, inclusief PET-flessen, maar zonder kunststofafval uit nascheiding.

Uit de tabel blijkt dat een klein gedeelte (44 mln kilogram) van het kunststofafval dat wordt aangeboden aan recyclingbedrijven, alsnog wordt alsnog verbrand.³⁹ Verder valt op dat zowel de in- als uitvoer omvangrijk zijn. Een reden hiervoor kan zijn dat afvalverwerkingsbedrijven in Nederland een deel van het schoonmaken en sorteren van kunststofafval uitbesteden aan het buitenland. Hierna wordt het bewerkte afval in sommige gevallen weer ingevoerd voor verdere verwerking (Verbraecken, 2017).

RWS

In de combinatie van gegevens van KIDV en CBS ontbreekt nog een aantal gegevens. Hiervoor kunnen de gegevens van Rijkswaterstaat (2017) uitkomst bieden (zie tabel B.3). RWS heeft onderzocht hoeveel kunststofafval er in Nederland vrijkomt per doelgroep. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen drie bronnen van kunststofafval. Ten eerste, *gescheiden vrijgekomen kunststofafval* is het deel dat gescheiden wordt ingezameld. Voor de doelgroep consumenten omvat het gescheiden vrijgekomen kunststofafval 147 mln kilogram (zie ook tabel B.2). Ten tweede, *via bewerking en verwerking verkregen kunststofafval* ontstaat door middel van het opwerken van gemengde afvalstromen. Dit type kunststofafval kan bijvoorbeeld van

³⁹ De hoeveelheid afval aangeboden bij recyclingbedrijven is inclusief het kunststofafval dat tijdens het recyclingproces ontstaat.

autowrakken of afgedankte apparaten komen, een afvalstroom waar KIDV en het CBS geen gegevens over hebben. Ten derde, bij *verwerking via restafval/uitval* wordt het kunststofafval bedoeld dat huishoudens via het restafval weggooien.⁴⁰

Tabel B.3 laat zien dat naast consumenten het meeste kunststofafval afkomstig is uit de bouw, industrie en de sector handel, diensten en overheid. Binnen de industrie komt bijvoorbeeld het grootste deel van het kunststofafval vrij bij het maken van producten die samengesteld zijn uit kunststof, maar ook de productie van synthetisch rubber brengt kunststofafval met zich mee. Daarnaast is er een diverse stroom aan textiel waar kunststof in zit, maar nader onderzoek is nodig om het precieze aandeel kunststofvezels hierin te bepalen. Binnen handel, diensten en overheid komt kunststofafval vooral vrij via de kantoor-, winkel- en dienstensector (KWD) en middels het schoonmaken van openbare ruimten.

Tabel B.3 Kunststofafvalstromen per doelgroep op basis van informatie RWS, 2014

	Mln kilogram
Consumenten	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	147
Via bewerking en verwerking verkregen kunststofafval	104
Verwerking via restafval/uitval (incl. aanhangend vocht en vuil)	540
Verkeer en vervoer	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	5
Via bewerking en verwerking verkregen kunststofafvalstromen	20-25
Landbouw, bosbouw & visserij	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	20
Bouw	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	27
Via bewerking en verwerking verkregen kunststofafvalstromen	200-280
Energievoorziening	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	3
Industrie	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	141
Handel, diensten & Overheid	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	115
Verwerking via restafval/uitval	190-380
Totaal per type inzameling	
Gescheiden vrijgekomen kunststofafval	458
Via bewerking en verwerking verkregen kunststofafval	324-409
Verwerking via restafval/uitval	730-920
Totaal	1512-1787

Bron: RWS (2017).

In tabel B.4 wordt de informatie van RWS over het kunststofafval van consumenten uitgewerkt. Het gescheiden kunststofafval van consumenten bestaat voor het grootste deel uit verpakkingen (131 mln kilogram). Dit is de laatste jaren toegenomen, omdat gescheiden inzamelen en nascheiding wordt gestimuleerd. Het via bewerking en verwerking vrijgekomen kunststofafval bestaat uit afgedankte elektrische en elektronische apparatuur, en textiel (bij elkaar 104 mln kilogram). Deze stromen komen ook voor in de verwerking via restafval/uitval, omdat een relatief

⁴⁰ De post *verwerking via restafval/uitval* op basis van RWS-gegevens (tabel B.3) verschilt aanzienlijk met de vergelijkbare post gebaseerd op KIDV-gegevens (tabel B.3). De oorzaak van dit verschil is onbekend, maar laat opnieuw zien dat het lastig is om een eenduidig beeld te krijgen van de omvang van de kunststofproblematiek.

groot deel niet wordt gescheiden (bij elkaar 92 mln kilogram). De laatste post in tabel B.4 werkt deze verwerking via restafval/uitval verder uit aan de hand van een opsplitsing tussen huishoudelijk restafval (475 mln kilogram) en een reststroom grof huishoudelijk afval (65 mln kilogram). RWS hanteert hierbij een schatting van het percentage kunststof in huishoudelijk restafval van circa 14 procent. Ondanks dat bij milieustraten het grootste deel van het aangeleverde afval wordt gescheiden, ontstaat er toch vaak een beperkte reststroom en hiervan bestaat naar schatting ongeveer 18 procent uit kunststofafval.

Tabel B.4 Bronnen kunststofafval consumenten op basis van informatie RWS, 2014

	Mln kilogram
Consumenten	
<i>Gescheiden vrijgekomen kunststofafval</i>	147
- Waarvan verpakkingen	131
- Overige (harde) kunststoffen	16
<i>Via bewerking en verwerking verkregen kunststofafval</i>	104
- Afdankte elektrische en elektronische apparatuur	70
- Textiel	34
<i>Verwerking via restafval/uitval</i>	540
Huishoudelijk restafval	
- Waarvan verpakkingen	206
- Niet-verpakkingen	177
- Kunststof uit afdankte elektrische en elektronische apparatuur	12
- Kunststof uit textiel	80
Reststroom grof huishoudelijk afval	65
Bron: RWS (2017).	

De informatie van RWS geeft meer inzicht in de verschillende bronnen van het kunststofafval, maar nog steeds is er sprake van hiaten en onzekerheden. De cijfers van het via bewerking en verwerking vrijgekomen kunststofafval zijn bijvoorbeeld gebaseerd op diverse aannames. Ook worden in bovenstaande data de kunststofhoudende stromen zoals matrassen en vloerbedekking niet meegenomen. Daarnaast is meer onderzoek nodig om grip te krijgen op de hoeveelheid (kunststof in) textiel: over de textielstroom vanuit bedrijven is bijvoorbeeld weinig bekend. In het algemeen geldt eveneens dat de informatie over kunststofafval van consumenten doorgaans vrij gedetailleerd is, maar dat er over het kunststofafval van sommige bedrijfssectoren veel minder bekend is, terwijl het naar verwachting soms om substantiële hoeveelheden gaat.

Referenties

Aalbers, R., 2016a, Een verkennend onderzoek naar de haalbaarheid en wenselijkheid van doelstellingen met betrekking tot recycling en preventie van huishoudelijk afval, CPB Notitie, 24 april. ([link](#))

Aalbers, R. T. van der Pol en G. Romijn, 2016b, Groene groei en welvaart: een conceptueel denkkader, CPB Notitie, 3 mei. ([link](#))

Aalbers R., G. Renes en G. Romijn, 2016, WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO₂-uitstoot in MKBA's, CPB.

Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, D. Hemous, 2012, The environment and directed technical change, *American Economic Review* 102 (1), pp. 131-166.

Afvalfonds Verpakkingen, 2016, Verpakkingen in de circulaire economie; Recycling verpakkingen Nederland 2015, Afvalfonds Verpakkingen. ([link](#))

American Chemistry Council, 2015, The rising competitive advantage of U.S. plastics. American Chemistry Council Statistics Department.

André, F.J. en E. Cerdá, 2006, On the dynamics of recycling and natural resources, *Environmental and Resource Economics*, vol. 33: 199-221.

Asche, F., O. Gjølberg en T. Völker, 2003, Price relationships in the petroleum market: an analysis of crude oil and refined product prices, *Energy Economics*, vol. 25(3): 289-301.

AVR, 2017, <http://www.avr.nl/nl/de-resultaten-van-ons-proces>.

Bastein, T., E. Roelofs, E. Rietveld en A. Hoogendoorn, 2013, Kansen voor de circulaire economie in Nederland, Delft: TNO.

Baumeister, C. en L. Kilian, 2016, Forty years of oil price fluctuations: why the price of oil may still surprise us, *The Journal of Economic Perspectives*, vol. 30(1): 139-160.

Bijleveld, M., G. Bergsma, S. Nusselder, 2016, Circulaire economie: een belangrijk instrument voor CO₂-reductie, Delft: CE Delft.

Biobased Press, 2015, <http://www.biobasedpress.eu/nl/2015/05/biologisch-afbreekbaar-of-biobased-een-lopemde-discussie/>

Biron, M., 2012, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, Oxford: William Andrew.

BP, 2016a, *Statistical review of world energy 2016*, Londen: British Petroleum plc.

BP, 2016b, *World energy outlook 2016*, Londen: British Petroleum plc.

Brug, M. aan de (2016), Dit plastic kan ook weer aardolie worden, *NRC* 21 juni.

Bruijn, S. de, S. Ahdour, M. Bijleveld, L. de Graaff, A. Schroten en R. Vergeer, 2016, Handboek milieuprijzen 2016; Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts, Delft: CE Delft.

Buijze, G., 2016, Kunststofketen kan en moet beter, *Vakblad Afval*, mei.

CE Delft, 2016, Circulaire economie: een belangrijk instrument voor CO₂-reductie, Delft.

CE Delft, 2017a, Kosten en effecten van statiegeld op kleine flesjes en blikjes, Delft.

CE Delft, 2017b, Handboek Milieuprijzen 2017: Methodische onderbouwing van kengetallen gebruikt voor waardering van emissies en milieu-impacts, Delft.

CE Delft, I. Odegard et al, 2017, Biobased plastics in a circular economy Policy suggestions for biobased and biodegradable plastics, Delft.

CPB en PBL, 2015, Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Klimaat en Energie, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving en Centraal Planbureau.

CPB en PBL, 2016, Goederenvervoer en Zeehavens. WLO – Welvaart en Leefomgeving, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving. ([link](#))

CPB en PBL, 2016, Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Achtergrondstudie Klimaat en Energie, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving en Centraal Planbureau. ([link](#))

Cust, J., en S. Poelhekke, 2015, The local economic impacts of natural resource extraction, *Annual Review of Resource Economics*, vol. 7(1): 251-268.

Delahaye, R. en K. Baldé, 2016, Circulaire economie in Nederland, Den Haag: CBS.

Dixit, A, en R. Pindyck, 1994, *Investment under uncertainty*, Princeton University Press.

Donders, J., M. van Dijk en G. Romijn, 2010, Hervorming van het Nederlandse woonbeleid, Den Haag: Centraal Planbureau. ([link](#))

ECN, 2016, nationale Energieverkenning, Energie centrum Nederland.

EIA, 2014, High value of liquids drives U.S. producers to target wet natural gas resources, EIA Today in Energy, 9 mei. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=16191>.

EIA, 2016, Short-term outlook for hydrocarbon gas liquids – March 2016, Washington: EIA.

EIA, 2017, <http://www.eia.gov/>.

Ellen McArthur Foundation, 2016, The new Plastics Economy, Rethinking the future of plastics.

Enerdata, 2016, Global energy statistical yearbook 2016, <https://yearbook.enerdata.net/>.

EPA, 2016, State of the Science White Paper. A Summary of Literature on the Chemical Toxicity of Plastics Pollution to Aquatic Life and Aquatic-Dependent Wildlife, United States Environmental Protection Agency, Washington, Verenigde Staten. ([link](#))

European Bioplastics, 2017, Bioplastic market data 2016, Global production capacities of bioplastic 2016-2021. ([link](#))

European Bioplastics en Nova Institute, 2016, Bio-based Building Blocks and Polymers Global Capacities and Trends 2016 – 2021.

Europese Commissie, 2014, Petrochemical outlook – Challenges and opportunities, <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/OPEC%20presentation.pdf>.

Europese Commissie, 2015, Closing the loop - An EU action plan for the circular economy, Brussel: Europese Commissie.

European Parliament DG for Internal Policies Policy Department Economics and Scientific policy, 2011, Impacts of shale gas and shale oil extraction on the environment and on human health.

EUROSTAT, Price developments and foreign trade of plastic waste EU-28, <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/351919/websheet-plastic.pdf>

Faculty of the Worcester Polytechnic Institute (WPI), 2009, Assessment of the Impacts of Bioplastics: Energy Usage, Fossil Fuel Usage, Pollution, Health Effects, Effects on Food Supply and Economic Effects Compared to Petroleum Based Plastics.

Fattouh, B. en C. Brown, 2014, US NGLs production and steam cracker substitution: what will the spillover effects be in global petrochemical markets? Oxford Energy Comment, September.

Franeker, J.A. van en K.L. Law, 2015, Seabirds, gyres and global trends in plastic pollution, *Environmental Pollution*, vol. 203: 89-96.

Franeker, J.A., S. Kühn en E.L. Bravo Rebolledo, 2016, Fulmar Litter EcoQO monitoring in the Netherlands - Update 2015, Wageningen Marine Research Report C091.

GasTerra, 2017, *Wat is aardgas?*, <http://www.gasterra.nl/over-gasterra/wat-is-aardgas>.

Geyer, R., J.R. Jambeck en K.L. Law, 2017, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances*, 3: e1700782. ([link](#))

Gradus, R.H.J.M. *et al.*, 2017, A Cost-effectiveness analysis for incineration of recycling of Dutch household plastic waste, *Ecological Economic*, vol. 135(2017): 22-28.

Hamilton, J.D., 2008, Understanding crude oil prices, NBER Working Paper 14492.

Hamilton, James D., 2008, Oil and the macro economy, in: *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Second Edition. Eds. Steven N. Durlauf and Lawrence E. Blume. Palgrave Macmillan, 2008. The New Palgrave Dictionary of Economics Online. Palgrave Macmillan. 06 April 2017 <http://www.dictionaryofeconomics.com/article?id=pde2008_E000233> doi:10.1057/9780230226203.1215

Henckens, M.L.C.M., 2016, Managing raw materials scarcity: safeguarding the availability of geologically scarce mineral resources for future generations, Proefschrift Utrecht University.

Hotelling, H., 1931, The economics of exhaustible resources, *Journal of political economy*, vol. 39(2): 137-175. ([link](#))

IEA, 2016, Key world energy statistics, Parijs: International Energy Agency.

IEA, 2017, IEA World Energy Statistics and Balances, <http://stats.oecd.org/>.

Jiménez-Rodríguez, R. en M. Sánchez, 2005, Oil price shocks and real GDP growth: empirical evidence for some OECD countries, *Applied Economics*, vol. 37: 201-228.

Kaufmann, R.K., S. Dees, P. Karadeloglou en M. Sánchez, 2004, Does OPEC matter? An econometric analysis of oil prices, *The Energy Journal*, vol. 25(4): 67-90.

KIDV en Natuur & Milieu, 2016, Factcheck plastic recycling, Den Haag: KIDV en Natuur & Milieu.

KIDV, 2015, Minder tasjes, duurzaam (her)gebruik en goed gedrag, Kennisinstituut Duurzaam Verpakken.

KIDV, 2014a, Factsheet kunststof verpakkingen 1: Introductie, Kennisinstituut Duurzaam Verpakken.

KIDV, 2017, Rapportage kunststofketenproject Interventies om de kunststofketen verder te sluiten, qua grondstoffen en economisch, Kennisinstituut Duurzaam Verpakken, Den Haag.

Kilian, L., 2009, Oot all oil price shocks are alike: disentangling demand and supply shocks in the crude oil market, *American Economic Review*, vol. 99(3): 1053-1069.

KplusV, 2015, Kosten en omvang zwerfafval.

- Kwon, H., B. Lyu, K. Tak, J. Lee, J.H. Cho en I. Moon, 2016, Optimization of naphtha purchase price using a price prediction model, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 84: 226-236.
- Lei, Y.H. en G. Michaels, 2014, Do giant oilfield discoveries fuel internal armed conflicts? *Journal of Development Economics*, vol. 110: 139-157.
- Mc Glade C. en P. Ekins, 2015, The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C, *Nature*, vol. 517(7533): 187-190.
- Masih, M., I. Algahtani en L. De Mello, 2010, Price dynamics of crude oil and the regional ethylene markets, *Energy Economics*, vol. 32(6): 1435-1444.
- Ministerie van Economische Zaken, 2016, Delfstoffen en aardwarmte in Nederland; Jaarverslag 2015, Den Haag.
- Ministeries Infrastructuur en Milieu en Economische Zaken, 2016, Rijksbrede Programma *Nederland Circulair in 2050*.
- Neher, P., 1990, *Natural resource economics; Conservation and exploitation*, Cambridge: Cambridge University Press.
- <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/wat-gebeurt-er-met-ingezameld-plastic>
- Noailly, J. en V. Shestalova, 2013, Kennispillovers van duurzame energietechnologieën, lessen op basis van patentverwijzingen, CPB.
- Notten, F., S. Brummelkamp en M. van Rossum, 2016, *Oliestromen in de Nederlandse economie*, Den Haag: CBS. ([link](#))
- NRK recycling, 2015, *Kunststof recyclingindustrie in Nederland*, <http://www.nrkrecycling.nl/recycling/publicaties/>
- Nysveen, 2016, *United States now holds more oil reserves than Saudi Arabia*, Oslo: Rystad Energy. <http://www.rystadenergy.com/NewsEvents/PressReleases/united-states-now-holds-more-oil-reserves-than-saudi-arabia>.
- Nova Institute, M. Carus, 2017, Biobased economy and climate change- important links, pitfalls and opportunities, prepared for the UN Food and Agricultural Organization (FAO).
- OPEC, 2016, *World oil outlook 2016*, Wenen: Organisatie voor Petroleumexporterende Landen.
- Pindyck, R.S., 1999, The long-run evolution of energy prices, *The Energy Journal*, vol. 20(2): 1-27.

Plastics Europe, 2016, Plastics – the Facts 2016. An analysis of European plastics production, demand and waste data.

Plastics Europe, 2017a, Types and categories of plastics, <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148.aspx>

Plastics Europe, 2017b, <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/how-plastic-is-made.aspx>.

Ploeg, F. van der, 2011, Natural resources: Curse or blessing? *Journal of Economic Literature*, vol. 49(2): 366-420.

Pol-de Jongh, L.A. van de, K. Keller en R. Delahaye, 2016, Material Flow Monitor Time series 2008-2014, Den Haag: Centraal Bureau voor de Statistiek.

Rabobank, 2016, Rabobank cijfers en trends kunststofverwerkende industrie, <https://www.rabobankcijfersentrends.nl/>

RCPE, 2016, Nederland Circulair in 2050, Rijksbreed Programma Circulaire Economie, Den Haag.

Reynolds, D.B., 1999, The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity, *Ecological Economics*, vol. 31: 155-166.

RIVM, A. Schoor et al., 2014, Inventarisatie en prioritering van bronnen en emissies van microplastics, Bilthoven.

Rochman, C.M., M.A. Browne, A.J. Underwood, J.A. van Franeker, R.C. Thompson, L.A. Amaral-Zettler, 2016, The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived. *Ecology*, vol. 97(2): 302-312.

Romijn, G., 2000, Economic dynamics in Dutch construction, Tinbergen Institute Research Series 228, Thela Thesis.

Romijn, G. en G. Renes, 2013, Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse, Den Haag: CPB en PBL.

Rood, T. en A. Hanemaaijer, 2016, Grondstof voor de circulaire economie, Den Haag: PBL.

Rli, 2015, Circulaire economie; Van wens naar uitvoering, Den Haag: Rli.

Salant, S., 1976, Exhaustible Resources and Industrial Structure: A Nash-Cournot Approach to the World Oil Market, *Journal of Political Economy*, vol. 84(5): 1079-93. ([link](#))

SER, 2016, Werken aan een circulaire economie: geen tijd te verliezen, Den Haag: SER.

- Schoots, K., M. Hekkenberg en P. Hammingh, 2016, Nationale Energieverkenning 2016, Den Haag: ECN, PBL, CBS en RVO. ([link](#))
- Schut, E., M. Crielaard en M. Mesman, 2015, Beleidsverkenning circulaire economie in de bouw; Een perspectief voor de markt en overheid, Den Haag/Bilthoven: RWS en RIVM.
- Shen, L. et al., 2011, Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: change-oriented effects, *International Journal Life Cycle Assess*, vol. 16: 522-536.
- Singh, N., D. Hui, R. Singh, I.P.S. Ahuja, L. Feo en F. Fraternali, 2016, Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>.
- C. Speksnijder, Plasticsoep in Noordelijke Ijszee in De Volkskrant 20 april 2017.
- Stegeman, H., 2015, De potentie van de circulaire economie, Utrecht: Rabobank.
- Studiegroep Duurzame Groei, 2016, Kiezen voor duurzame groei.
- Teulings, C.N., A.L. Bovenberg & H.P. van Dalen, 2003, De calculus van het publieke belang, Den Haag, kenniscentrum voor ordeningsvraagstukken.
- Teulings C.N., L.A. Bovenberg & H. van Dalen 2005, *De Cirkel van goede intenties, de economie van het publieke belang*, Amsterdam University Press.
- Tirole, J., 1988, *The Theory of Industrial Organization*, MIT Press.
- TNO, 2015, Doortastend LCA-studie van draagtassen
- TNO, CE Delft, 2015, Milieueffectenanalyse van de Raamovereenkomst Verpakkingen.
- TNO, 2017, Ex-ante evaluatie van het Rijksbrede Programma Circulaire Economie - concept, TNO, Delft.
- Tsui, K.K., 2011, More oil, less democracy: evidence from worldwide crude oil discoveries, *The Economic Journal*, vol. 121(551): 89-115.
- Varian, H., 1992, *Microeconomics analysis*, 3rd ed., WW Norton & Company.
- Verbraecken, H., 2017, De Plastic Route: van haring-cellofaantje tot bermpaaltje, het *Financieele Dagblad*, 10 januari.
- Vereniging Afvalbedrijven, 2016, Reststoffen verbranding afval, biomassa, slib 2015, nieuwbericht: 15 november 2016. ([link](#))

Verrips, A.S., R.F.T. Aalbers en F.H. Huizinga, 2013, KBA Structuurvisie 6000 MW Windenergie op land, achtergrondinformatie, CPB.

Vicente, P.C., 2010, Does oil corrupt? Evidence from a natural experiment in West Africa, *Journal of Development Economics*, vol. 92(1): 28-38.

Wageningen UR, H. Bos et al, 2013, Duurzaamheid van biobased producten uit plantaardige olie, Wageningen.

Van den Oever, M., K. Molenveld, M. van der Zee en H. Bos, 2017, Bio-based and biodegradable plastic – Facts and figures. Focus on food packaging in the Netherlands, Wageningen Food & Biobased Research, rapport nr. 1722. ([link](#))

Werkgroep Duurzaamheid, 2016, Rapport Werkgroep Duurzaamheid ten behoeve van de Studiegroep Duurzame Groei.

Weinstein, M.C. en Zeckhauser, R.J., 1975, The optimal consumption of depletable natural resources, *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 89(3): 371-392.

WPI, 2009, Assessment of the Impacts of Bioplastics: Energy Usage, Fossil Fuel Usage, Pollution, Health Effects, Effects on the Food Supply, and Economic Effects Compared to Petroleum Based Plastics. Worcester Polytechnic Institute. ([link](#))

Dit is een uitgave van:

Centraal Planbureau
Bezuidenhoutseweg 30
Postbus 80510 | 2508 GM Den Haag
T (088) 984 60 00

info@cpb.nl | www.cpb.nl

September 2017