



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Inventarisatie **effecten** voor mens en milieu vanwege export van **kunststofafval** **en afgedankt textiel**

**Inventarisatie effecten voor mens en milieu
vanwege export van kunststofafval en
afgedankt textiel**

RIVM-briefrapport 2025-0077

Colofon

© RIVM 2026

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2025-0077

K. Herrema (auteur), RIVM
L.M. de Boer (auteur), RIVM
F. Heens (auteur), RIVM

Contact:
Kyra Herrema
Centrum Veiligheid
kyra.herrema@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van ILT in het kader van Kader van het programma Afval

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Inventarisatie effecten voor mens en milieu vanwege export van kunststofafval en afgedankt textiel

Nederland exporteert veel kunststofafval en textiel dat niet meer wordt gebruikt naar landen buiten Europa voor hergebruik of recycling. In Nederland gelden regels om dit afval voor mens en milieu veilig te verwerken. Buiten Europa is hier minder aandacht voor en kan het in de open lucht worden verbrand of in het milieu worden gedumpt.

Het RIVM heeft op een rij gezet wat bekend is over mogelijke schadelijke effecten voor mens en milieu van ongecontroleerde verwerking van afval. Hierbij is gekeken naar kunststoffen, inclusief de kunststoffen in textiel. De Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) kan deze informatie gebruiken bij het toezicht op het beheer en de verwerking van afval.

De schadelijke effecten hangen onder andere af van de samenstelling van het afval, hoeveel stoffen er vrijkomen en hoe gevaarlijk deze stoffen zijn. Daarom zijn er veel gegevens nodig om de effecten te kunnen bepalen. Het RIVM maakte hiervoor eerst een overzicht van de soorten kunststoffen en de stoffen die in het afval kunnen zitten. Denk aan stoffen die bewust worden toegevoegd om de eigenschappen van een product te verbeteren.

Daarna bracht het RIVM in kaart welke gevaarlijke stoffen vrijkomen als kunststoffen en textiel worden verbrand en gestort. Bij verbranding kunnen onder andere fijnstof, polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) en dioxinen in het milieu terechtkomen. Als kunststoffen en textiel als afval worden gedumpt, kunnen bijvoorbeeld weekmakers uit kunststof in de omgeving belanden. Zowel bij verbranding als bij ongecontroleerde dump kunnen schadelijke gassen worden uitgestoten en zich verspreiden.

Ten slotte zijn de gevaarseigenschappen onderzocht van de stoffen die kunnen vrijkomen bij verbranding, of na de dump naar het grondwater weglekken. Deze stoffen blijken onder andere kankerverwekkend, schadelijk voor het oppervlaktewater en/of hormoonverstorend te zijn. Ook breken veel stoffen niet af, waardoor ze in het milieu blijven.

De gevaarlijke stoffen komen vooral lokaal vrij, dicht bij de plek van verbranding of dump. De schadelijke effecten voor mens en milieu kunnen daar het grootst zijn.

Het RIVM gebruikte voor dit onderzoek informatie uit wetenschappelijke literatuur.

Kernwoorden: kunststof- en textielafval, verbranding, storten, gevaarseigenschappen, prioritaire stofgroepen

Synopsis

Survey of effects on human health and the environment caused by the export of plastic waste and discarded textiles

The Netherlands exports large quantities of plastic waste and discarded textiles to countries outside Europe for reuse or recycling. The Netherlands has rules for the processing of said waste to make it safe for humans and the environment. As there is less attention for safe processing in countries outside of Europe, this could result in the waste being burnt in the open air or dumped into the environment.

RIVM has mapped the potential harmful effects of uncontrolled processing of waste on humans and the environment. The focus is on plastics, including those in textiles. The Human Environment and Transport Inspectorate can use this information when supervising waste management and processing.

The effects depend – among other things – on the composition of the waste, the quantity of substances released and the hazardous nature of these substances. For this reason, a wealth of data is needed to determine the effects. RIVM first made an overview of the types of plastics and the substances possibly contained in the waste. These can include substances deliberately added to enhance the properties of a product.

In addition, RIVM identified the hazardous substances released when plastics and textiles are burnt and dumped. Burning may release particulate matter (PM), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and dioxins into the environment. When plastics and textiles are dumped as waste, agents including plasticisers from plastics may end up in the environment. Both burning and uncontrolled dumping may cause harmful gasses to be emitted and dispersed.

Lastly, RIVM examined the hazardous properties of the substances that could be released when burnt, or leak into the groundwater after being dumped. These substances turn out to be carcinogenic, harmful to surface water, have endocrine-disrupting properties and/or have other effects. Many substances also do not decompose, causing them to remain in the environment.

The hazardous substances are mainly released locally, close to the burning or dumping site. This is where the most harmful effects to humans and the environment are to be expected.

The RIVM used information from scientific literature for this research.

Keywords: plastic waste and discarded textiles, burning, dumping, hazardous properties, priority substance groups

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1	Inleiding — 13
1.1	Vraagstelling — 13
1.2	Doel van het onderzoek — 13
1.3	Context — 13
1.3.1	Toename in kunststofafval en afgedankt textiel — 13
1.3.2	Export van kunststofafval vanuit Nederland — 14
1.3.3	Export van afgedankt textiel vanuit Nederland — 15
1.4	Leeswijzer — 16
2	Aanpak onderzoek — 17
2.1	Onderzoeksvragen — 17
2.2	Werkwijze — 18
2.2.1	Werkwijze inventarisatie samenstelling kunststofafval en afgedankt textiel — 19
2.2.2	Werkwijze vrijkomen en verspreiden van stoffen bij verbranden kunststofafval in open lucht — 19
2.2.3	Werkwijze vrijkomen en verspreiden van stoffen bij storten kunststofafval — 19
2.2.4	Werkwijze effecten van vrijgekomen stoffen — 20
2.3	Afbakening — 20
3	Samenstelling van kunststoffen en synthetisch textiel — 21
3.1	Samenstelling van geëxporteerd kunststofafval — 22
3.1.1	Soorten kunststoffen — 22
3.1.2	Kunststofproducten — 23
3.2	Chemische stoffen in kunststoffen — 26
3.2.1	Additieven toegepast in kunststof — 26
3.2.2	Vervuilingen in kunststof — 28
3.3	Wetgeving — 28
3.4	Inventarisaties van stoffen in kunststoffen — 30
3.5	Samenvattende conclusie stoffen in kunststof en textiel — 33
4	Vrijkomen en verspreiden van stoffen bij verbranding van kunststoffen — 39
4.1	Introductie - verbranding in de open lucht — 39
4.2	Vrijkomen van gevaarlijke stoffen — 40
4.2.1	Metingen bij branden — 40
4.2.2	Zuivere kunststofbranden — 42
4.2.3	Totaaloverzicht vrijkomende stoffen bij branden — 44
4.3	Verspreiding van gevaarlijke stoffen — 47
5	Vrijkomen en verspreiden van stoffen bij storten van kunststoffen — 49
5.1	Introductie - storten van kunststoffen — 49
5.1.1	Afbraakprocessen — 49
5.1.2	Blootstellingsroutes van stoffen als gevolg van het storten van kunststoffen — 50
5.2	Vrijkomen van additieven door uitloging naar percolaat — 51

- 5.3 Verspreiding van stoffen uit percolaat — 54
- 5.4 Vrijkomen van stortplaatsgassen — 56
- 5.5 Verspreiding aan stortplaatsgassen — 57
- 5.6 Totaaloverzicht vrijkomende stoffen bij storten — 57

6 Gevaarseigenschappen van vrijgekomen stoffen op mens en milieu — 61

- 6.1 Effecten voor mens — 61
 - 6.1.1 Inademing — 61
 - 6.1.2 Direct contact percolaat en verontreinigde grond — 63
 - 6.1.3 Indirecte inname — 64
- 6.2 Effecten voor milieu — 64
 - 6.2.1 Bodem en gewassen — 65
 - 6.2.2 Water — 65

7 Overzicht per kunststofsoort — 67

8 Conclusie en discussie — 73

- 8.1 Conclusie per onderzoeksvraag — 73
- 8.2 Discussie — 77
 - 8.2.1 Scope onderzoek — 77
 - 8.2.2 Beschikbaarheid informatie — 77
 - 8.2.3 Effecten van gemengde stromen — 77
 - 8.2.4 Onzekerheden en variabelen — 78

Literatuur — 79

Afkortingenlijst — 87

Samenvatting

In het kader van het programma 'Afval', heeft de ILT^a het RIVM gevraagd om de beschikbare kennis over milieu- en gezondheidseffecten als gevolg van onbeheerd storten en verbranden van geëxporteerd kunststofafval en afgedankt textiel in kaart te brengen. De grootschalige groei in kunststof- en textielproductie wereldwijd, leidt ook tot een toenemende hoeveelheid afval. In Nederland en andere Europese landen wordt dit afval veelal gerecycled of verbrand in speciale afvalverbrandingsinstallaties met energierugwinning. Daarnaast exporteren Nederland en andere EU-lidstaten veel kunststofafval en afgedankt textiel voor bijvoorbeeld recycling of de tweedehands markt. Het is echter een uitdaging om volledig grip te hebben op de afvalverwerkingspraktijk in landen buiten Europa. Het is mogelijk dat dit afval niet veilig en niet milieuverantwoord verwerkt wordt, bijvoorbeeld door ongecontroleerd storten of in de open lucht verbranden.

In dit literatuuronderzoek zijn de effecten voor mens en milieu, als gevolg van het ongecontroleerd storten en verbranden van kunststofafval en afgedankt textiel, geïnventariseerd. Daarbij richt het onderzoek zich op de meest gebruikte polymeren in kunststoffen en textiel zoals PE, PP, PVC, PET, PU(R), PS, PA, PU en PAN. Zo worden verschillende kunststofpolymeren toegepast als verpakkingsmateriaal (bv. PE, PET, PP), in de bouw (bv. PS en PVC) en als synthetische textielvezels, zoals polyester (PET), nylon (PA), acryl (PAN) en elastaan (PU). In dit onderzoek is ervoor gekozen de scope breed te houden en naast deze kunststofpolymeren ook ABS, PC, POM en PMMA mee te nemen. Additieven worden aan de kunststofpolymeren toegevoegd om het materiaal bepaalde eigenschappen te geven. Daarnaast is het mogelijk dat stoffen, die uit de productie achterblijven of tijdens de productie zijn gevormd, in het kunststofpolymeer blijven zitten. Er is in dit rapport een overzicht gegeven van deze stoffen die per polymeersoort zijn aangetoond. De gevaarseigenschappen van deze additieven, zoals kankerverwekkend, hormoonversturend en schadelijk voor het aquatische milieu, zijn in kaart gebracht. Veel van deze stoffen zijn persistent, waardoor ze niet afbreken in het milieu.

De belangrijkste stoffen die vrij komen bij het verbranden van kunststofpolymeren zijn (naast CO₂, CO en roetdeeltjes), fijnstof, PAK, VOS en aromatische koolwaterstoffen. Daarnaast kunnen per type kunststofpolymeer additionele stoffen vrijkomen. Zo is bij het verbranden van chloorhoudende kunststofpolymeren, zoals PVC, aangetoond dat dioxinen, PCB's, chloorwaterstof en gechlloreerde VOS vrijkomen. HCN, NO_x, N₂O, NH₃, amino-PAK en isocyanaten kunnen vrijkomen uit stikstofhoudende polymeren, zoals PU(R), ABS, PAN en PA, en aldehyden, alcoholen en furanen uit zuurstofhoudende polymeren, zoals PET, PC, POM en PMMA. Additieven kunnen ook leiden tot het vrijkomen van stoffen, hierbij zijn bestanddelen zoals halogeen of metaal van belang. Deze stoffen zijn onder andere diverse metalen en hun verbindingen zoals metaaloxides. Te noemen zijn titanium, barium,

^a Zie afkortingenlijst voor alle afkortingen

cadmium en antimoon, gechloreerde-, gebromeerde-, gefluoreerde-verbindingen, ftalaten en fosgenen. De mate waarin deze stoffen vrijkomen, hangt niet alleen af van het verbrande materiaal, maar voor een groot deel ook van de brandeigenschappen, zoals het smelproces en de stijging van de rookpluim. Relevante variabelen bij een brand zijn onder andere snelheid van ontbranden, temperatuurontwikkeling, brandstof, zuurstofgehalte en weersomstandigheden. De verspreiding van stoffen vindt plaats als gassen naar de lucht en als vaste deeltjes in de lucht die neerslaan op de bodem. Over het algemeen is deze verspreiding van stoffen als gas of vaste deeltjes relatief lokaal (tot 1 km van de brand). Ook kunnen stoffen in de as van de brand achterblijven en kan de as verspreid worden in het milieu.

Naast microplastics is bekend dat gevaarlijke stoffen, zoals bisfenolen, ftalaten, metalen, PCB's en PBDE's kunnen uitlogen uit kunststoffen in het percolaat^b van stortplaatsen. Het percolaat zorgt voor een directe blootstelling van de bodem en kan zich verspreiden naar het grondwater. Via het grondwater en de bodem kunnen de stoffen in de voedselketen terecht komen. De mate van verspreiding hangt onder andere af van hoe goed de stoffen afbreken en hechten aan de bodem. Het is bekend dat stoffen vrij kunnen komen als gassen uit het afval. Dit zijn onder andere VOS en vinylchloride. Tevens kunnen PCB's en PBDE's, zowel als gas (bij hoge temperaturen), als gebonden aan fijnstof vrijkomen. Net als bij verbranding hangt de mate van verspreiding af van de weersomstandigheden en is de concentratie van stoffen het hoogst dichtbij de bron. Op open dumpplaatsen (bijvoorbeeld langs oevers en stranden) zullen naar verwachting grotendeels dezelfde processen plaatsvinden als op stortplaatsen. De omstandigheden kunnen op deze plaatsen anders zijn (bijvoorbeeld andere temperatuur, meer contact met oppervlaktewater), waardoor de afbraakprocessen beïnvloed worden.

De stoffen, die vrijkomen na verbranden of storten, kunnen schadelijk zijn voor het (aquatische) milieu en/of voor de mens. Ze zijn onder andere kankerverwekkend en hormoonverstoring. Mens en milieu kunnen op verschillende manieren worden blootgesteld aan deze stoffen. Zo is inademing van de gassen de meest directe blootstellingsroute. Daarnaast kan er ook depositie op gewassen of in water plaatsvinden, wat kan leiden tot blootstelling. Wanneer stoffen uitlogen kan met name de bodem en het grondwater vervuild raken. Ook de assen van verbrande materialen kunnen terecht komen op gewassen. Deze stoffen in de bodem, op gewassen en in het (grond)water kunnen worden opgenomen door gewassen of dieren en daardoor onderdeel worden van de voedselketen.

Er zijn grote verschillen en onzekerheden in de stoffen die in verschillende soorten kunststoffen zijn toegepast. De beschikbare informatie hierover bestaat uit studies met een brede scope (geografisch en temporeel). Daardoor is niet bekend welke van de stoffen momenteel nog in, uit Nederland geëxporteerd, kunststofafval en afgedankt textiel zitten en in welke concentraties. Tevens is niet voor alle

^b Percolaat is vervuild water dat ontstaat wanneer regenwater door het afval in de stortplaats sijpelt en verontreinigende stoffen opneemt.

kunststofpolymeren en additieven gedegen onderzoek beschikbaar; van de meest toegepaste kunststofpolymeren (PET, PE, PP en PVC) is het meeste onderzoek beschikbaar.

Wetenschappelijke publicaties over de lokale effecten van open verbranding of ongecontroleerd storten van heterogeen kunststof- en textielafval zijn beperkt beschikbaar. In hoeverre de gevaarlijke stoffen die vrijkomen negatieve effecten hebben op mens of milieu is afhankelijk van de verspreiding en de blootstelling. De verspreiding is afhankelijk van stofeigenschappen en omgevingskenmerken. De blootstelling is tevens afhankelijk van de manier waarop mensen en dieren van de omgeving gebruikmaken. Dit rapport kijkt naar het verbranden en storten in het algemeen en niet op een specifieke locatie. Daarom is het vrijkomen, de verspreiding en de blootstelling niet kwantitatief te bepalen.

Op basis van de beschikbare informatie is een overzichtelijk kwalitatief beeld gegeven van gevaarlijke stoffen, die in kunststofafval en afgedankt textiel (kunnen) zitten en vrijkomen en verspreiden bij ongecontroleerde verbranding of storten en de mogelijke blootstellingsroutes hieraan.

1 Inleiding

1.1 Vraagstelling

De Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) heeft het RIVM gevraagd om de beschikbare kennis over milieu- en gezondheidseffecten als gevolg van (onbeheerd) storten en verbranden van geëxporteerd kunststofafval en afgedankt textiel^c in kaart te brengen. Deze opdracht komt voort uit het ILT-programma Afval.

Programma Afval

De ILT houdt toezicht op het beheer en de verwerking van afval in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W).[1] Daarbij richt de ILT haar toezicht en handhaving onder andere op maatschappelijk ongewenst handelen zoals milieu-criminele activiteiten, waarbij geld verdienen aan afval belangrijker is dan het voorkomen van ongewenste milieuschade. Hiervoor heeft de ILT een programma ontwikkeld, met de naam "Afval". Het doel van dit programma is om duurzaam handelen te stimuleren en bij te dragen aan het realiseren van een circulaire economie. Met dit programma investeert de ILT in het goed in kaart brengen van het systeem dat milieuschadelijk gedrag bevordert, dan wel in stand houdt. Daaronder valt bijvoorbeeld illegale export van afvalstromen. Ook onderzoekt de ILT de mogelijkheden om haar inspectietaken te versterken dan wel te verruimen. Het programma Afval zal onder meer nieuwe kennis verwerven over de mogelijkheden en belemmeringen om nieuwe handhavingsstrategieën in te zetten bij de verwerking van geëxporteerde afvalstoffen. In het programma worden afvalstromen van drie ketens onderzocht: kunststoffen, textiel en materialen voor de energietransitie (batterijen, windturbines, zonnepanelen).

1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is om de mogelijke toxicologische effecten voor mens en milieu door het exporteren van kunststofafval en afgedankt textiel vanuit Nederland te inventariseren. Hiervoor zal allereerst worden geïnventariseerd welke stoffen er aanwezig kunnen zijn in kunststofafval en afgedankt textiel. Vervolgens worden de stoffen die vrijkomen bij het verbranden, het storten en het lokaal dumpen van dit afval in kaart gebracht. Na het beschrijven van de verspreiding en blootstellingsroute zullen de gevaarseigenschappen van deze stoffen op mens en milieu worden onderzocht.

1.3 Context

1.3.1 *Toename in kunststofafval en afgedankt textiel*

Wereldwijd neemt de productie en het gebruik van kunststoffen flink toe. De afgelopen 20 jaar heeft er een verdubbeling plaatsgevonden en ook aankomende decennia wordt er groei verwacht. In 2023 is 413,8

^c Hoewel gebruikt textiel als 'afval' wordt beschouwd op het moment dat het wordt afgedankt (ook in aparte textielcontainers), wordt het verhandeld als handelswaar. Maar na inzameling en sortering verliest een aanzienlijk deel van het textiel zijn afvalstatus en wordt het als tweedehands product geclassificeerd. Vandaar dat we in dit rapport spreken van afgedankt textiel en niet van textielafval.

miljoen ton kunststoffen geproduceerd.[2] De verwachting is dat dit in 2060 is opgelopen tot 1,2 miljard ton.[3] Het grootschalige gebruik van kunststoffen leidt tot een grote en groeiende hoeveelheid kunststofafval. Kunststofafval wordt op dit moment wereldwijd op verschillende manieren verwerkt, namelijk gecontroleerd storten (49%), verbranden in speciale afvalverbrandingsinstallaties (19%) en recyclen (9%).[3, 4] De 23% die nog overblijft wordt niet milieuverantwoord verwerkt, door bijvoorbeeld ongecontroleerd dumpen, open verbranding of achterlaten in het milieu. Wereldwijd gaat dit om circa 34 megaton (Mton) aan kunststoffen in dumpplaatsen en wordt 26 Mton verbrand.[4] De verwachting is dat in de toekomst een groter aandeel van het afval gerecycled of gecontroleerd verbrand zal worden, echter omdat de totale afvalstroom flink zal stijgen, zal ook de hoeveelheid ongecontroleerde verwerking van afval hoog blijven.[5]

In Nederland wordt jaarlijks circa 6200 kiloton (kton) kunststof op de markt gebracht.[6] Toegepaste verwerkingsmethoden van kunststof- en textielafval in Nederland zijn hergebruik, recycling en verbranding met energierterugwinning. Daarnaast wordt een deel van het afval geëxporteerd voor hergebruik of recycling. Het is echter mogelijk dat geëxporteerde kunststoffen en textiel bestemd voor de tweedehandsverkoop in de bestemmingslanden alsnog verbrand wordt of gestort op beheerde^d of onbeheerde stortplaatsen, of in het milieu worden gedumpt.

Bij ongecontroleerde verbranding in de open lucht is^e, in tegenstelling tot afvalverbrandingsinstallaties, geen sprake van afvangen, filtering en zuivering van de ontstane gassen en deeltjes.[7] Dit leidt tot het vrijkomen van gevaarlijke stoffen die schadelijke effecten voor mens en milieu veroorzaken. Bij het storten of dumpen van kunststoffen en textiel kunnen gevaarlijke stoffen vrijkomen door uitloging en stortplaatsgassen.^f De verspreiding van stoffen die vrijkomen bij brand of storten kan leiden tot blootstelling van ecosystemen en directe of indirecte blootstelling van de mens aan deze stoffen. Hierdoor kunnen, afhankelijk van de mate van blootstelling, schadelijke effecten voor de leefomgeving en de gezondheid van lokale gemeenschappen optreden.

1.3.2 *Export van kunststofafval vanuit Nederland*

Nederland is één van de grootste exporteurs van kunststofafval ter wereld.[8, 9] Veel kunststof wordt via Nederland buiten de Europese Unie (EU) geëxporteerd.[10] Met de export van dit kunststofafval verdwijnt een in potentie belangrijke secundaire grondstof uit de Europese economie. Nederland en andere EU-lidstaten mogen alleen kunststofafval vrij verhandelen wanneer het kunststofafval schoon en gesorteerd is en geschikt om direct te recyclen.[11] Exporterende bedrijven zijn verplicht om gedetailleerd aan te geven hoe en waar het afval milieuverantwoord gerecycled wordt. Deze werkwijze moet voorkomen dat (Nederlands) kunststofafval illegaal of onverantwoord

^d Bij een beheerde stortplaatsen zijn voorzieningen getroffen om de verspreiding van stoffen naar het milieu te voorkomen en te monitoren.

^e Open lucht verbranding is dit rapport gedefinieerd als: het verbranden van materialen in de open lucht zonder dat de bijproducten, zoals emissies van gassen en as worden gemanaged.

^f Stortplaatsgassen zijn de gassen die uit een stortplaats vrijkomen. Deze gassen komen diffuus over de hele stortplaats vrij, maar er kunnen ook 'kanalen' ontstaan in het afval waardoor er puntbronnen of hotspots kunnen ontstaan.

terecht komt in landen met beperkte verwerkingscapaciteiten. Toch blijft het een uitdaging om volledig grip te hebben op de praktijk in landen buiten Europa.

In 2022 ging bijna 170 kton plastic afval van Nederland naar niet-Oeso-landen.[12] Zo ging er 86 kton naar Indonesië, 35 kton naar Vietnam en 33 kton naar Maleisië. Voor ruim 80 procent bestaat dit geëxporteerde afval uit foliemateriaal, dat goed recyclebaar is en kunststof dat van hoge kwaliteit is. In opdracht van de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) heeft de Douane in 2022 bijna 4.800 controles op afvalstoffen uitgevoerd, waarvan 13 procent bestond uit kunststofafval.

Daarnaast constateert de ILT dat Nederland veel kunststofafval importeert en vervolgens exporteert. De totale import naar Nederland was in 2022 ruim 1 Mton plasticafval, vooral uit België en Duitsland. [13] Voor die stromen is Nederland een doorvoerland. Een deel van dit kunststofafval blijft binnen de EU, maar ongeveer een kwart gaat naar landen buiten de EU.

Nederland en andere EU-landen exporteren op grote schaal kunststofafval vanwege onvoldoende recyclingcapaciteit in eigen land of lage verwerkingskosten in bestemmingslanden.[14] Volgens de ILT zijn er aanwijzingen voor criminele handelingen bij de handel in en export van laagwaardige kunststofafvalstromen.[14] Door het vervalsen van codes of documenten, het verbergen van afval achter een andere deklading of het omleiden van afvaltransporten via meerdere schakels of landen wordt het kunststofafval illegaal vervoerd en aan het zicht van de toezichthoudende instanties onttrokken. Er is een prikkel voor criminaliteit met kunststofafval als gevolg van het financiële model van verwerkers en handelaren. Zij ontvangen van de ontdoener van slecht recyclebaar afval namelijk tegelijk met het afval ook het geld. Met elke extra kostbare verwerkingsstap slinkt de winst, waardoor de stimulans ontstaat om het afval zo goedkoop mogelijk te verwerken of het kwijt te raken.

Per 21 november 2026 komt er een Europees verbod op de export van kunststofafval naar niet-OESO landen. Er is echter nog steeds een zorg dat ondanks het verbod, transporten naar niet-OESO landen plaats kunnen vinden.

1.3.3 *Export van afgedankt textiel vanuit Nederland*

Nederland is tevens één van de tien grootste exporteurs van gebruikte kleding ter wereld.[15] Ongeveer de helft van door Nederlandse consumenten afgedankte kleding belandt via het restafval in de verbrandingsoven. Ingezamelde kleding via bijvoorbeeld textielcontainers wordt gesorteerd. Het grootste deel hiervan is bestemd voor de tweedehandsmarkt in andere landen (54,2% in 2022).[15] Vanwege de complexiteit van de exportketens is er weinig zicht op wat er precies gebeurt met het textiel nadat het Nederland heeft verlaten. Niet alles wat wel herdraagbaar is bij export wordt in het land van bestemming ook daadwerkelijk verkocht als tweedehandskleding. Er is een groot risico dat onverkochte kledingstukken ongecontroleerd in het milieu terecht komen. Er zijn praktijken bekend, bijvoorbeeld rond tweedehandsmarkten in Ghana en Kenia, waarbij textiel informeel als

brandstof wordt gebruikt om pinda's te roosteren en water te verwarmen.[16, 17] Daarnaast wordt afval gestort op lokale, onbeheerde vuilnisbelten. Ook komt het voor dat afval lokaal wordt gedumpt, bijvoorbeeld door verkopers van de tweedehandsmarkten die onverkoopbare en verknipte artikelen weggooien. Dit textielafval komt hierdoor terecht in rivieren en via open rioleringen op stranden en in zee.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is ingedeeld in 8 hoofdstukken. Hoofdstuk 2 licht de aanpak van het onderzoek toe. Hierin staan ook de verschillende onderdelen van het rapport en de onderzoeksvragen. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de meest voorkomende kunststoffen en (synthetische) textielvezels en de gevaarlijke stoffen die daarin aanwezig (kunnen) zijn. Hoofdstuk 4 omschrijft welke stoffen er vrijkomen bij het verbranden van kunststofpolymeren. In hoofdstuk 5 is dit voor het ongecontroleerd storten van kunststofpolymeren uitgewerkt. De gevaarseigenschappen van de stoffen die mogelijk vrijkomen zijn in hoofdstuk 6 beschreven. In hoofdstuk 7 zijn per kunststofpolymeer de toepassingen samengevat en welke gevaarlijke stoffen aanwezig (kunnen) zijn en vrij (kunnen) komen bij verbranding en storten. Tot slot is in hoofdstuk 8 een discussie opgenomen en antwoord gegeven op de onderzoeksvragen.

Voor de polymeren (kunststofsoorten) en stoffen zijn afkortingen gebruikt. Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.

Toelichting onderscheid kunststof en textiel

Dit onderzoek richt zich op kunststoffen. Kunststoffen worden in vele toepassingen gebruikt, onder andere als synthetisch textiel. Synthetisch textiel kent een eigen dynamiek qua toepassing en afvalverwerking. In dit rapport is voor de (chemische) samenstelling van kunststofafval daarom separaat naar textiel gekeken. Echter zodra het gaat over het verbranden of het storten van kunststoffen, dan zijn de kunststofpolymeren en additieven leidend. Daarom is in dit rapport bij de bespreking van verbranding of storten gesproken over de kunststofpolymeren. Hierbij is wel uitgelicht welke additieven en welke kunststofpolymeren voor synthetisch textielrelevant zijn.

2 Aanpak onderzoek

2.1 Onderzoeksvragen

In het onderzoek zijn de volgende onderdelen en onderzoeksvragen geformuleerd.

1. Samenstelling van (het geëxporteerde) kunststofafval en afgedankt textiel (hoofdstuk 3 en 7):
 - a. Uit welke polymeren bestaat kunststofafval en afgedankt textiel?
 - b. Welke gevaarlijke stoffen zitten er in de kunststofpolymeren en synthetische textielvezels en wat zijn de gevaarseigenschappen daarvan?
2. Vrijkomen en verspreiden van stoffen bij verbranding van kunststoffen in de open lucht (hoofdstuk 4 en 7):
 - a. Welke stoffen komen er per kunststofpolymeer vrij door verbranding?
 - b. Hoe verloopt de verspreiding van deze stoffen?
3. Vrijkomen en verspreiden van stoffen als gevolg van het storten van kunststoffen (hoofdstuk 5 en 7):
 - a. Welke stoffen komen er per kunststofpolymeer vrij door uitloging naar het percolaat?
 - b. Hoe verloopt de verspreiding van deze stoffen?
 - c. Welke stoffen komen er per kunststofpolymeer vrij via stortplaatsgassen?
 - d. Hoe verloopt de verspreiding van deze stoffen?
4. Mogelijke effecten op mens en milieu van vrijkomende stoffen bij brand of storten (hoofdstuk 6):
 - a. Welke gevaarseigenschappen hebben de vrijkomende stoffen?
5. Per kunststofpolymeer is de beschikbare informatie, over de toepassing, chemische samenstelling en stoffen die vrij kunnen komen bij verbranding en storten, samengevat (hoofdstuk 7).

Om risico's van stoffen in te kunnen schatten is specifieke informatie nodig over de hoeveelheid stoffen die vrijkomt, de verspreiding en de mate en manier van blootstelling. Dit verschilt per situatie en locatie, onder andere door verschillen in de samenstelling van het afval en omgevingskenmerken. Omdat dit niet bekend is richt dit onderzoek zich op het vrijkomen en verspreiden van stoffen, en de gevaarseigenschappen van deze stoffen. In onderstaand tekstvak is meer achtergrondinformatie over gevaarseigenschappen, blootstelling en risico's gegeven.

Risico's van stoffen

Chemische stoffen kunnen gevaarlijk zijn voor mensen en het milieu. Hoe groot dat risico is, hangt af van de gevaarseigenschappen van een stof zelf en van hoe vaak en met hoeveel van de stof mensen en het milieu in contact komen, oftewel de blootstelling.

Gevaarseigenschappen

Gevaarseigenschappen van stoffen geven informatie over de effecten van stoffen op mens en milieu. Er is internationale wetgeving die

aangeeft hoe de gevaarsindeling van chemische stoffen moet worden bepaald (CLP (Classification, Labelling and Packaging) Verordening (EC 1272/2008)).

Voor de mens zijn de volgende gevaarseigenschappen relevant:

- Acut toxisch: stof geeft schadelijke effecten na een eenmalige of korte blootstelling
- Carcinogeen: kankerverwekkend
- Mutageen: veranderingen in erfelijke eigenschappen inducerend
- Reproductie toxisch: schadelijk voor de voortplanting of het nageslacht
- Hormoonverstorend: verstorend voor het hormoonstelsel van mensen

Daarnaast kunnen stoffen ook irriterend zijn of allergische reacties veroorzaken.

Voor het milieu zijn er de volgende gevaarseigenschappen:

- Persistent: niet of nauwelijks afbreekbaar in het milieu
- Bioaccumulerend: ophoping van de stof in organismen
- Mobiel: goed oplosbaar in water en daardoor gemakkelijke verspreiding door het milieu
- Toxisch: giftig, bijvoorbeeld gevaarlijk voor het aquatisch milieu
- Hormoonverstorend: verstoren het hormoonstelsel van dieren

Ook kunnen stoffen fysische gevaarseigenschappen hebben, bijvoorbeeld omdat ze brandbaar of explosief zijn.

Blootstelling

Op welke manier, hoe vaak en hoe lang iemand met een stof in contact komt, of hoeveel iemand er van binnen krijgt, wordt blootstelling genoemd. De hoeveelheid blootstelling hangt onder andere af van de verspreiding via lucht, bodem en water of via voeding en consumentenproducten. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met de omzetting en afbraak van de stof in het milieu of na opname door mens, dier of plant. De manier van blootstelling wordt ook wel de blootstellingroute genoemd, dit is bijvoorbeeld door inname via de mond, contact met de huid of door inademen.

Risico's

Als de gevaarseigenschappen en de blootstelling bekend zijn kan het risico voor mens en milieu worden bepaald aan de hand van een norm. Er zijn normen voor mens en milieu, éénmalige of langere blootstelling, en voor blootstelling via lucht, water en voeding. Is de blootstelling aan een gevaarlijke stof veel hoger dan de norm, dan vormt die stof een niet te accepteren risico.

2.2 Werkwijze

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van beschikbare gegevens in de literatuur. Een literatuurstudie is uitgevoerd om inzicht te krijgen in de samenstelling van kunststofafval en afgedankt textiel en het vrijkomen en verspreiden van stoffen uit dit afval bij het verbranden of storten. Dit is per onderdeel verder toegelicht. Standaard zoeksystemen zoals google, google scholar zijn gebruikt met onder andere zoektermen als:

“kunststoffen”, “plastics”, “samenstelling/composition” gecombineerd met termen als “schadelijke of gevaarlijke stoffen/hazardous substances”, “verbranding/incineration”, “storten/ dumping”. Ook Scopus en rivm.nl/publicatieoverzicht zijn gebruikt voor het verzamelen van wetenschappelijke literatuur en rapporten. Daarnaast zijn referenties uit de reeds verkregen literatuur nader bekeken. Er zijn verdiepende zoekopdrachten naar specifieke onderwerpen, zoals bijvoorbeeld naar de gevaarsinformatie van bepaalde stoffen, of toepassingen/ functies van bekende additieven in kunststoffen en textiel, uitgevoerd.

2.2.1 *Werkwijze inventarisatie samenstelling kunststofafval en afgedankt textiel*

Om een beeld te krijgen van de chemische samenstelling van het kunststofafval is onderzocht welke soorten kunststof er veelal worden gebruikt. Hiervoor is gebruik gemaakt van (review) onderzoeken over de kunststofmarkt in Europa en wereldwijd. Twee recente review studies, uit 2023 en 2024, geven een uitgebreid beeld over de samenstelling en (mogelijk) aanwezige stoffen in kunststoffen. Ook textiel komt in deze onderzoeken aan bod, omdat deze ook van kunststofpolymeren gemaakt kunnen zijn. Daarnaast is literatuur ter ondersteuning gezocht bijvoorbeeld naar de toepassingen van kunststofpolymeren (algemeen en specifiek voor textiel) en functies van specifieke additieven. Op basis van bestaande inventarisaties over stoffen in kunststoffen is een overzicht gemaakt van relevante gevaarlijke stofgroepen in kunststoffen. De kunststoffen die relevant zijn voor textiel zijn in dit overzicht toegelicht.

2.2.2 *Werkwijze vrijkomen en verspreiden van stoffen bij verbranden kunststofafval in open lucht*

Op basis van literatuuronderzoek is eerst onderzocht welke stoffen gemeten zijn bij branden met kunststof als brandstof. Hierbij is bekeken of deze stoffen afkomstig zijn uit kunststof en is onderscheid tussen de kunststofpolymeren gemaakt, voor zover dat mogelijk is. Daarnaast is literatuur meegenomen van metingen bij branden op kleine en gecontroleerde schaal van een ‘zuivere’ kunststofpolymeer. Als laatste is ook meegenomen welke stoffen mogelijk vrij (kunnen) komen op basis van de additieven die toegevoegd worden aan het kunststofpolymeer. De resultaten hiervan zijn gecombineerd en hebben geleid tot een inventarisatie van stoffen die vrijkomen per kunststofpolymeer. De eerdergenoemde onderzoeken bij branden waarbij kunststof aanwezig was, zijn tevens gebruikt om te kijken naar de verspreiding van deze stoffen in het milieu en mogelijke blootstellingsroutes. Tot slot is op basis van de informatie geconcludeerd welke stoffen relevant kunnen zijn bij het verbranden van textiel.

2.2.3 *Werkwijze vrijkomen en verspreiden van stoffen bij storten kunststofafval*

Het storten van kunststofafval leidt tot het vrijkomen van stoffen via het percolaat⁹ en via stortplaatsgassen. Op basis van literatuuronderzoek is eerst de manier waarop uitloging plaatsvindt bestudeerd en daarnaast van welke stoffen bekend is dat zij uit kunststoffen kunnen logen.

⁹ Vervuild water veroorzaakt doordat regen door het afval sijpelt

Daarna is beschreven welke stoffen er zoal in stortplaatspercolaat aangetroffen zijn, en welke daarvan mogelijk uit kunststoffen komen. Voor deze stofgroepen is de verspreiding onderzocht. Dit resulteert in een lijst met relevante stofgroepen voor uitloging. Eenzelfde werkwijze is gevolgd voor stoffen die als stortplaatsgas of met het stortplaatsgas vrijkomen. Tot slot is op basis van de informatie geconcludeerd welke stoffen relevant kunnen zijn bij het storten van textiel.

2.2.4 *Werkwijze effecten van vrijgekomen stoffen*

Voor de stofgroepen die vrijkomen bij brand en/of storten zijn de gevareiseigenschappen onderzocht op basis van literatuur. Deze eigenschappen worden geduid voor de blootstelling van de mens en het milieu. Er is geen risicobeoordeling uitgevoerd (zie ook 2.3).

2.3 **Afbakening**

De focus van het onderzoek ligt op de mogelijke effecten van het exporteren van kunststofstromen en afgedankt textiel voor mens en milieu. De volumes of samenstelling van de geëxporteerde stromen zelf zijn niet onderzocht. Er is uitgegaan van de polymeertypes die op de Europese markt komen en de samenstelling van (consumenten)textiel.

Voor dit onderzoek is er gekeken naar het verbranden van afval zonder maatregelen om gassen of fijnstof af te vangen. Dit kunnen smeulende branden op een stortplaats zijn, als ook lokaal verbrand afval voor hitte productie in (half) overdekte ruimte. Wat betreft het storten is voor dit onderzoek het uitgangspunt dat het afval gestort wordt op plaatsen waar geen maatregelen aanwezig zijn om het verspreiden van chemische stoffen te voorkomen. Dit kunnen beheerde of onbeheerde stortplaatsen zijn, maar ook locaties waar afval lokaal gedumpt wordt (bijvoorbeeld langs kustlijnen of rivieren).

Toxicologische risicobeoordelingen zijn geen onderdeel van dit onderzoek. Voor een gedegen risicobeoordeling is specifieke informatie nodig over de hoeveelheid stoffen die vrijkomen, en de blootstellingsroutes. Dit kan per locatie verschillen, bijvoorbeeld door omgevingskenmerken. Hierover is geen specifieke informatie verzameld. Daarom beschrijft dit onderzoek wel de effecten en mogelijke blootstellingsroutes, maar is dit niet gekwantificeerd met een risicobeoordeling.

Gezien de focus op gevaarlijke stoffen vallen andere (milieu)effecten, zoals klimaatverandering of sociaaleconomische effecten buiten de scope van het onderzoek. Deze effecten kunnen ook van invloed zijn op gezondheid van mens en milieu, zoals klimaatverandering veroorzaakt door broeikasgassen die vrijkomen bij verbranding van kunststofafval. De effecten van het vrijkomen van microplastics worden waar relevant beknopt omschreven.

3 Samenstelling van kunststoffen en synthetisch textiel

Om een beeld te krijgen van de samenstelling van kunststofafval dat uit Nederland geëxporteerd wordt, is in dit onderzoek uitgegaan van de meest toegepaste soorten kunststoffen (polymeren) op de Europese markt. Voor textiel is onderzocht welke synthetische textielvezels worden toegepast in consumentenkleding en welke polymeren hiervoor worden gebruikt.

Omschrijving van verschillende kunststoffen

Kunststoffen zijn door de mens gemaakte vaste materialen die bestaan uit polymeren. Een polymeer is een keten van repeterende moleculaire eenheden (monomeren) die aan elkaar gebonden zijn, meestal bestaande uit koolstofatomen als basis.[18] Kunststoffen kunnen in principe worden onderverdeeld in drie categorieën: thermoplasten, thermoharders en elastomeren. Deze indeling is op basis van hoe de materialen reageren op warmte en hun moleculaire structuur.[19] Thermoplasten worden hard wanneer ze afkoelen, zonder een chemische verandering te ondergaan. Daardoor kunnen ze opnieuw opgewarmd, gevormd en afgekoeld worden.[20] Veel voorkomende thermoplasten zijn bijvoorbeeld polyamide (PA), polyetheen (PE), polypropen (PP), polystyreen (PS), polyvinylchloride (PVC), Acrylonitril-butadien-styreen (ABS) en polyetheentereftalaat (PET). Wanneer thermoharders worden geproduceerd, vindt er een chemische verandering plaats, waarbij een 3-dimensionale structuur wordt gevormd. Hierdoor kunnen ze niet opnieuw gesmolten en gevormd worden en zijn ze minder geschikt voor recycling. Voorbeelden van thermoharders zijn polyurethaan (PUR), onverzadigde polyester, siliconen en harsen zoals epoxy, melamine, fenol en acryl. Elastomeren zoals rubber en latex zijn zeer elastisch. Ze kunnen niet worden gesmolten omdat hun macromoleculen op sommige punten met elkaar verbonden zijn en een wijdmazig ruimtelijk netwerk vormen.

Textiel

Synthetisch textiel is ook gemaakt van kunststoffen. De term textiel is afgeleid van textilis en betekent weven. De definitie van textiel is inmiddels uitgebreid naar meer dan alleen geweven stoffen, namelijk elk soort filament, vezel of garen dat verwerkt kan worden tot een stof of doek en het resulterende materiaal zelf.[21] Textiel kan gemaakt zijn van garen dat is geproduceerd van natuurlijke (bijvoorbeeld wol, katoen) of synthetische (bijvoorbeeld polyester, nylon (PA), elastaan (PUR), vezels.[22] Vervolgens wordt hiervan de textielstof gemaakt door weven of breien, waarna de stoffen nog behandeld kunnen worden voor de juiste functionaliteiten of eigenschappen. Voor deze behandeling kunnen chemische stoffen gebruikt worden die mogelijk op het textiel aanwezig blijven, zoals verven of waterafstotende lagen.

De meeste toegepaste polymeren in kunststoffen en textiel zijn omschreven in paragraaf 3.1. De (kans op) aanwezigheid van gevaarlijke stoffen in kunststof is afhankelijk van verschillende factoren. Het type kunststof en de toepassing (sector) bepaalt onder andere

welke grondstoffen en additieven (hulpstoffen) nodig zijn om de gewenste eigenschappen te behalen. Eigenschappen van kunststoffen worden verbeterd door toevoeging van additieven zoals weekmakers, brandvertragers, antioxidanten, vulmiddelen en kleurstoffen. Verschillende producenten kunnen ook verschillende stoffen toevoegen aan een bepaald kunststofproduct. In paragraaf 3.2.1 zijn de additieven beschreven die in kunststoffen worden toegevoegd. Daarnaast kunnen kunststoffen verontreinigingen bevatten die er niet bewust aan zijn toegevoegd. Verontreinigingen kunnen tijdens het productproces of bij gebruik, afdanking en recycling in de kunststof terecht komen. Hier besteedt paragraaf 3.2.2 aandacht aan.

Ook wetgeving heeft invloed op welke stoffen er wel of niet in kunststof zitten (zie paragraaf 3.3). Bepaalde stoffen kunnen verboden zijn, in het algemeen of in bepaalde toepassingen. De ouderdom van een afvalstroom is hierbij ook van belang. Mogelijk zijn de producten op de markt gekomen voordat er een verbod was voor het toepassen van een bepaalde stof. Bij het vrijkomen van deze producten als afval kunnen de zogenaamde 'legacy stoffen' dan nog aanwezig zijn. PVC, dat veel gebruikt wordt in gebouwen, blijft bijvoorbeeld veel langer in omloop dan PE, dat vooral als verpakkingsmateriaal gebruikt wordt.

Om tot een compleet beeld te komen van de chemische stoffen die mogelijk in de verschillende kunststoffen zitten is in dit rapport gebruik gemaakt van bestaande onderzoeken en databases. In paragraaf 3.4 staan deze databronnen beschreven en is een overzicht gegeven van de belangrijkste stofgroepen die uit deze inventarisaties naar voren komen. Ook is toegelicht welke chemische stoffen relevant zijn voor synthetisch textiel en paragraaf 3.5 sluit af met een samenvatting.

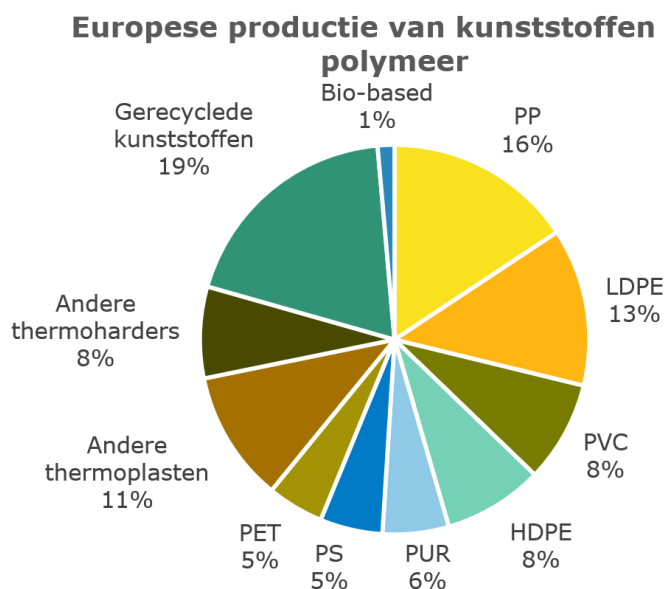
3.1 Samenstelling van geëxporteerd kunststofafval

3.1.1 Soorten kunststoffen

Kunststoffen, in het Engels ook wel plastics genoemd, zijn alom aanwezig in ons dagelijks leven en worden op grote schaal geproduceerd wereldwijd, namelijk in 2023 413,8 miljoen ton [2] en in 2060 wordt een productie van 1,2 miljard ton verwacht.[3]

Op dit moment wordt de mondiale en Europese kunststofmarkt gedomineerd door 7 polymeren. Dit zijn PP, Lagedichtheidpolyetheen (LDPE), PVC, Hogedichtheidpolyetheen (HDPE), PET, PUR en PS.[2] In Figuur 1 is de Europese productie van kunststoffen per polymeer weergegeven. In onderstaand tekstvak is meer informatie over de verschillende kunststofpolymeren en -types gegeven.

Figuur 1 Overzicht van Europese productie van kunststoffen per polymeer in 2023. Data van Plastics Europe.[2] Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.



Biobased en bioafbreekbare kunststoffen

De meeste kunststoffen zijn gemaakt van fossiele grondstoffen en zijn niet bio-afbreekbaar. Er zijn echter ook bioafbreekbare en biobased - biogebaseerde kunststoffen op de markt. In Europa is dit slechts 1% van al het geproduceerde kunststof.[23]

Biobased kunststoffen zijn kunststoffen gemaakt van biomassa. De biomassa komt uit primaire bronnen, zoals gewassen en hout, of uit secundaire bronnen, zoals groenafval. Afhankelijk van de bron van de biomassa en het productieproces kunnen biobased kunststoffen een aanzienlijk kleinere impact hebben op klimaatverandering. Biobased kunststoffen kunnen zowel bioafbreekbaar als niet bioafbreekbaar zijn.[23] In Europa is ongeveer de helft van de biobased kunststoffen ook bioafbreekbaar.[24]

Bioafbreekbare kunststoffen zijn gemaakt om aan het eind van hun levensduur af te breken tot voornamelijk koolstofdioxide (CO₂) en water. De afbraak is echter zeer afhankelijk van de omstandigheden waarin het kunststof terecht komt. Bioafbreekbare kunststoffen zijn daarmee niet altijd een goede oplossing voor zwerfafvalproblematiek. Bioafbreekbare kunststoffen kunnen zowel van fossiele als van biobased grondstoffen zijn gemaakt.[23]

3.1.2

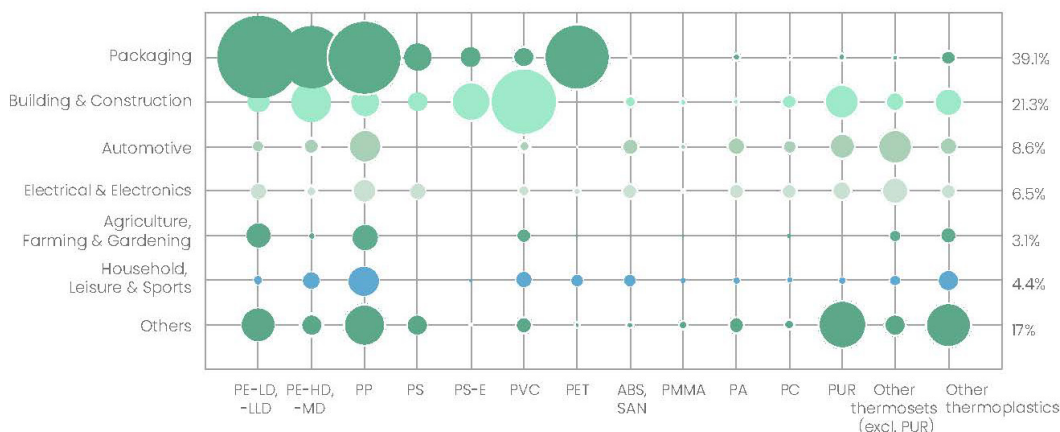
Kunststofproducten

Kunststoffen worden in Europa verwerkt in producten en onderdelen zoals verpakkingen (44%), bouwmaterialen (18%), in de automotive industrie (8%), de elektrotechnische industrie (7%) en overige toepassingen (12%).[2] Opgemerkt wordt dat synthetisch textiel vooral buiten Europa geproduceerd wordt en als afgewerkt product geïmporteerd. Daarom is de textielsector niet opgenomen in het

hiervoor genoemde onderzoek naar de verwerking van kunststoffen in Europa.

Verschillende soorten kunststoffen worden in verschillende sectoren toegepast. HDPE, LDPE, PET en PP worden voornamelijk in de verpakkingindustrie toegepast, terwijl PS en PVC meer in de bouwsector worden toegepast. PVC wordt ook als verpakkingsmateriaal gebruikt (bijvoorbeeld in meerlaagse folies).[25] Figuur 2 is een visuele weergave van de (mate van) toepassing van veel gebruikte kunststofpolymeren per sector. Ook hier gaat het om wat in Europa verwerkt wordt (van basisgrondstof tot product) en het figuur houdt geen rekening met geïmporteerde producten waarin kunststof is verwerkt zoals textiel. Het valt op dat de meeste kunststof (zowel PP, HDPE, LDPE en PET) toegepast wordt in de verpakkende industrie.

Figuur 2 Belangrijkste toegepaste kunststofpolymeren in verschillende sectoren. Bron: Plastics Europe.[26] Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.



De verschillende soorten kunststoffen hebben een grote verscheidenheid aan materiaaleigenschappen en kunnen daarmee voor veel toepassingen worden ingezet en zijn dus niet gelimiteerd tot enkel deze sectoren.[4] Tabel 1 laat verschillende specifieke toepassingen zien van kunststofpolymeren en de sectoren, waarin ze toegepast worden.

Tabel 1 Voorbeelden van sectoren en toepassingen waarin verschillende kunststofpolymeren worden toegepast.[4, 27-29] Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.

Kunststoffen	Sectoren	Voorbeelden van toepassingen
Polyproppeen of Polypropyleen (PP)	Bouw, auto-industrie, textiel, verpakkingen	Voedselverpakkingen, auto-onderdelen, plastic meubels, vezel in mondkapjes
Lagedichtheidpolyetheen (LDPE)	Verpakkingen	Vershoudfolie, plastic zakken, flessen, bekabeling
Polyvinylchloride (PVC of Vinyl)	Bouw, textiel	Raamkozijnen, vloerbedekking, pijpen, kabelisolatie, bedrukking op kleding, slippers, regenjas, (medicijn)verpakking, folies

Kunststoffen	Sectoren	Voorbeelden van toepassingen
Hogedichtheidpolyetheen (HDPE)	Verpakkingen	Consumentenproducten (snijplanken, speelgoed), vaten en opslagtank, pijpen, kratten, plastic containers voor bewaren chemische stoffen, voedsel, cosmetica
Polyethyleentereftalaat (PET, polyester)	Verpakkingen, textiel	Voedselverpakking, drinkflessen, kleding (bijvoorbeeld in polykatoen, een mix van katoen en polyester), fleecvesten, sportkleding, outdoor kleding, gordijnen, 3D printer filament
Polyurethaan (PUR, PU, elastaan)	Bouw, auto-industrie, textiel	Isolatie, matrassen, auto-onderdelen, zwemkleding, hoelakens, jeans, T-shirts, sokken, vulmateriaal in kleding
Polystyreen (PS of piepschuim (EPS))	Bouw	Voedselverpakkingen, isolatie, elektronische apparatuur
Polyetheen (PE)	Bouw, verpakkingen	Voedselverpakkingen, consumentenproducten (speelgoed, keukengerei), pijpen, bekabeling, isolatiematerialen
Acrylonitril-butadienstyreen (ABS)	Bouw, auto-industrie, elektronica	Pijpen en fittingen, banden, auto-onderdelen, verpakkingen, elektronica,
Polycarbonaat (PC)	Auto-industrie elektronica	Banden, verpakkingen, elektronica, auto-onderdelen,
Polyoxymethyleen of polyacetaal (POM)	Verpakkingen, auto-industrie	Voedselverpakkingen, tandwielen en tandheugels, lagers
Polymethylmethacrylaat of acrylaat (PMMA)	Verpakkingen, auto-industrie, elektronica	Displays, voedselverpakkingen, voorzetramen (plexiglas)
Polyacrylonitril (PAN)	Textiel	Gordijnen, imitatiebont, meubelbekleding, zonwering, filtermateriaal, truien, vesten
Polyamide (PA, onder andere nylon en aramide)	Textiel	Panty's, leggings, jassen, flosdraad, hondenriem, tandwielen en lagers

Toepassing van kunststoffen in textiel

Het gebruik van synthetische garens is de laatste jaren substantieel toegenomen. Momenteel bestaat meer dan twee derde (69%) van het textiel dat op de markt komt uit synthetische garens.[30] Op dit moment is polyester (een van de meest voorkomende polyesters is PET) de grootste synthetische textiel soort op de markt, namelijk 59% van de totale textielvezel productie. Daarna komt nylon (behorend tot de groep PA) met 5% van de totale productie. Acryl (PAN) met 2% en elastaan (dat voornamelijk bestaat uit polyurethaan) met ongeveer 1% van de globale vezelproductie, zijn minder prominent in de markt op het gebied van volume, maar worden erg vaak in lage hoeveelheden in kleding verwerkt.[31]

Bovenstaande cijfers geven een beeld de vezelsamenstelling in de hele textielsector. Ongeveer 30-60% van polyester wordt gebruikt in kleding en 25-30% in huishoudelijk textiel, zoals gordijnen, tapijten, handdoeken, beddengoed en meubelbekleding. Ook elastaan en acryl worden voornamelijk in de kledingsector toegepast, tot wel 80%. Daarentegen wordt nylon slechts voor 10 – 50% toegepast in de kledingsector.[30] Deze cijfers variëren sterk, hebben een grote marge, en geven daarom vooral een indicatie van de toepassingen. De samenstelling van textielproducten hangt onder andere af van het type kledingstuk. Sportkleding bevat bijvoorbeeld meer synthetisch materiaal dan T-shirts.[32]

Greenpeace heeft in 2023 onderzoek gedaan naar de samenstelling van geëxporteerde tweedehandskleding in Ghana.[16] Daaruit bleek dat 89% van alle geteste kledingstukken uit een of meerdere synthetische vezels bestond zoals acryl, polyester, elastaan en polyamide.

3.2 Chemische stoffen in kunststoffen

3.2.1 Additieven toegepast in kunststof

Bij de toepassingen van kunststoffen zijn verscheidene eigenschappen vereist van het materiaal. Polymeren hebben intrinsiek bepaalde eigenschappen, zoals hard, buigzaam of breekbaar en er kunnen ook additieven worden toegevoegd. Additieven zijn chemische stoffen die al tijdens de productie van de kunststof aan de polymeren worden toegevoegd om de eigenschappen te veranderen.[28] Zo kunnen weekmakers de buigzaamheid verbeteren van het eindproduct. Typische voorbeelden van additieven zijn weekmakers, vulstoffen, brandvertragers, kleurstoffen, stabilisatoren, biociden, katalysatoren, antioxidanten, smeermiddelen en antistatische middelen. In gemiddeld kunststof worden circa 7% g/g additieven toegevoegd.[33] De concentraties van additieven kunnen echter sterk verschillen per kunststof en additievengroep. Gerapporteerde ranges zijn: 10-70% g/g weekmakers, 12-18% g/g voor brandvertragers, 0,05-3% g/g voor stabilisatoren, 0,25-5% g/g voor kleurstoffen, 0,001-1% g/g voor biociden en 5-50% g/g voor vulmiddelen.[34] In Tabel 2 zijn de belangrijkste functies van additieven per kunststof weergegeven.

Voor textiel geldt specifiek dat de (synthetische) textielvezel en/of textielstoffen nog een behandeling ondergaan zoals verven, bedrukken en afwerkingsprocessen. Bij het afwerkingsproces kunnen deze worden behandeld om de vereiste functionaliteiten en kenmerken te verkrijgen zoals verzachten, waterdicht maken of brandwerend maken. In dat geval worden nog additieven toegevoegd aan de synthetische textielvezels.

Tabel 2 Overzicht van additieven die per kunststofpolymeer worden toegepast. Bron: UNEP.[28] De kunststofpolymeren die relevant zijn voor textiel zijn aangeduid met de toevoeging. ^T

Kunststofpolymeren	Functies additieven
Polystyreen (PS of EPS)	Brandvertragers
	Waterafstoters
	Weekmakers

Kunststofpolymeren	Functies additieven
Polyvinylchloride ^T (PVC of Vinyl)	Brandvertragers
	Weekmakers
	Antioxidanten
	Hitte- en UV-stabilisatoren
	Pigmenten
	Katalysatoren
	Biociden*
Polyurethaan ^T (PUR, PU, elastaan)	Brandvertragers
	Waterafstoters
	Lossingsmiddel
	Biociden*
	UV-stabilisatoren
	Katalysatoren Kleurstoffen
Acrylonitril-butadien-styreen (ABS)	UV-stabilisatoren
Polycarbonaat (PC)	Waterafstoters
	Hitte- en UV-stabilisatoren
Polyoxymethyleen of polyacetaal (POM)	UV-stabilisatoren
Polymethylmethacrylaat of acrylaat (PMMA)	UV-stabilisatoren
Polypropeen of Polypropyleen (PP)	Waterafstoters
	Pigmenten
	Katalysatoren
	Biociden*
Polyetheen (PE)	Waterafstoters
	Pigmenten
	Katalysatoren
	Biociden*
Lagedichtheidpolyetheen (LDPE)	Biociden*
Hogedichtheidpolyetheen (HDPE)	-
Polyethyleentereftalaat ^T (PET, polyester)	Brandvertragers
	Waterafstoters
	Hitte- en UV-stabilisatoren
	Biociden*
	Kleurstoffen
Polyacrylonitril ^T (PAN)	Brandvertragers
	Kleurstoffen
Polyamide ^T (PA, onder andere nylon en aramide)	Waterafstoters
	Hitte- en UV-stabilisatoren
	Kleurstoffen
	Biociden*

* Additief tegen degradatie door micro-organismen of als antibacterieel middel.

3.2.2 *Vervuilingen in kunststof*

Naast stoffen die bewust worden toegevoegd kunnen er ook nog stoffen inzitten die onbewust tijdens het productieproces worden toegevoegd of zijn ontstaan.[35] Dit worden ook wel Non-Intentionally Added Substances (NIAS) - niet bewust toegevoegde stoffen genoemd. Zo kunnen afbraakproducten zijn gevormd bij het productieproces, zoals alkylfenolen uit antioxidanten en styreen oligomeren van het PS-polymeer. Daarnaast kunnen stoffen zijn toegevoegd, die achteraf als onzuiverheid in de kunststof blijven zitten, bijvoorbeeld katalysatoren zoals 'cross-linking agents' en 'blowing agents'. Vaak is niet bekend welke NIAS in het kunststof aanwezig zijn. Hoewel er veel onbekend is van deze groep stoffen representeert het wel een grote groep chemicaliën.[27]

Ook kunnen kunststoffen bij inzameling verontreinigd raken met bijvoorbeeld voedselresten of restanten van reinigingsmiddelen of cosmetica. Hierin kunnen sporen van gevaarlijke stoffen aanwezig kunnen zijn, denk bijvoorbeeld aan biociden.[36] Deze vorm van verontreiniging is echter heel divers en deels afhankelijk van het gedrag van consumenten. Consumenten zijn grotendeels bepalend voor hoe goed afval gescheiden wordt en of er bijvoorbeeld medicijn(rest)en bij het verpakkingsafval terecht komen.

3.3 **Wetgeving**

Er zijn verschillende internationale verdragen en wettelijke kaders die regels stellen voor stoffen met mogelijke risico's voor mens en milieu. Zo is er wetgeving gericht op productie, handel en gebruik van stoffen. Het doel hiervan is om aan de bron zo goed mogelijk om te gaan met risico's van stoffen. Voorbeelden daarvan zijn de REACH-verordening (omtrent de registratie, evaluatie, autorisatie en restrictie van chemische stoffen), de CLP-verordening (omtrent de indeling, etikettering en verpakking van stoffen) en de POP-verordening (omtrent restrictie van toxische, persistente en bioaccumulerende stoffen). Hieronder worden een aantal verordeningen en richtlijnen beschreven.

REACH-verordening

Registratie, Evaluatie, Autorisatie en restrictie van Chemische stoffen (REACH) is de Europese verordening over de productie van en handel in chemische stoffen. Deze verordening geldt voor alle landen van de Europese Unie. Doel van de wetgeving is het veilig gebruik van chemische stoffen, van productie in de industriële keten tot aan de eindtoepassing, te waarborgen en de risico's van chemische stoffen op de gezondheid van de mens en het milieu te beperken en reguleren. Ook zorgt REACH voor transparantie in de keten. Op termijn streeft de EU naar vervanging van de meest gevaarlijke chemische stoffen door minder gevaarlijke alternatieven. Dit gebeurt onder andere middels het autorisatieproces. Hierbij moet een bedrijf of producent toestemming vragen om een gevaarlijke stof te mogen gebruiken. Een versimpeld schema van het proces dat leidt tot het autorisatieplichtig worden van een stof is weergegeven in Figuur 3.

Figuur 3 Simpele weergave van het autorisatieproces voor de meest gevaarlijke stoffen (Substance of Very High Concern - SVHC), Bron: Faber et al.[37]



Naast autorisatie, is het tweede spoor voor het reguleren van stoffen restrictie (inperking van gebruik). De restrictie stelt eisen en voorwaarden aan chemische stoffen en mengsels en/of hun toepassing in producten. Soms zijn de REACH restricties gekoppeld aan de toepassing van de materialen. Bijvoorbeeld voor kleding zijn er specifieke restricties van toepassing omdat er bij kleding sprake is van een hogere mate van blootstelling via de huid.

POP-verordening

Persistent Organic Pollutants (POP's) zijn stoffen die onder het Verdrag van Stockholm zijn aangemerkt als persistente organische verontreinigende stof. Het verdrag is geïmplementeerd in de EU via de POP-verordening (EU) 2019/1021 (EU Regulation, 2019). Er zijn ruim 180 landen aangesloten bij dit verdrag.

De POP-verordening regelt in de eerste plaats het beëindigen van de vervaardiging, het in de handel brengen en het gebruik van opzettelijk vervaardigde POP's. Bij het op de markt brengen van producten moet bijvoorbeeld aan de in bijlage I van de POP-verordening genoemde grenswaarden worden voldaan. Op de tweede plaats regelt de POP-verordening een veilige verwerking van POP-houdende afvalstoffen. Bijlage IV van de POP-verordening geeft de grenswaarden aan van POP's in afval. Boven deze grenswaarden wordt het afval als POP-houdend afval geclassificeerd. Indien dit het geval is, dienen de POP's vernietigd of onomkeerbaar te worden omgezet conform gespecificeerde technieken (bijlage V).

RoHS-richtlijn

In elektrische en elektronische apparatuur kunnen stoffen zitten die gevaarlijk zijn voor mens en milieu. Er is specifieke regelgeving om het gebruik van bepaalde gevaarlijke stoffen in elektrische en elektronische apparatuur te beperken. De Nederlandse regels hiervoor staan in de Regeling gevaarlijke stoffen in elektrische en elektronische apparatuur (Rgseea). Deze Nederlandse regeling is gebaseerd op de Europese richtlijn 2011/65/EU, Restriction of the use of certain Hazardous Substances (RoHS).

De RoHS restrictielijst bestaat uit een aantal schadelijke zware metalen en brandvertragers: lood, kwik, cadmium, zeswaardig chroom, polybroombifenylen (PBB's) en polybroomdifenylethers (PBDE's). In 2019 zijn daar vier ftalaten: bis(2-ethylhexyl)ftalaat (DEHP), benzylbuthylftalaat (BBP), dibuthylftalaat (DBP) en diisobuthylftalaat (DIBP) aan toegevoegd.

Verordening nr. 10/2011 (verpakkingen)

Voor kunststoffen die in contact komen met voedsel is er Europese wetgeving die vastlegt welke stoffen zijn toegelaten in het productieproces, dit is de verordening (EC) nr. 10/2011.

Ook mogen er geen chemische stoffen via verpakkingsmateriaal in het voedsel terechtkomen (oftewel: migratie) in hoeveelheden die schadelijk zijn voor de gezondheid. Deze stoffen moeten zijn goedgekeurd en voldoen aan de stofspecifieke migratielimiten (SML's) zoals vastgelegd in verordening (EC) nr. 10/2011.

Bedrijven, met name producenten en importeurs, zijn zelf verantwoordelijk voor het op de markt brengen van veilige producten. Voor alle voedselcontactmaterialen die op de Europese markt komen geldt dus dat deze moeten voldoen aan de bovengenoemde eisen. Voor andere kunststoffen is de REACH verordening van toepassing.

3.4 Inventarisaties van stoffen in kunststoffen

Vanwege de grote verscheidenheid aan kunststoffen en producten waarin ze worden toegepast zijn er meer dan 100.000 unieke kunststof 'recepten' en verschillende productieprocessen.[27] Momenteel is er geen openbaar beschikbare informatiebron die toegankelijk een overzicht biedt van de chemicaliën die worden toegepast of ontstaan bij de productie van kunststoffen. Er is wel informatie beschikbaar, maar deze is onvolledig en verspreid. Zo is er bijvoorbeeld een positieve lijst van monomeren en additieven die zijn toegestaan bij kunststoffen die in contact komen met levensmiddelen (verordening (EC) nr. 10/2011). Dit zijn dus niet enkel kunststof voedselverpakkingen, maar alle kunststoffen die in contact met levensmiddelen komen, zoals bijvoorbeeld kookgerei. Voor andere kunststoffen, niet-voedselcontactmaterialen, bestaan er geen positieve lijsten en hiervan is er dan ook minder bekend van de samenstelling.[28]

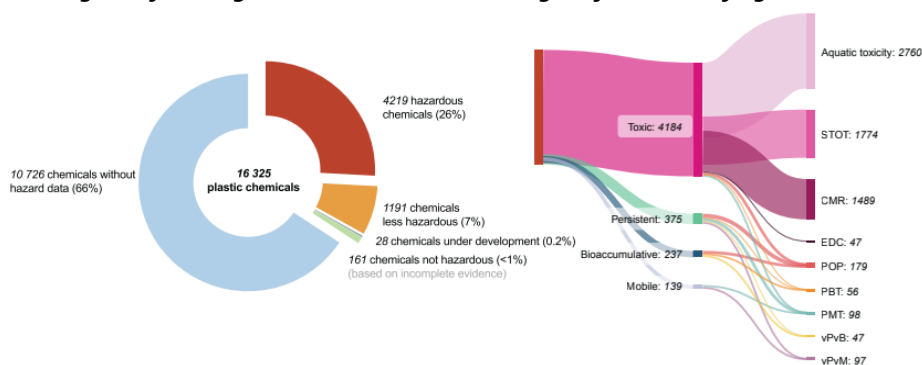
Voor textiel is er ook geen informatie bekend over de recepturen van de (synthetische) textielvezels. Er zijn wel certificeringen (bijvoorbeeld de OEKO-TEX standaard) en vrijwillige industrie-standaarden zoals ZDHC (Zero Discharge of Hazardous chemicals) en "rode lijsten" die bedrijven toepassen om aan te geven dat bepaalde gevaarlijke stoffen niet in het textiel aanwezig zijn. Een voorbeeld daarvan is de rode lijst van Appareel & Footwear International RSL Management Working Group (AFIRM).

Het United Nations Environment Program (UNEP) heeft in 2023 een rapport uitgebracht met als doel informatie over kunststof vervuiling en de opties om dit aan te pakken te verschaffen, om beleid op te kunnen formuleren.[28] Een aantal studies omtrent stoffen in chemicaliën zijn hierin samengevat. Vervolgens is gekeken naar de gevaarseigenschappen van de stoffen. Op basis hiervan heeft UNEP 10 functionele of chemische stofgroepen als "zorgwekkend" gekenmerkt:

- Brandvertragers
- UV-stabilisatoren
- Per- en polyfluoroalkyl stoffen (PFAS)
- Ftalaten
- Bisfenolen
- Alkylfenolen en alkylfenoethoxylaten
- Biociden
- Metalen en metalloïden
- Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK)
- NIAS (zoals polychloride dibenzo-p-dioxinen en furanen).

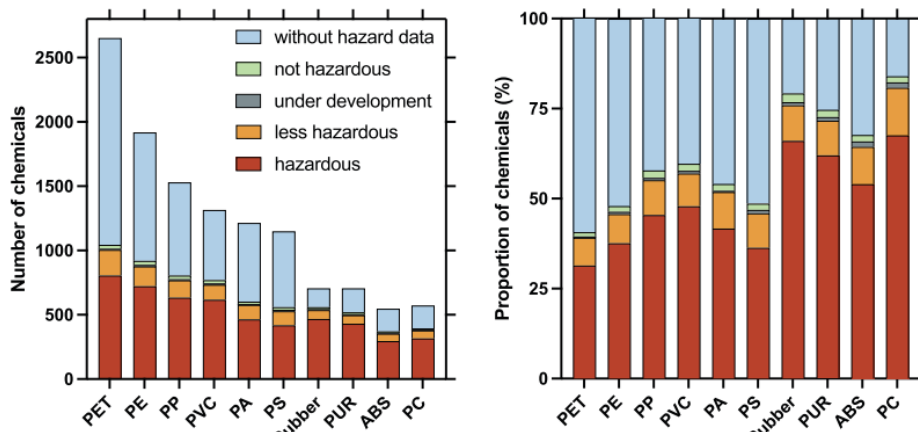
In 2024 is het PlastChem-project gepubliceerd waarin een uitgebreid overzicht is gegeven van ruim 16.000 chemicaliën die in kunststoffen aanwezig kunnen zijn (wereldwijd).[27] Er is gebruikt gemaakt van verscheidende databases en onderzoeken die zijn gecombineerd tot één database. Hierbij zijn niet alleen alle monomeren, polymeren en additieven in kaart gebracht, maar ook de NIAS. Naast een lijst van alle stoffen zijn de gevaareigenschappen en potentiële risico's benoemd en risicogroepen aangewezen om overheden te ondersteunen bij maken van beleid. Op basis van de gevaareigenschappen van deze chemicaliën zijn 4219 stoffen (26% van de 16.325) als schadelijk aangemerkt, omdat ze aan een of meer van de PBMT (persistent, bioaccumulatief, mobiel, toxisch) criteria voldoen (zie figuur 4). Een belangrijk kennishiaat is dat van 10.726 (66%) chemicaliën geen gevaareigenschappen bekend zijn, maar ze deze wel kunnen hebben.

Figuur 4 Overzicht van stoffen in kunststoffen, of daarvoor gevaareigenschappen bekend zijn en welke dit zijn. Ook stoffen die wel bekend, maar nog in ontwikkeling zijn hierin meegenomen. Bron: Plastchem.[27] Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.



Het onderzoek heeft ook gekeken naar het aandeel gevaarlijke stoffen in veel voorkomende kunststofpolymeren, figuur 5. Hierbij is gekeken naar PET, PE, PP PVC, PS, PA en PUR. Uit de analyse blijkt dat in PUR, ABS, PC en PVC de hoogste percentages (tussen de 48 en 66%) van de bekend aanwezige stoffen bewezen gevaareigenschappen hebben. Belangrijk om hierbij aan te kaarten is dat dit voornamelijk gebaseerd is op polymeren die de hoogste productievolumes hebben en waarvan het meeste bekend is qua additieven en NIAS. De meest onderzochte polymeren, waarvan meer stoffen in het materiaal bekend zijn, lijken daarmee gevaarlijker dan polymeren die minder onderzocht zijn. Bij polymeren zoals PET en PE zijn van ongeveer de helft van de in het materiaal aanwezige stoffen geen gevaareigenschappen bekend. Ook zijn er andere soorten polymeren, siliconen of biologisch afbreekbare polymeren, die wel degelijk gevaarlijke stoffen kunnen bevatten, maar die simpelweg niet onderzocht of bekend zijn. Daarnaast gaat deze analyse over het aantal stoffen en niet over de concentraties van die stoffen in kunststoffen.

Figuur 5 Informatie over gevaarseigenschappen van stoffen in kunststoffen.
Bron: PlastChem.[27] Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.



Op basis van de inventarisatie en de analyse van de gevaarseigenschappen identificeert PlastChem 15 "prioritaire groepen":

- Aceto en benzofenonen
- Alkylfenolen
- Aralkyl aldehyden
- Aromatische amines
- Aromatische ethers
- Azokleurstoffen
- Benzothiazolen
- Bisfenolen
- Chloorparaffinen
- Ftalaten
- Organometalen
- Parabenen
- PFAS
- Salicylzuur esters

Een belangrijk punt om te adresseren is dat het in de PlastChem-database niet inzichtelijk is of de stoffen momenteel nog in kunststoffen aanwezig zijn (er zitten ook in de EU verboden stoffen tussen), of dit ook te verwachten is in de geëxporteerde kunststoffen, en in welke concentraties.

Inventarisatie van stoffen in (afgedankt) textiel

In deze paragraaf belichten we welke stoffen specifiek voor consumententextiel relevant zijn. In de PlastChem-database en het onderzoek van UNEP (2023) is gebruik van chemische stoffen in synthetisch textiel onderdeel van de scope, echter is uit de studie niet te herleiden welke stoffen expliciet voor textiel relevant zijn.

Specifiek voor textiel zijn er onderzoeken bekend van inspectiediensten, ngo's en textielbedrijven.[22] In deze onderzoeken zijn metingen uitgevoerd om na te gaan of deze producten voldoen aan de geldende wetgeving (REACH) of industrie standaarden. Zoals aangegeven in paragraaf 3.2.3 zijn bepaalde stoffen niet toegestaan onder REACH wetgeving omwille van gezondheidseffecten en de directe blootstelling

door het dragen van kleding. Deze stoffen kunnen echter ook, afhankelijk van de stoffeigenschappen, milieueffecten hebben.

Uit een studie van H&M en IKEA blijkt dat polyester meer kans heeft op een overschrijding van de industriestandaard (de "rode lijst van stoffen" van AFIRM) ten opzichte van katoen.[38] Deze industriestandaard is voor sommige stoffen strenger (heeft een lagere concentratiegrenswaarde) dan wetgeving. In 50% van de polyester monsters is een overschrijding van de concentratiegrenswaarde vastgesteld van één of meerdere stoffen. De resultaten van deze studie zijn uitgebreid beschreven in het RIVM briefrapport "Textile recycling in the Netherlands".[22]

Uit onderzoek van Centexbel in opdracht van de Europese Commissie bleek dat 16% van de 160 onderzochte textielstukken niet voldoen aan REACH wetgeving.[39] In de studie bleek dat er voor alle types van kledingartikelen (uitgezonderd bedtextiel) een kans is op overschrijding van wettelijke normen. Op basis van de resultaten is een test matrix ontwikkeld waarbij per materiaaltype is aangegeven welke stoffen meeste kans op overschrijding van de grenswaarde hebben. Deze adviezen zijn helpend voor inspectiediensten om zo gericht controles te kunnen doen op kledingartikelen die de Europese markt op komen.

In het algemeen is door Centexbel het vaakst een overschrijding aangetoond voor de stoffen: chroom VI, nikkel, ftalaten, nonylfenol ethoxylaate (NPEO), chloorparaffinen, PAK, metalen en aromatische amines. Voor gekleurde synthetische kleding en PA in kleding zijn NPEO en bisfenolen van belang.[39] In de matrix worden ook stoffen genoemd die relevant zijn voor materialen met bedrukking, PU coating, en PVC coating, plastic onderdelen (ritsen, knopen), blends van PA & elastaan, etc. PFAS kan zijn toegepast in waterafstotende kleding, zoals jassen en zwemkleding.[22]

3.5 Samenvattende conclusie stoffen in kunststof en textiel

Er kunnen vele verschillende stoffen in kunststoffen en (synthetisch) textiel aanwezig zijn. Het doel van dit onderzoek is om de mogelijke schadelijke effecten op mens en milieu, die voortkomen uit het verbranden of storten van kunststoffen, in kaart te brengen. Daarom zijn de zorgwekkende en prioritaire stofgroepen belangrijk voor dit onderzoek.

In Tabel 3 is een overzicht gegeven van de groepen gevaarlijke stoffen die in kunststoffen voorkomen volgens UNEP en/of PlastChem en hun stoffeigenschappen en gevaarseigenschappen (toxiciteit). De tabel is aangevuld op basis van specifieke informatie over stoffen in textiel (zie paragraaf 3.2.5). Opgemerkt wordt dat de studies zowel functionele (bv. brandvertragers) als chemische (bv. organometalen) stofgroepen benoemen. Deze groepen zijn in onderstaande tabel zoveel mogelijk samengenomen. In Tabel 4 volgt een overzicht per kunststofpolymeer van groepen gevaarlijke additieven/stoffen. Hierin zijn de chemische stofgroepen opgenomen, omdat deze relevant zijn voor het vervolg van dit onderzoek naar het vrijkomen van stoffen bij brand en storten. Over concentraties van de stoffen in de kunststofpolymeren zijn geen

specifieke gegevens bekend (zie algemene informatie over concentraties additieven in paragraaf 3.2.1).

*Tabel 3 Overzicht van groepen stoffen in kunststoffen en hun stofeigenschappen die zorgwekkend zijn volgens UNEP[28] *, of prioritair volgens PlastChem[27] ^ en relevant voor textiel en op basis van Centexbel[39] en RIVM[22] T.*

Informatie over stofeigenschappen en gevaarseigenschappen komen uit dezelfde bronnen. Hormoonversturend betreft voor mens en/of milieu.

Groepen gevaarlijke stoffen	Functies stofgroep	Eigenschappen stofgroep	Gevaarseigenschappen
Aceto en benzofenonen [^]	UV-stabilisatoren, antioxidanten, monomeer/ intermediair in kunststofproductie	Persistent, mobiel	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend
Alkylfenolen ^{T^}	Hitte-stabilisatoren, monomeer/intermediair in kunststof productie	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu, hormoonversturend, kankerverwekkend
Arakyl aldehyden [^]	Geurstoffen	-	Toxisch voor het aquatisch milieu, reprotoxisch, hormoonversturend
Aromatische amines ^{h T^}	Pigmenten, antioxidanten, katalysatoren	Persistent, mobiel	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, mutageen, reprotoxisch
Aromatische ethers [^]	Geurstoffen, weekmakers	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu, mutageen, reprotoxisch
Azokleurstoffen [^]	Kleurstoffen, antioxidanten	Persistent, mobiel	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, mutageen, reprotoxisch
Benzothiazolen ^{T^*}	UV-stabilisatoren, katalysatoren, pigmenten	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, reprotoxisch
Benzotriazole ^{T*}	UV-stabilisatoren, antioxidanten	Persistent	Toxisch voor het aquatisch milieu

^h Aromatische amines zijn verboden sinds 2004 en worden enkel in zeldzame gevallen nog aangetroffen.

Groepen gevaarlijke stoffen	Functies stofgroep	Eigenschappen stofgroep	Gevareiseigenschappen
Biociden ^{T*} (zoals organotinverbindingen, arseenverbindingen en triclosan)	Bescherming tegen degradatie door microorganismen	Persistent	Toxisch voor het aquatisch milieu, hormoonverstorend
Bisfenolen ^{T*^} (monomeer PC productie, antioxidanten, weekmakers)	Monomeer in PC productie, antioxidanten, weekmakers	Persistent, bioaccumulatief, mobiel	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, mutageen, reprotoxisch, hormoonverstorend
Chloorparaffinen ^{T^*}	Brandvertragers, weekmakers	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, reprotoxisch
Dioxines en furanen*	NIAS	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, mutageen, reproductie toxisch
Ftalaten ^{T*^} , <i>ortho en iso-tereftalaat en trimelliet</i>	Geurstoffen, weekmakers	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, reprotoxisch, hormoonverstorend
Metalen en metalloïden ^{T*} , <i>o.a. cadmium, chroom, lood, kwik en kobalt</i>	Katalysatoren, hitte-/UV-stabilisatoren, pigmenten	-	Toxisch voor het aquatisch milieu, reproductie toxisch, mutageen, kankerverwekkend
Organofosfaten ^{T*}	Brandvertragers, hitte-stabilisatoren, antioxidanten, weekmakers	Persistent, bioaccumulatief, mobiel	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, mutageen, reprotoxisch, hormoonverstorend
Organometalen ^{T^}	Pigmenten, antioxidanten, hitte-/UV-stabilisatoren	Persistent, bioaccumulatief, mobiel	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, mutageen, reprotoxisch
Parabenen [^]	Pigmenten, geurstoffen	-	Toxisch voor het aquatisch milieu, hormoonverstorend

Groepen gevaarlijke stoffen	Functies stofgroep	Eigenschappen stofgroep	Gevareseigenschappen
Per en polyfluoroalkyl stoffen ^T	Waterafstotend, monomeer/ intermediair in kunststofproductie	Persistent, bioaccumulatief, mobiel	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, mutageen, reprotoxisch, hormoonverstorend
Polychloorbifenylen * (PCB's)	NIAS, brandvertragers	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu
Polychloornaftalenen * (PCN)	NIAS, weekmakers, brandvertragers	Persistent	Toxisch voor het aquatisch milieu, mutageen
Polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) ^{T*}	NIAS, weekmakers	Persistent, bioaccumulatief,	Kankerverwekkend, mutageen, reprotoxisch
Polygebromeerde difenylethers (PBDE's) en hexabroomcyclododecaan (HBCDD) *	Brandvertragers	Persistent, bioaccumulatief	Toxisch voor het aquatisch milieu, kankerverwekkend, hormoonverstorend
Salicylzuur esters [^]	Geurstoffen, UV-stabilisatoren	-	Toxisch voor het aquatisch milieu, reprotoxisch, hormoonverstorend

Tabel 4 Overzicht van groepen gevaarlijke stoffen die mogelijk aanwezig zijn per kunststofpolymeer. Bronnen: UNEP[28], PlastChem[27], Centexbel[39] en RIVM[22]. Relevantie van kunststofpolymeren voor textiel is aangegeven via het symbool. ^T Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.

Kunststofpolymeren	Stofgroepen
PS of EPS	<ul style="list-style-type: none"> • PBDE's en andere gebromeerde brandvertragers • Chloorparaffinen (gechloreerde brandvertrager) • Organofosfaten (brandvertragers) • Metaalhydroxiden van magnesium, aluminium en boor (brandvertragers) • PFAS • PAK
PVC (vinyl) ^T	<ul style="list-style-type: none"> • PBDE's en andere gebromeerde brandvertragers • Chloorparaffinen (gechloreerde brandvertrager) • Organofosfaten (brandvertragers) • Metaalhydroxiden van magnesium, aluminium en boor (brandvertragers) • PAK • Ftalaten • Bisfenolen • Benzofenonen • Benzotriazolen • Alkylfenolen en alkylfenoletoxylaten • Organometalen: tin-verbindingen • Metalen: chroom, antimoon, kobalt, cadmium, arseen • Triclosan (biocide) • NPEO
PUR, PU ^T	<ul style="list-style-type: none"> • PBDE's en andere gebromeerde brandvertragers • Chloorparaffinen (gechloreerde brandvertrager) • Organofosfaten (brandvertragers) • Metaalhydroxiden van magnesium, aluminium en boor (brandvertragers) • PFAS • PAK • Organometalen: tin-verbindingen • Metalen: arseen, kwik • Benzotriazolen • NPEO • Bisfenolen • Ftalaten
ABS	<ul style="list-style-type: none"> • Benzotriazolen
PC	<ul style="list-style-type: none"> • PFAS • Benzotriazolen
POM	<ul style="list-style-type: none"> • Benzotriazolen
PMMA	<ul style="list-style-type: none"> • Benzotriazolen
PP	<ul style="list-style-type: none"> • PFAS • Metalen: cadmium, chroom, lood, antimoon, kobalt, tin • Triclosan (biocide)

Kunststofpolymeren	Stofgroepen
PE	<ul style="list-style-type: none"> • PFAS • Metalen: cadmium, chroom, lood, antimoon, kobalt, tin • Triclosan (biocide)
LDPE	<ul style="list-style-type: none"> • Metalen: arseen
HDPE	<ul style="list-style-type: none"> • PFAS (bijvoorbeeld in f-HDPE)
PET, polyester ^T	<ul style="list-style-type: none"> • PBDE's en andere gebromeerde brandvertragers • Chloorparaffinen (gechloreerde brandvertrager) • Organofosfaten (brandvertragers) • Metaalhydroxiden van magnesium, aluminium en boor (brandvertragers) • Antimoon (katalysator) • PFAS • Benzofenonen • Triclosan (biocide) • Chloorbenzenen • NPEO • Bisfenolen
PAN ^T	<ul style="list-style-type: none"> • PBDE's en andere gebromeerde brandvertragers • Chloorparaffinen (gechloreerde brandvertrager) • Organofosfaten (brandvertragers) • Metaalhydroxiden van magnesium, aluminium en boor (brandvertragers)
PA (incl. nylon) ^T	<ul style="list-style-type: none"> • PFAS • Triclosan (biocide) • NPEO • Bisfenolen • Gechloreerde fenolen

4 Vrijkomen en verspreiden van stoffen bij verbranding van kunststoffen

4.1 Introductie – verbranding in de open lucht

Het gebrek aan toegang tot inzameling van huishoudelijk afval in lage- en midden inkomenslanden, zorgt ervoor dat het verbranden in open lucht van (huishoudelijk) afval een gangbare praktijk is.[40] Ongeveer de helft van het totale huishoudelijke afval in deze landen wordt op deze manier verwerkt. Wereldwijd zullen volumes afval die in open lucht verbrand worden toenemen als er geen aanzienlijke gemeenschappelijke actie wordt ondernomen om de consumptie van kunststoffen te verminderen, en het afvalverwerkingsysteem in lage- en midden inkomenslanden te verbeteren.[41] Sommige landen die kunststofafval importeren, ondervinden reeds uitdagingen bij het beheer van hun eigen afvalstromen. De invoer van kunststofafval uit hoge-inkomenslanden voor recycling kan deze uitdagingen vergroten.[42] Voor textiel heeft de 'fast fashion' trend geleid tot een toename van de export. De aangeboden tweedehandskleding ondervindt concurrentie met laaggeprijsde fast fashion artikelen in de bestemmingslanden (in Afrika, Oost-Europa en Zuid-Azië).[43]

Open lucht verbrandingⁱ kan op kleine schaal plaatsvinden, bijvoorbeeld bij mensen thuis om te koken of te verwarmen, maar ook op grotere schaal bij stortplaatsen.[44],[45] Ook wordt het afval grootschalig verbrand om bijvoorbeeld pinda's te roosteren,[17] tofu te produceren[46] en water op te warmen in badhuizen.[16] Redenen voor verbranding zijn volume verkleining, insecten afstoting, warmtegeneratie en ook voor het vernietigen van pathogenen. Volume verkleining is echter verreweg de voornaamste reden.[47] Naast opzettelijk veroorzaakte branden kunnen er ook spontaan branden ontstaan met kunststofafval, die langdurig kunnen doorsmeulen, bijvoorbeeld op stortplaatsen.[48, 49] Tevens worden branden op stortplaatsen ook aangestoken om het volume van het afval te reduceren en zo het dumpen te vergemakkelijken.

Bij open lucht branden komen gevaarlijke stoffen vrij. In dit onderzoek zal niet worden ingegaan op klimaateffecten door uitstoting van broeikasgassen, zoals CO₂. De focus ligt op gevaarlijke stoffen voor mens en milieu. Allereerst is er onderzocht welke stoffen zijn gemeten bij branden met kunststof of kunststofhoudend materiaal. Vervolgens is literatuur van metingen op kleine schaal en onder gecontroleerde condities van branden per kunststofpolymeer, bestudeerd. Na de inventarisatie van de gevaarlijke stoffen die vrijkomen bij het verbranden van kunststofpolymeren (toegepast in kunststoffen en synthetisch textiel), zal ook de verspreiding en mogelijke blootstelling voor de mens en het milieu in dit hoofdstuk worden beschreven.

ⁱ Open lucht verbranding is dit rapport gedefinieerd als: het verbranden van materialen in de open lucht zonder dat de bijproducten, zoals emissies van gassen en as worden gemanaged. ²⁴

4.2 Vrijkomen van gevaarlijke stoffen

De gevaarlijke stoffen ontstaan als degradatieproducten bij branden en kunnen vrijkomen als rookgassen (vluchtige stoffen), rookstof (roetdeeltjes) of in assen achterblijven. Veel van deze stoffen zijn schadelijk voor mens en milieu.[50] De verspreiding van deze stoffen kan plaatsvinden via de lucht en/of als depositie worden afgezet op de bodem. De mate van verspreiding, de hoeveelheid en de samenstelling van deze stoffen hangt sterk af van de betrokken materialen bij de brand en het brandproces.

4.2.1 Metingen bij branden

De Milieuongevallen Dienst (MOD) van het RIVM heeft bij 50 branden in de periode van 1997-2007 en bij 132 branden in de periode 2008-2021 metingen verricht in of bij de rookpluim en/of in het bijbehorende gebied benedenwinds met het doel de risico's voor de gezondheid en het milieu te analyseren.[51, 52] In sommige gevallen is enkel de lucht bemonsterd voor analyse van vluchtige organische stoffen (VOS) en in andere gevallen is uitgebreider onderzoek gedaan, door middel van lucht-, veeg- en grasmonsters, naar onder andere VOS, elementen, PAK, dioxinen en aldehyden.

Branden – afhankelijkheid van condities

Branden variëren vaak in temperatuur, pluimvorming, duur etc. door de omstandigheden. Zo kan bijvoorbeeld de brandstof verschillen (kunststof, afval, banden, bouwmaterialen) en dit kan ook gedurende de brand veranderen, net zoals de aanwezige concentratie zuurstof. Waar sommige materialen snel vlamvatten en eerder opbranden zullen andere materialen mogelijk langer blijven branden of smeulen. Daarnaast zorgen externe condities, zoals wind, regen en blussen voor veranderende omstandigheden en bijvoorbeeld een grotere rookpluim of juist een lagere temperatuur en een smeulende brand. Over het algemeen zorgen smeulende branden voor een hogere concentratie van gevaarlijke stoffen die vaak ook nog eens minder ver verspreiden omdat de rookpluim lager blijft hangen.[53] Doordat open branden vaak onder ongecontroleerde omstandigheden plaatsvinden variëren de condities en daarmee de vorming, concentraties en verspreiding van gevaarlijke stoffen flink.

De metingen zijn bij veel verschillende branden uitgevoerd, niet alleen bij kunststofbranden. Over het algemeen worden bij branden met koolstofhoudende componenten, zoals kunststoffen, CO₂, CO, zwarte koolstof³ en roetdeeltjes gemeten. Ook andere koolstofhoudende reactieproducten, zoals aromatische verbindingen, alifatische verbindingen en zuurstofhoudende koolwaterstoffen komen vrij.[51, 52] Deze reactieproducten kunnen in gasvormige toestand voorkomen, maar ze kunnen ook gebonden zijn aan vrijkomende rookstofdeeltjes.

Daarnaast zijn veel voorkomende reactieproducten bij branden stikstofoxide, stikstofdioxide en zwaveldioxide. Ook metalen, zoals zink, koper, ijzer en lood blijken in verhoogde gehalten voor te komen in de

³Zwarte koolstof geeft roet de zwarte kleur en bestaat voor een belangrijk gedeelte uit (ultra) fijnstof en wordt (net als andere fijnstof) in verband gebracht met ademhalings- problemen, hartaanvallen en longkanker. [54]

bij de brand verspreide stofdeeltjes. In welke concentraties deze stoffen vrijkomen is sterk afhankelijk van de condities, zoals de temperatuur van de rookpluimstijging en weersomstandigheden. Deze variëren sterk bij ongecontroleerde open lucht branden en daarom bespreekt dit rapport de mate van emissie van stoffen kwalitatief.

Koolstofmonoxide (CO) kan in verhoogde concentraties voorkomen bij branden. Bij een sterke pluimstijging is deze concentratie vlak bij de brand nog verhoogd, maar op 350 meter afstand meestal al verdund tot het achtergrondniveau. Wanneer een brand echter smeult en de pluim minder hoog stijgt, vindt er minder verspreiding plaats en kan de concentratie CO hoger worden. Deze mindere mate van verdunning kan leiden tot verhoogde CO concentraties, zelfs op een grotere afstand van de brand.

Stikstofoxide (NO) en stikstofdioxide (NO₂) zijn niet in hogere concentraties gemeten. De verwachting is dat deze stoffen wél bij hoge temperaturen kunnen vormen tijdens de brand. Echter mede vanwege de grote warmte-inhoud bij branden vertonen deze stoffen een sterke pluimstijging, waardoor op leefniveau geen verhoogde concentraties waarneembaar zijn. Door de lage achtergrondconcentratie op leefniveau blijven de NO₂ waarden vaak onder de detectielimiet van ongeveer 1 parts per million (ppm) (meettechniek afhankelijk).

Bij verbranding van stikstofhoudende kunststofpolymeren kan ook **lachgas (N₂O) en blauwzuur (HCN)** worden gevormd. Lachgas is aanzienlijk minder toxisch dan stikstofdioxide en daarmee irrelevant bij de concentraties, die gewoonlijk vrijkomen bij branden. Daarnaast is de achtergrondconcentratie in de buitenlucht relatief hoog ten op zichte van NO en NO₂. Voor blauwzuur geldt dezelfde kanttekening als bij NO en NO₂, dat er sprake is van een relatief hoge detectielimiet ten op zichte van de 'natuurlijke' achtergrondconcentratie. Bij branden waar HCN wel is gemeten is dit soms in hoge concentraties. Deze concentraties blijven onder de levensbedreigende waarde, maar zijn hoog genoeg om effecten te verwachten bij langdurige inhalatoire blootstelling.[55] Zulke hoge concentraties zijn alleen gevonden in de rookpluim, dicht bij de brand. Het is niet mogelijk een link te leggen met het type verbrandde materialen en te herleiden welke stoffen de vorming van HCN veroorzaken.[56, 57]

De concentratie **Vluchtige organische stoffen (VOS)** is bij vrijwel alle branden met koolstofhoudende componenten verhoogd, net als CO. VOS-concentraties zijn relatief hoger bij branden met grote hoeveelheden brandbare koolwaterstoffen, zoals ook kunststoffen. Van de aromaten komt met name benzeen in de hoogste concentratie voor, gevolgd door styreen, toluen en naftaleen. Ook alifaten, zoals alkanen, alkenen (propeen), alkynen, aldehyden, alcoholen (ethanol) en ketonen (aceton) zijn waargenomen.

De concentraties **polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK)** die worden gemeten komen sterk overeen met de VOS, met name de (niet-gehalogeneerde) aromatische verbindingen.[51, 56] Bij de verbranding van kunststoffen zijn de gemeten PAK-concentraties hoger, net zoals bij de VOS. Belangrijker voor PAK-vorming is de

beschikbaarheid van zuurstof en de verbrandingstemperatuur. Bij lage verbrandingstemperaturen en verbranding in zuurstofarme omstandigheden wordt in verhouding meer PAK gevormd.

Dioxinen, waterstofchloride (HCl)^k en gechloreerde VOS kunnen ontstaan wanneer er materialen met chloorhoudende verbindingen en koolwaterstoffen worden verbrand, bijvoorbeeld PVC of materialen die 'chloorparaffinen' als additief bevatten. De mate waarin dioxinen worden gevormd hangt sterk af van de condities en met name de temperatuur van de brand aangezien ze vormen bij 200-500°C, maar bij hogere temperaturen weer worden afgebroken. Gechloreerde VOS zijn niet aangetoond door de MOD bij de onderzochte branden, al kunnen ze wel zijn gevormd in een concentratie beneden de detectielimiet. [51, 58, 59]

Fijnstof komt bij alle branden vrij. In tegenstelling tot CO, is bij de branden waarbij op grotere afstanden (≥ 1 km) is gemeten, de concentratie totaal- en fijnstof op 1-7 km afstand verhoogd ten opzichte van de achtergrondconcentratie. Op korte afstanden van de brandhaard < 200 m, is de grof stof (> 10 μm) licht hoger ten opzichte van de achtergrondwaarde, maar met name de fijnstof (< 10 μm) concentratie is sterk verhoogd (10 – 100 maal de achtergrondwaarde).[56]

Ook **metalen** zijn in verhoogde concentraties gemeten bij branden. Veel van de metalen worden echter herleid naar andere materialen dan kunststoffen. Zo worden lood en zink veel gebruikt in de bouw, koper in waterleidingen en elektriciteitsdraden, tin van legeringen en solderen en titanium in verf. Kunststoffen kunnen echter ook metalen, zoals titanium, barium en cadmium bevatten. Ook kunnen lood, zink, tin, calcium en aluminium aanwezig zijn in kunststoffen. Bij branden met kunststoffen zijn ook chroom en nikkel aangetroffen in verhoogde concentraties. Daarnaast komt ook antimoon, een veel gebruikte brandvertrager in textiel en kunststoffen, vrij bij branden. Op basis van de voornaamste bronnen voor deze metalen zijn met name titanium, barium, cadmium en antimoon te verwachten bij branden van kunststofafval.

4.2.2 *Zuivere kunststofbranden*

Naast onderzoek bij deze branden, is er voor verscheidene zuivere kunststoffen^l ook onderzoek gedaan onder gecontroleerde omstandigheden, vaak op kleine schaal.[60-62] De focus van deze onderzoeken lag met name bij de 'bekende' verbrandingsproducten zoals CO, CO₂ en NO_x (stikstofoxiden). Ook de mate waarin ze vrijkomen is onderzocht en emissiefactoren zijn bepaald. Deze gemeten factoren kunnen echter sterk variëren. Zo is er voor de emissie van NO_x, een toename van de emissiefactor van 10 tot 300 g gas/kg nylon (PA) gemeten, wanneer de temperatuur stijgt van 450 naar 600°C.[51, 63] Uit projecten zoals TOXFIRE en het STEP combustion project^m blijkt ook dat de emissiefactoren verschillen tussen deze gecontroleerde kleine

^k Bij sommige branden met chloorhoudende stoffen wordt HCl gas gevormd. Wanneer er daarnaast ook waterdamp vrij komt kan er zoutzuur, een oplossing van HCl in water, gevormd worden als dampen.

^l Zuivere kunststoffen zijn kunststoffen zonder toegevoegde additieven

^m In deze studies zijn emissies van diverse componenten gemeten bij verbranding van grotere hoeveelheden materialen. Hiermee is getracht om meer de werkelijkheid van een 'echte' brand te benaderen met simulatie-

schaal branden en grotere, minder gecontroleerde.[64, 65] Het verloop van de grote en kleine schaal branden is verschillend, lettende op de brand-gerelateerde parameters zoals snelheid van ontbranden, temperatuurontwikkeling, zuurstofgehalte. Tevens bleek het niet eenvoudig correctiefactoren te bepalen aan de hand van deze parameters om de getallen van de kleine schaal om te zetten naar de grote schaal. Er was geen duidelijke relatie te leggen tussen de brand-parameters en de emissiefactoren.

Additieven – effect op brandverloop

Deze onderzoeken zijn op basis van zuivere kunststoffen uitgevoerd, vaak omdat het type en de hoeveelheid additieven sterk kunnen verschillen per toepassing van de kunststof. Zoals in hoofdstuk 3 van dit rapport is besproken, blijken er vaak verscheidene additieven in significante hoeveelheden in textiel en kunststoffen te zitten. Naast het feit dat hieruit andere componenten vrij kunnen komen bij een brand dan uit de zuivere kunststof, kunnen de additieven ook zorgen voor andere brandomstandigheden (denk aan brandvertragers). Daarmee zorgen de additieven ervoor dat stoffen in een verschillende mate vrijkomen en dus de emissiefactoren anders zijn ten op zichte van een brand zonder de additieven. Dit maakt dat de emissiefactoren, gemeten op de kleine gecontroleerde schaal van de zuivere kunststoffen niet geheel representatief zijn voor de stoffen die vrijkomen bij een brand van kunststofafval.

De verbranding van PVC is van alle kunststoffen het meest onderzocht. Aan het begin juist met het oogpunt om afbraak door zonlicht en warmte tegen te gaan en daarna vanwege de gevaarlijke stoffen die vrijkomen, waaronder HCl en dioxinen. Vanwege het hoge chloorgehalte in zuiver PVC (56%), worden ook verscheidene andere chloorhoudende componenten gevormd tijdens de verbranding.[66] Enkele groepen zijn chloorhoudende aromaten, zoals chloor-benzeen, -styreen, -tolueen, -naftaleen, -bifenyl, -fenol en overige chloorhoudende koolwaterstoffen, zoals chloormetaan, vinylchloride en fosgeen. Bij de verbranding van PS, PU, ABS, PAN en PA is HCN gemeten en in al deze genoemde polymeersoorten, behalve PS, ook ammoniak (NH₃). Ook andere elementen die het polymeer bevat kunnen zorgen voor element specifieke emissie. Zo worden HCN en NH₃, nitrillen, aminen, isocyanaten, ureum en amino-PAK gevormd uit stikstofhoudende polymeren en worden aldehyden, alcoholen, fenol, furanen, carbonzuren, esters en methylmethacrylaat gevormd uit zuurstofhoudende polymeren.

Overige kunststoffen

In hoofdstuk 3 zijn de meest gebruikte en onderzochte kunststoffen genoemd in Tabel 1. De focus van dit onderzoek ligt bij deze kunststofpolymeren. Er zijn bijvoorbeeld ook stoffen die vrij kunnen komen uit zwavelhoudende kunststofpolymeren, zoals polyfenyleensulfide (PPS), zwaveldioxide (SO₂), zwavelzuur, waterstofsulfide, zwaveltrioxide, koolstofdissulfide en zwavelhoudende

experimenten. Bij het TOXFIRE project zijn chloorhoudende materialen, bestrijdingsmiddelen en andere chemicaliën onderzocht. In het STEP Combustion Project zijn naast chemicaliën en bestrijdingsmiddelen ook veel voorkomende kunststoffen meegenomen in het onderzoek.

PAK.[51] Deze kunststofpolymeren komen echter in veel mindere mate voor. Hierdoor is er minder onderzoek naar gedaan. Aangezien deze kunststofpolymeren slechts een klein of geen deel van de kunststof- en textielmarkt uitmaken, worden deze ook in veel mindere mate in het afval verwacht. De concentratie van de stoffen die bij het verbranden van deze specifieke kunststofpolymeren vrijkomen, is dan ook minimaal vergeleken bij de veel voorkomende kunststoffen. Er zijn ook fluorgebaseerde kunststofpolymeren (bv. PTFE), waaruit stoffen als waterstof- en carbonylfluoride kunnen vrijkomen. Daarnaast kunnen PFAS in kunststofpolymeren zitten[67] en in synthetische textielvezels[68]. In hoofdstuk 7 is een toelichting van de verwachte stoffen die vrij kunnen komen bij verbranding van PFAS houdende materialen gegeven.

4.2.3

Totaaloverzicht vrijkomende stoffen bij branden

Voor de duidelijkheid is ervoor gekozen om in dit rapport kwalitatief weer te geven welke componenten in welke mate vrij (kunnen) komen per kunststofpolymeer, rekening houdend met het type additieven dat wordt toegevoegd aan deze kunststofpolymeren, mits dit bekend is. Tabel 5 geeft een overzicht van de componenten die zijn gemeten per kunststofpolymeer.[44, 45, 69-71] Daarnaast is er in deze tabel beredeneerd, aangegeven met een a, welke stoffen additioneel vrij kunnen komen op basis van de additieven. In Tabel 4 staan de additieven waarvan bekend is dat deze aan de kunststofpolymeren kunnen worden toegevoegd. Dit is mogelijk geen volledige lijst en tevens zal niet elk product van een bepaald kunststofpolymeer dezelfde additieven in dezelfde hoeveelheid bevatten. De onvolledigheid in de lijst van mogelijke additieven per kunststof werkt daarom ook door in Tabel 5. Verder onderzoek naar mogelijke stoffen in de huidige kunststoffen op de markt kan nog meer stoffen en daarmee emissies identificeren.

De kwalitatieve weergave van de mate waarin een component of groep componenten wordt geëmitteerd bij verbranding van het kunststofpolymeer is aangegeven met de symbolen – tot +++. – betekent dat de stof niet gemeten is bij de verbranding van het kunststofpolymeer. Tevens wordt er ook niet verwacht dat deze groep stoffen wordt gevormd op basis van de additieven waarvan bekend is dat ze aan dit kunststofpolymeer worden toegevoegd. ± tot +++ is de mate waarin een stof vrij komt bij de brand, ± in de meest geringe mate tot +++ in de meeste mate. Aangezien additieven niet of nauwelijks zijn gemeten zijn er geen emissiefactoren voor en kan de mate waarin het vrijkomt daarmee niet worden vastgesteld. In de tabel is met een a aangeduid, dat op basis van de bekende additieven in het kunststofpolymeer, mogelijk deze componenten kunnen vrijkomen, hoewel deze niet zijn gemeten.

Vrijkomende stoffen bij branden van synthetisch textiel

Een inventarisatie van de stoffen in afgedankt textiel is reeds beschreven in 3.2.5. De kunststofpolymeren PET, PAN, PA, PUR en PVC zijn relevant voor textiel waarvan PET het meest voorkomende kunststof polymeer is in de sector. Bij de verbranding van afgedankt (consumenten)textiel worden dan ook de stoffen die vrijkomen uit deze polymeren verwacht. In Tabel 5 zijn deze polymeren aangeduid met een ^T. Omdat deze kunststofpolymeren koolstof bevatten, zal bij verbranding in de open lucht fijnstof, CO, NO_x, koolwaterstoffen (zowel aromatisch als alifatisch) en PAK vrijkomen. PET is daarnaast ook zuurstofhoudend en daardoor kunnen aldehyden, alcoholen, fenolen, furanen, carbonzuren, esters en methylmethacrylaat vrijkomen in grotere mate. Omdat PUR, PA en PAN stikstofhoudende polymeer zijn, kunnen er bij brand ook nitrillen, aminen, isocyanaten, ureum en amino-PAK gevormd worden. Daarnaast worden bij branden met deze kunststofpolymeren vaak HCN en NH₃ gemeten. Als laatste kan in textiel PVC voorkomen in bedrukking en in regenkleding. Hierdoor kunnen er chloorhoudende stoffen vrijkomen, zoals waterstof chloride, chloormethaan, vinylchloride en fosgeen, of worden gevormd, zoals PCB's en dioxinen. Daarnaast kunnen verschillende additieven worden toegevoegd tijdens het productieproces van textiel, zoals in Tabel 4 is weergegeven. Op basis daarvan kunnen stoffen als ftalaten, gechloreerde of gebromeerde aromaten, alkanen en alkenen en metaaloxiden en verbindingen vrijkomen.

Tabel 5 Stoffen die vrijkomen bij verbranding van verschillende soorten kunststof [44, 45, 69-71]. – niet gemeten bij verbranding. ± vrijkomen in geringe mate, + in redelijke mate, ++ in hoge en +++ in zeer hoge mate. 'a' niet gemeten maar kunnen mogelijk vrijkomen door additieven. Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.

	Aldehyden en ketonen ¹	Alifatische koolwaterstoffen ²	Aromatische koolwaterstoffen ³	CO	HCl	HCN	NO _x	Alcoholen, cresolen en alkyfuranolen	Aminen en andere nitrilen	Bi- en terfenylen	Carbonzuren	Esters	Fenolen	Ftalaten	Furanen	Fosgeen	Organobroomverbindingen ⁴	Gechloreerde verbindingen ⁵	Waterstofbromide (HBr)	Isocyanaten	Methylmethacrylaat	NH ₃	Organofosforverbindingen	Ureum, Quinolines en azareenen	Vinylchloride en Chloor	Fijn stof	PAK	Gechloreerde PAK	Amino-PAK	Dioxinen	Broomdibenzodioxinen en -furanen	PCB' s	Metaaloxiden en -verbindingen
PE	+	+	++	++	-	-	±	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	a
LDPE	+	+	++	++	-	-	±	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	a
HDPE	+	+	++	++	-	-	±	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	a
PP	+	+	++	++	-	-	±	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	a
PS	+	+	++	++	a	++	±	-	-	-	-	-	+	-	-	a	a	a	a	-	-	-	a	-	a	+++	+++	a	-	a	a	a	a
PET ^T	++	+	++	++	a	-	±	+	-	+	+	+	+	-	+	a	a	a	a	-	+	-	a	-	a	+++	+++	a	-	a	a	a	a
PMMA	++	+	++	++	-	-	±	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	-
POM	++	+	++	++	-	-	±	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	-
PC	++	+	++	++	-	-	±	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+++	+++	-	-	-	-	-	-
PVC ^T	+	+	++	++	++	-	±	-	-	-	-	-	-	a	-	+	a	++	a	-	-	-	a	-	+	+++	+++	++	-	++	a	++	a
PU(R) ^T	+	+	++	++	a	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	a	a	a	a	+	-	++	a	+	a	+++	+++	a	+	a	a	a	a
ABS	+	+	++	++	-	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	++	-	+	-	+++	+++	-	+	-	-	-	-
PAN ^T	+	+	++	++	a	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	a	a	a	a	+	-	++	a	+	a	+++	+++	a	+	a	a	a	a
PA ^T	+	+	++	++	a	++	++	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	a	-	+	-	++	-	+	a	+++	+++	a	+	a	-	a	a

¹ Formaldehyde, acetaldehyde, acroleïne, aceton, acetofenon

² Alkanen en derivaten, cyclische alkanen, alkenen, alkyne en derivaten

³ Benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, styreen, isobutyleen

⁴ Gebromeerde alkanen, alkenen en aromaten

⁵ Gechloreerde alkanen, alkenen en aromaten

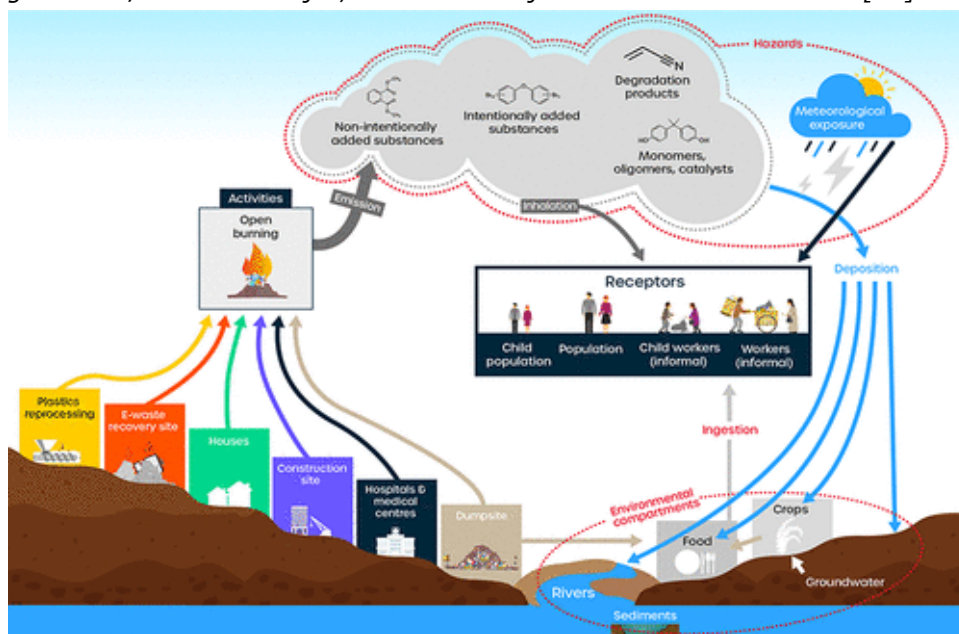
4.3 Verspreiding van gevaarlijke stoffen

Door de verspreiding van de vrijgekomen stoffen door de lucht kan men blootgesteld worden aan gevaarlijke stoffen. De stoffen die bij een brand ontstaan kunnen gasvormig zijn, maar ook in vaste vorm vrijkomen, gebonden aan roet of (fijn) stofdeeltjes. Hierdoor kunnen gevaarlijke stoffen zich verspreiden over het gebied benedenwinds van de brand.[72]

Los van de verspreiding van stoffen in de lucht, wordt ook regelmatig de as gebruikt als meststoffen over het land.[44] Dit kan betrekking hebben op kleine huishoudens met een klein stukje grond of boeren met een groter land. Hierdoor kunnen op het land hoge concentraties van stoffen, die in de as zitten, aanwezig zijn. Figuur 6 geeft een overzicht van deze blootstellingsroutes.[40]

Mensen en dieren kunnen blootgesteld worden aan de stoffen door inademing. Daarnaast kunnen met name kinderen via hand- mond contact met grond ook in aanraking komen met de depositie (het neerslaan van stoffen op de bodem) en de assen. Blootstelling kan ook plaatsvinden door consumptie van voedsel of water dat vervuild is met depositie of de assen. Naast deze directe blootstelling, kan de depositie of assen ook worden opgenomen door planten of dieren die vervolgens worden gegeten door mensen of roofdieren (ingestie).[73]

Figuur 6 Overzicht van blootstellingsroutes aan bij een brand vrijkomende gassen en/of vaste deeltjes, zoals roet of fijnstof. Bron: Velis en Cook.[40]



Algemene bevindingen vanuit onderzoek van de MOD bij 'open' branden is dat vanaf 1 km er niet of nauwelijks nog verhoogde waarden van gevaarlijke stoffen zijn, zowel in de lucht als in depositie. Dit geldt wel voor een 'normale' brand, dus niet uitzonderlijk grote branden of branden met speciale kenmerken. Denk hierbij aan zeer grote branden, branden van lange duur (6 tot 40 uur), heftige rookontwikkeling of langdurig nablussen. Dichtbij de brand kan er soms wel een 1000 hogere concentratie van stoffen zijn dan de achtergrondwaarde. Tijdens de smeulfase stijgt in tegenstelling tot een felle

brand de rookpluim nauwelijks, waardoor er minder verspreiding is en hogere concentraties van stoffen op leefniveau. De aanwezigheid van kunststoffen kan leiden tot verhoogde concentraties van bepaalde stofgroepen, zoals dioxines, VOS en PAK. Deze zijn met name verhoogd in het benedenwinds gebied in de nabijheid waar de verbranding plaatsvindt.

Bij de branden waarbij wél licht verhoogde concentraties van metalen en PAK gemeten zijn buiten de 1 km of tussen de 300 meter en 1 km, blijven deze waarden onder het maximaal toelaatbaar risico en zelfs vaak onder het verwaarloosbaar risico.ⁿ Tevens blijven de concentraties binnen de veevoedernormen en is de verwachte inname onder de gezondheidskundige waarde van de corresponderende blootstellingsroute via inademing, hand-mond gedrag en gewas consumptie. Alleen de concentraties van dioxinen overschrijden in sommige gevallen de veevoedernorm. Blootstelling aan deze concentratie dioxinen via inademing of ingestie leidt in de praktijk niet tot een gezondheidsrisico, echter kan het advies bij besmetting van gras of gewassen zijn deze tijdelijk niet te consumeren wanneer deze in het effectengebied liggen. Het effectgebied bevindt zich veelal op minder dan 1 km benedenwinds van de brand. Bij ongecontroleerde open verbranding van afval, zullen niet altijd zulke adviezen worden opgevolgd of afgegeven. Daardoor kunnen er mogelijk wel (gezondheids-)effecten zijn. De kans hierop is nog aannemelijker wanneer branden vaker op dezelfde plaats voorkomen, zoals ongecontroleerde branden op een stortplaats, en stoffen kunnen ophopen.

In het geval van branden van kunststof kan de mate van blootstelling van mens en milieu sterk variëren. De kans op blootstelling hangt af van de meteorologische omstandigheden, grootte en temperatuur van de brand en het type materiaal dat brandt. Dit laatste wordt niet alleen beïnvloed door de kunststof maar ook in grote mate door de toegevoegde additieven, zoals brandvertragers die een ander type brand veroorzaken.

In algemene zin, hoe verder weg van de brand hoe lager de concentraties van de stoffen waaraan mens en milieu worden blootgesteld. Wanneer men zich echter dicht op de brand bevindt kunnen de concentraties van stoffen aanzienlijk hoog en schadelijk zijn. Dit effect wordt nog versterkt wanneer het een 'overdekte' ruimte betreft. Dit kan bijvoorbeeld spelen bij huishoudens of bij de eerder genoemde badhuizen die vaak niet volledig afgesloten, maar wel (gedeeltelijk) overdekt zijn. De mensen met de grootste blootstelling zijn daarmee de medewerkers van bijvoorbeeld de badhuizen, tofu makers en een grote groep afvalsorteerders. Deze laatste groep loopt vaak op dumpplaatsen rond om bepaalde soorten afval eruit te pikken, terwijl delen van de afvalstort aan het smeulen zijn. Een conservatieve grove schatting is dat zo'n 11.4 miljoen afval sorteerders, 'waste pickers', dicht bij de dumpbranden werken en aan de rook worden blootgesteld.[40, 75]

ⁿ Het maximaal toelaatbaar risiconiveau (MTR) is de concentratie van een stof in het milieu waarbij mens en ecosysteem geen nadelige effecten ondervinden. De streefwaarde, ook wel het verwaarloosbaar risico (VR) genoemd, is de concentratie van een stof in het milieu waarbij risico's voor mens en ecosysteem verwaarloosbaar zijn. [74] Voor PAK en metalen is de MTR het extra risico op kanker 1 per miljoen levenslang blootgestelden (10^{-6}) en het VR 10^{-8} .

5 Vrijkomen en verspreiden van stoffen bij storten van kunststoffen

5.1 Introductie – storten van kunststoffen

5.1.1 *Afbraakprocessen*

Bijna de helft (43%) van het wereldwijde kunststofafval dat niet gecontroleerd wordt verwerkt komt terecht op stortplaatsen.[4] Dit kunnen stortplaatsen of open dumpplaatsen zijn, beide zonder maatregelen om mens en milieu te beschermen.

Op een stortplaats vinden allerlei processen plaats waarbij (een deel van het) afval afbreekt door fragmentatie (verwering) en biotische en abiotische mineralisatie. Afbraak in een stortplaats start met aerobe (bio)degradatie, maar zodra het afval wordt afgedekt met aarde of nieuw afval, of onder water komt te staan door regen zal dit verder gaan als anaerobe degradatie.[76] De anaerobe afbraak wordt beïnvloed door fluctuerende temperaturen en zuurgraad in de stort, ondergrondse brandhaarden, fysische wrijving en druk, en (beperkte) microbiële activiteit.

Uit een stortplaats komen percolaat en stortgassen vrij. Percolaat is vervuild water dat ontstaat wanneer regenwater door het afval in de stortplaats sijpelt. Stortgassen bestaan uit stoffen die uitdampen en gassen die ontstaan bij (afbraak)reacties in de stort.

Kunststoffen in een stort breken (zeer) langzaam af, waarbij de polymeerketen breekt of de kunststof in kleinere delen uiteenvalt. De afbraak is onder andere afhankelijk van eigenschappen van het polymeer, zoals het molecuulgewicht, kristalliniteit, en additieven aanwezig in de kunststoffen. PE, het meest gebruikte kunststofpolymeer, breekt slecht af en hoopt daarom op in stortplaatsen. PA, zoals nylon, breken beter af.[76]

Ook kan kunststof door bijvoorbeeld verwaaiing of afspoeling buiten de stortplaats in het milieu terecht komen en zich daar verder verspreiden. Daarnaast kunnen dieren of mensen kunststoffen meenemen vanaf de stortplaats. Een groot deel van de kunststoffen in het milieu komt uiteindelijk in water terecht, bijvoorbeeld in rivieren of de zee. Zoals aangegeven in paragraaf 1.3 wordt textielafval soms lokaal gedumpt, bijvoorbeeld door verkopers van de tweedehandsmarkten die onverkooptbare en verknipte artikelen weggooien. Dit textielafval komt hierdoor terecht in rivieren en via open rioleringen op stranden en in zee. Kunststoffen in het milieu kunnen zorgen voor verstikking van (zee)dieren. De macroplastics kunnen ook afbreken tot microplastics. Ondanks dat het jaren duurt voordat kunststoffen onder natuurlijke omstandigheden afbreken tot microplastics, wordt dit wel als een van de primaire bronnen van microplastics in het milieu beschouwd.[77] Op de verspreiding van macroplastics in het milieu en directe en indirecte milieueffecten daarvan is in dit rapport niet verder ingegaan.

In dit hoofdstuk gebruiken we de term 'stortplaatsen' en is beschreven hoe materialen kunnen afbreken en stoffen vrij kunnen komen en zich verspreiden. Op open dumpplaatsen (bijvoorbeeld langs oevers en stranden) zullen naar verwachting grotendeels dezelfde processen plaatsvinden, echter kunnen de omstandigheden anders zijn (bijvoorbeeld andere temperatuur, meer contact met oppervlaktewater) waardoor afbraakprocessen beïnvloed worden.

Microplastics

Microplastics zijn deeltjes van kunststof kleiner dan 5 millimeter (mm). Kunststoffen fragmenteren na verloop van tijd en worden uiteindelijk microplastics. Dat geldt ook voor synthetisch textiel, dat daarnaast ook gedurende de gehele gebruiksfase (bijvoorbeeld bij het wassen) microvezels los laat.[78] Als gevolg van het storten van kunststof en textiel ontstaan microplastics die zich kunnen verspreiden in het milieu.

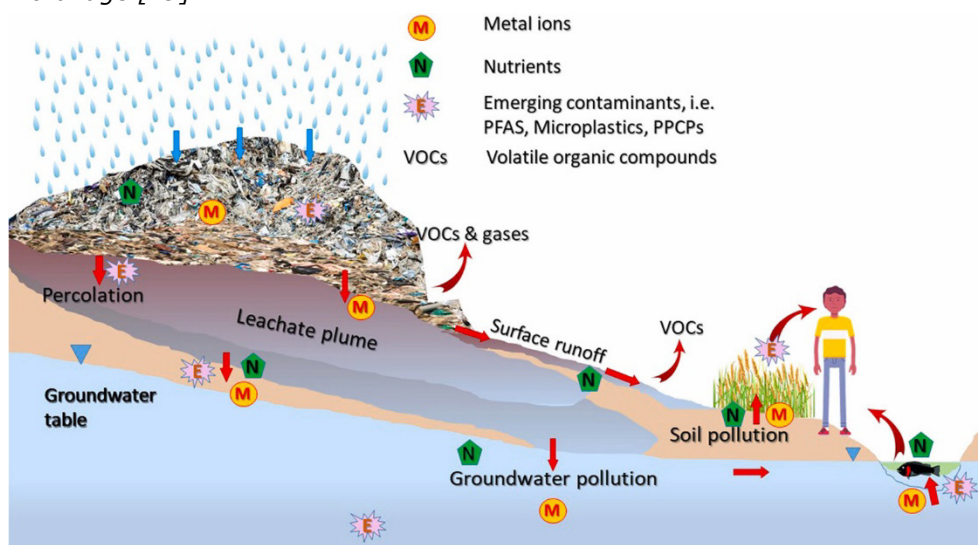
De additieven die in kunststoffen aanwezig zijn, zitten ook in de microplastics die ontstaan. Daarnaast kunnen stoffen zich ook aan microplastics hechten. Op die manier verspreiden additieven en andere stoffen zich door middel van microplastics zich in het milieu.

5.1.2

Blootstellingsroutes van stoffen als gevolg van het storten van kunststoffen

De langdurige aanwezigheid van kunststoffen in stortplaatsen leidt tot het vrijkomen van additieven, het vormen van afbraakproducten en fragmentatie van het kunststof tot microplastics.[76] Chemische stoffen en microplastics in het percolaat en de gassen kunnen zich verspreiden in de omgeving, wat kan leiden tot milieueffecten en blootstelling van de mens. In de figuur hieronder is de verspreiding van stoffen uit de stortplaats in het milieu weergegeven.

Figuur 7 Blootstellingsroutes van stoffen die uit kunststoffen in stortplaatsen vrijkomen. Bron: Wijekoon, Koliyabandara, Cooray, Lam, Athapattu and Vithanage.[79]



De focus van dit onderzoek ligt op gevaarlijke stoffen voor mens en milieu. Er is in kaart gebracht welke stoffen er uit kunststoffen kunnen logen die worden gedumpt op stortplaatsen. Hierover is weinig specifieke informatie beschikbaar, omdat stortplaatsen bijna altijd bestaan uit gemengde afvalstromen. Daarom is eerst gekeken hoe uitloging plaatsvindt en van welke stoffen bekend is dat zij uit kunststoffen kunnen logen (paragraaf 5.2). Daarna is beschreven welke stoffen er zoal in stortplaatspercolaat worden aangetroffen, en welke daarvan mogelijk uit kunststoffen komen (paragraaf 5.3). Vervolgens is de vorming van stortplaatsgassen beschreven (paragraaf 5.4) en de verspreiding van deze gassen (paragraaf 5.5). Tot slot zijn de resultaten samengevat in paragraaf 5.6 met een overzicht van kunststofpolymeren en stoffen die vrij kunnen komen via uitloging. Er zal beperkt worden ingegaan op de effecten van microplastics.

5.2 Vrijkomen van additieven door uitloging naar percolaat

Uitloging

Chemische stoffen die aanwezig zijn in kunststoffen (zie paragraaf 3.2) kunnen hieruit migreren en zo terecht komen in de omgeving. Bijna alle kunststofadditieven zitten niet gebonden aan de polymeermatrix, en kunnen daarom migreren en in het percolaat terecht komen.[80] Daarnaast breken door verwerking de polymeerketens in kunststoffen, waardoor ook gebonden additieven makkelijker vrijkomen.[81]

Toelichting uitlogingsmechanismen

Er is veel onderzoek gedaan naar de migratie van stoffen uit kunststoffen, onder andere in het kader van voedselveiligheid waarbij wordt gekeken naar migratie van stoffen uit voedselverpakkingen naar voedsel. Hieruit blijkt dat het migratieproces uit vier stappen bestaat[82]:

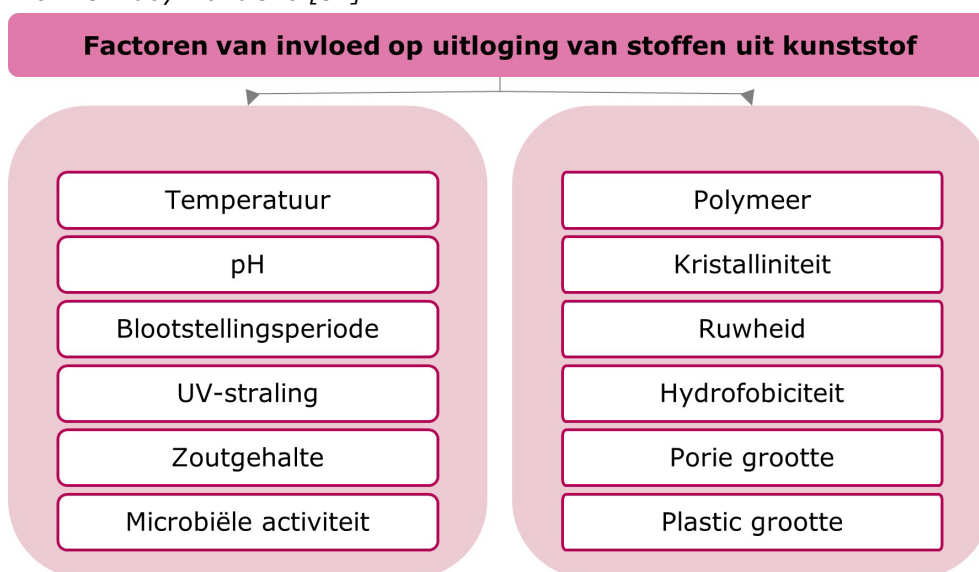
1. Diffusie van chemische stoffen door het polymeer
2. Desorptie van stoffen vanuit de polymeeroppervlakte
3. Sorptie van de stoffen op het snijvlak tussen polymeer en de omliggende matrix (bv. voedsel, bodem of water)
4. Adsorptie van de stof in de matrix.

De migratie van stoffen is onder andere afhankelijk van molecuulgrootte. Kleine moleculen, zoals bijvoorbeeld oplosmiddelen, migreren snel. Dit is bijvoorbeeld bekend voor formaldehyde, vinylchloride en ethyleen. Grote moleculen, zoals pigmenten, migreren langzamer en zijn ook bedoeld om lang in het materiaal aanwezig te blijven. Naast molecuulgrootte zijn ook de porositeit en dikte van het kunststof en de verwerking ervan belangrijk.[81] Naast eigenschappen van het kunststof zijn omgevingsfactoren van belang voor de mate van uitloging. In Figuur 8 zijn alle factoren samengevat. In Tabel 6 is, op basis van een tweetal belangrijke overzichtsstudies, een overzicht gegeven van additieven en andere stoffen waarvan het aangetoond is dat deze migreren uit bepaalde kunststofproducten.

Opgemerkt wordt dat deze overzichtsstudies gegevens van allerlei verschillende uitloogstudies hebben verzameld. De studies hebben onderzoek gedaan naar uitloging van stoffen uit kunststofproducten. Sommige stoffen waarvan is aangetoond dat ze uitlogen uit een bepaald

kunststofproduct worden in die specifieke producten toegevoegd als additief, of zitten als verontreiniging in of op een polymeer(product). Dit geldt bijvoorbeeld voor ftalaten in PE, die naar voren komen uit een onderzoek naar PE-landbouwplastic.[83] Ook veel PAK zijn een verontreiniging vanuit het productieproces van kunststoffen, of zijn tijdens de levensduur of vanuit het milieu aan het kunststof gehecht.[34] Of de stoffen in de tabel ook uitlogten uit (heterogeen) kunststofafval en onder de omstandigheden in een stortplaats in onbekend, maar wel aannemelijk.

Figuur 8 Factoren van invloed op de uitloging van additieven uit kunststoffen. Bron: Omidoyin and Jho.[34]



Tabel 6 Stoffen waarvan is aangetoond dat deze uitlogten uit bepaalde kunststofproducten in het milieu. Bronnen: Maddela, Kakarla, Venkateswarlu and Megharaj[81] en Omidoyin and Jho.[34] Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.

Kunststof-polymeer	Stofgroep	Stoffen	Medium	Bron
PVC	Fenolen	Bisfenol A (BPA)		1
	Ftalaten	Dimethylftalaat (DMP), di-ethylftalaat (DEP), DBP, DEHP	Water (2)	1, 2
	Tinverbindingen	Monobutyltin (MBT), dibutyltin (DBT), Dimethyltin (DMT)	Zeewater (2)	1, 2
PE	Ftalaten	DiBP, DMP, di-n-octylftalaat (DnOP), bis(2-ethylhexyl)adipaat (DEHA), DEP, DBP, BBP	Bodem (2)	1, 2
	PAK		Bodem	2
	Metalen	Aluminium, zink, chroom, koper, lood, arseen	Zeewater	2
LDPE	-	Hexanoyl fluoride	Water	2
	-	(2,2-dimethyl-1,3-dioxolan-4-yl) methanol	Water	2
	-	Penta-ethyleenglycol	Water	2
	(monomeer)	Azacyclotridecan-2-one	Water	2

Kunststof-polymeer	Stofgroep	Stoffen	Medium	Bron
	(monomeer)	11-aminoundecanoic acid	Water	2
	-	Ethyl 2-fluoroacetaat	Water	2
HDPE	-	Hexanoyl fluoride	Water	2
	(monomeer)	11-aminoundecanoic acid	Water	2
	(monomeer)	Azacyclotridecan-2-one	Water	2
	(monomeer)	12-aminododecanoic acid	Water	2
	-	(2E,6Z)-dodeca-2,6-dienol	Water	2
Mix van PE + nylon (PA)	Fenolen	4-n-nonylfenol (4-NP), para-tert-octylfenol, 2-tert-butyl-4-methoxyfenol, 2,4-dinitrofenol	Zeewater	2
	Fosfaten	Triethylfosfaat (TEP), trifenylfosfaat (TPP), tris(2-chloorethyl)fosfaat (TCEP), tris(1,3-dichloor-2-propyl)fosfaat (TDCPP), difenyl fosfaat (DPP), cresyldifenylfosfaat (CDP)	Zeewater	2
	Quinonen	2,5-di-tert-butylhydrochinon (DTBHQ), Solvent Blue 35	Zeewater	2
	Benzothiazolen	2-methylthio-benzothiazool, (2'-hydroxy-5'-methylfenyl)benzotriazool (UV-P)	Zeewater	2
	Benzofenonen	Oxybenzon	Zeewater	2
	-	Stearinezuur	Zeewater	2
PET	Metalen	Antimoon	Water	2
PP	Fosfaten	TEP, triisobutylfosfaat (TIBP), TPP, trifenylfosfineoxide (TPPO), DBP, bis(2-ethylhexyl)fosfaat (DEHPA), CDP	Zeewater	2
	Ftalaten, o.a.	DEHP, bis(2-ethylhexyl)isoftalaat (DEHIP), bis(2-n-butoxyethyl)ftalaat (DBEP), DEP	Zeewater	2
	Quinonen	DTBHQ	Zeewater	2
	Aromatische koolwaterstof	p-Cymeen	Zeewater	2
	Ketonen	1-cyclohexylethanon	Zeewater	2
	Fenolen	2,4-dinitrofenol, 4-NP, 3-tert-butyl-4-hydroxyanisol	Zeewater	2
	Benzofenonen	Oxybenzon	Zeewater	2
	Benzoaten	2-ethylhexyl benzoaat	Zeewater	2
PS	Gebromeerde brandvertragers	PBDE's, decabroomdifenylether (BDE-109), tetrabroombisfenol A (TBBP-A), tetrabroombisfenol A-bis(2,3-dibroompropylether) (TBBPA-BDBPE)	Water (2)	1, 2
	Aromatische koolwaterstof.	Benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, styreen (BTEXS), isopropylbenzeen, en isopropyltolueen	Voedsel	2
PU	Fosfaten	Tris(1-chloor-2-propyl)fosfaat (TCPP)	Water	2
PC	Benzofenonen	4,4'-dihydroxybenzofenon	Water	2

Kunststof-polymeer	Stofgroep	Stoffen	Medium	Bron
	-	4-hydroxybenzoëzuur	Water	2
	-	methylparabeen	Water	2
	Fenolen	BPA	Water	2
	Ftalaten	DBP	Water	2
ABS		Acrylonitril	Water	2

Stoffen in percolaat

Het percolaat van stortplaatsen kan, afhankelijk van het afval, zeer vervuild zijn en een grote verscheidenheid aan stoffen bevatten. De stoffen kunnen in vier groepen verdeeld worden: opgelost organisch materiaal, anorganische componenten, zware metalen en xenobiotische organische stoffen.[79] Er is veel onderzoek gedaan naar chemische stoffen in stortplaatspercolaat, maar deze zijn niet goed terug te herleiden naar de bronnen van deze stoffen, oftewel of deze uit kunststoffen dan wel textiel afkomstig zijn. Stoffen in percolaat die aan kunststoffen te relateren zijn betreffen (nonyl)fenolen, waaronder BPA, en ftalaten.[76, 84]. TCPP, een gechloteerde fosfaatester, kan uitloggen uit PUR-producten. Deze stof komt voor als brandvertrager in matrasschuimen van polyurethaan, als er brandveiligheidseisen van toepassing zijn. In consumentenmatrassen voor de Nederlandse markt zijn geen brandvertragers toegepast.[37] De concentraties van stoffen in het percolaat is gerelateerd aan de hoeveelheden microplastics in percolaat, omdat hierin ook de additieven aanwezig zijn.

Bij stortplaatsen met veel elektronisch afval zijn onderzoeken gedaan naar de effecten op het milieu en de mens.[85] Dit afval bestaat voornamelijk uit kunststoffen en metalen. Gevaarlijke stoffen die in het percolaat van e-waste stortplaatsen worden aangetroffen en daar mogelijk vanuit de kunststoffen in terecht zijn gekomen, zijn: PCB's, PBDE's, antimoon, koper en lood.[85]

5.3 Verspreiding van stoffen uit percolaat

Kunststofadditieven zijn aangetoond in oppervlaktewater (waaronder de zee), sedimenten, afvalwater, slib, bodem, stof en stortplaatspercolaat.[81] Het percolaat van stortplaatsen is bekend als een belangrijke bron van grondwaterverontreinigingen van mobiele stoffen.[86] Door stroming van het grondwater kunnen verontreinigingen getransporteerd worden naar de omgeving van de stortplaats. Vanuit het grondwater kunnen stoffen worden opgenomen door planten en bodemfauna en zo kunnen stoffen in de voedselketen terecht komen en biomagnificeren.^o Ook kan het grondwater gebruikt worden als drinkwater, of naar het oppervlaktewater stromen.

De concentraties van stoffen in het grondwater worden beïnvloed door verschillende processen, zoals fysische (bv. verdunning), fysisch-chemische (bv. sorptie), chemische (bv. neerslaan) en microbiële (bv. afbraak) processen. Verdunning van de percolaatpluim met het grondwater is relevant voor alle stoffen die erin aanwezig zijn. De verdunning is afhankelijk van stroming van de aquifer

^o Biomagnificatie is het toenemen van de concentratie persistente stoffen in organismen wanneer deze hoger in de voedselketen zitten.

(grondwaterlichaam), die wordt bepaald door de hydrogeologie van het gebied, de viscositeit en de dichtheid van de grondwaterpluim. Door sorptie kunnen stoffen aan organisch materiaal in de bodem hechten. Hoe sterk stoffen hechten hangt af van de stoffeigenschappen. Sorptie is een evenwichtsreactie, dus de stoffen kunnen ook weer in het grondwater terecht komen (nalevering). Chemische en afbraakprocessen zijn sterk afhankelijk van de stof, maar ook van omgevingsfactoren.[86]

In het percolaat van stortplaatsen komen ook microplastics terecht. Microplastics bevatten additieven, maar kunnen ook chemische stoffen 'vervoeren' doordat deze absorberen aan de microplastics. Zo kunnen organische verontreinigingen en zware metalen makkelijk aan microplastics binden. De microplastics kunnen de stoffen over grote afstanden verplaatsen en terecht komen in organismen of andere milieucompartimenten.[76]

Belangrijke stoffeigenschappen voor de verspreiding van stoffen, en uiteindelijk de mate van blootstelling, zijn de persistentie, de mobiliteit en in hoeverre stoffen bioaccumulatief zijn. Daarbij wordt opgemerkt dat door de jarenlange uitloging van stoffen uit een stortplaats ook stoffen die niet persistent zijn kunnen zorgen voor chronische blootstelling. Daarnaast zijn de gevaarseigenschappen (toxiciteit) van een stof van invloed op het uiteindelijke risico van de blootstelling. In Tabel 3 in paragraaf 3.2 zijn de stoffeigenschappen weergegeven voor de belangrijkste groepen kunststofadditieven. Hieronder is voor een aantal belangrijke stofgroepen de verspreiding in het milieu verder toegelicht.

Ftalaten en fenolen worden aangetroffen in de bodem in de directe omgeving van stortplaatsen in orde grootte mg/kg.[84] Ftalaten blijven in de bodem aanwezig door de benzeenring en sterke hydrofobe eigenschappen.[84] Voor fenolen varieert de mobiliteit in de bodem, voor bijvoorbeeld BPA is de mobiliteit in de bodem beperkt, terwijl DMP en DEP niet makkelijk binden aan organisch materiaal en zich daardoor verspreiden met het grondwater.[84] Het is dus te verwachten dat ftalaten dicht bij de stortplaats in de bodem blijven, terwijl sommige fenolen zich verspreiden. Door de verspreiding nemen concentraties af.

Metalen breken niet af en kunnen zich verspreiden in de bodem. Onder zure omstandigheden, zoals veelal in een percolaatpluim, zijn metalen mobieler. De metalen kunnen door planten worden opgenomen en in de voedselketen terecht komen.[79]

PCB's zijn slecht oplosbaar en binden makkelijk aan organisch materiaal. Daardoor hechten ze aan de bodem en komen ze beperkt in het grondwater terecht. De PCB's blijven veelal in de bovenste bodemlagen en kunnen worden opgenomen door planten, en mensen die met de bodem in aanraking komen kunnen zo worden blootgesteld aan PCB's. Maar PCB's kunnen zich ook binden aan organische deeltjes in het percolaat en zich zo verspreiden naar het grondwater.[87]

Polygebromeerde difenylethers (PBDE's) zijn net als PCB's slecht oplosbaar en verspreiden zich vooral door adsorptie aan opgelost organisch materiaal.[88]

5.4 Vrijkomen van stortplaatsgassen

Uit een stortplaats komen gassen vrij. Deze gassen komen diffuus over de hele stortplaats vrij, maar er kunnen ook 'kanalen' ontstaan in het afval waardoor er puntbronnen of hotspots kunnen ontstaan.

Gassen die vrijkomen bij de anaerobe afbraak van in stortplaatsen aanwezig afval zijn koolstofdioxide, methaan en VOS.[76] De afbraakproducten zijn afhankelijk van het afval en de afbraakomstandigheden, zoals temperatuur en zuurstof. Vooral de afbraak van organisch afval leidt tot stortplaatsgassen als methaan en CO₂.

Voor kunststoffen zijn de polymeren en hun additieven bepalend voor welke afbraakproducten vormen. Ook de ouderdom en daarmee de afbraak zijn bepalend voor de gassen die vrijkomen. In het lab is aangetoond dat afbraak van kunststoffen kan leiden tot emissie van VOS.[89] Daarnaast kunnen polyolefinen (waaronder PE en PP) bijvoorbeeld zorgen voor het vrijkomen van aromatische stoffen, zoals PAK. Andere polymeren leiden tot minder uitstoot, zoals bijvoorbeeld voor PET is aangetoond.[76]

In een stortplaats kan de temperatuur oplopen onder invloed van het weer en stortplaatsprocessen. Dit kan thermische afbraak van kunststoffen veroorzaken, waarbij gassen vrijkomen. Zo kunnen kunststoffen die stikstof bevatten, zoals nylon, PU's en PAN (acrylvezel), waterstofcyanide (HCN) vrijgeven bij thermische afbraak. Bij de thermische afbraak van chloorhoudende kunststoffen, zoals PVC, kunnen HCl en dioxinen worden geproduceerd.[82] In hoeverre deze stoffen in de praktijk gevormd worden en vrijkomen op stort- of dumpplaatsen is onbekend.

Naast afbraak kan er ook sprake zijn van uitdamping van stoffen uit de kunststoffen, zoals bijvoorbeeld voor PCB's en gebromeerde brandvertragers (PBDE's) is aangetoond. Deze stoffen kunnen zowel als gas als gebonden aan fijnstof vrijkomen.[87, 88]

Het RIVM heeft voor het opstellen van het beoordelingskader van veilige recreatie op oude stortplaatsen literatuuronderzoek gedaan naar beschikbare metingen van stoffen in stortgassen.[18] Daarin zijn rond de 100 stoffen geïdentificeerd die in een range van 0 tot ca 10.000 µg/m³ voorkomen in het stortgas. Deze gerapporteerde concentraties zijn in het onderzoek vergeleken met chronische en acute grenswaarden. Chronische blootstelling komt alleen voor bij een (selecte) groep mensen die permanent op een stortplaats verblijven. Voor stortgas zijn zo'n 33 prioritaire stoffen geïdentificeerd. Stoffen die te relateren zijn aan kunststoffen zijn onder meer vinylchloride en acrylonitril. Daarnaast worden ook benzeen, toluen, xylenen en andere structuren die onderdeel uit kunnen maken van kunststofmonomeren als relevant beschouwd. Deze kunnen bijvoorbeeld vrijkomen door afbraak van PVC of PS.

Met de stortplaatsgassen kunnen ook microplastics meekomen en zo verspreiden in het milieu.[76] De additieven in de microplastics komen zo ook in de omgeving terecht.

5.5 Verspreiding aan stortplaatsgassen

Vergelijkbaar met de blootstelling aan gassen die vrijkomen bij verbranding is ook bij reguliere stortplaatsgassen de afstand tot de stortplaats van groot belang voor de mate van blootstelling. Doordat kunststoffen langzaam afbreken is er sprake van (semi) continue uitdamping en langdurige blootstelling van de omgeving.

Vrijkomende stoffen bij storten van synthetisch textiel

Zoals in hoofdstuk 4 is beschreven zijn de kunststofpolymeren PET, PAN, PA, PUR, en PVC relevant in de textielsector. In Tabel 7 zijn deze polymeren aangeduid met een [†]. Stoffen die aangetoond uit deze kunststofpolymeren logen zijn metalen (antimoon), fenolen, fosfaten, quinonen, benzothiazolen, benzofenonen. Daarnaast kunnen ftalaten en tin-verbindingen vrijkomen afhankelijk van de additieven, die worden toegevoegd aan de kunststofpolymeren. Naast uitloging kunnen stoffen ook als gas, zoals VOS, vrijkomen uit gestort synthetisch textiel. Thermische afbraak van stikstofhoudende polymeren, zoals PUR, PAN en PA, kan leiden tot de emissie van HCN. Vanuit PVC, chloorhoudend, kunnen HCl, vinylchloride, acrylonitril en dioxinen worden geëmitteerd. Ook kan er uitdamping van stoffen uit additieven, zoals PCB's en PBDE's, plaatsvinden als gas of aan fijnstof gebonden,. Met de stortplaatsgassen kunnen ook microplastics, en de daaraan gebonden additieven, meekomen en zo verspreiden in het milieu.

5.6 Totaaloverzicht vrijkomende stoffen bij storten

Op basis van de onderzoeken aangehaald in paragraaf 5.2 en 5.4 is in Tabel 7 een overzicht gegeven van de stoffen die mogelijk kunnen vrijkomen bij het storten van kunststofafval. Net als bij de stoffen die vrijkomen bij brand (Tabel 5) is ervoor gekozen om kwalitatief weer te geven welke componenten in welke mate vrijkomen per kunststofpolymeer, rekening houdend met het type additieven dat wordt toegevoegd aan deze kunststofpolymeren, mits dit bekend is. Hierbij is een onderscheid gemaakt voor de stoffen waarvan bekend is dat deze in het milieu kunnen uitlogen uit kunststoffen (+), stoffen die in percolaat kunnen voorkomen (p) en stoffen die in stortplaatsgassen kunnen voorkomen (g).

Wanneer er een 'a' is weergegeven is niet specifiek voor dit kunststofpolymeer aangetoond dat de stof kan vrijkomen. Echter op basis van de additieven die mogelijk aan dit kunststofpolymeer worden toegevoegd, kunnen deze stoffen in het percolaat of stortplaatsgas aanwezig zijn. Voor de additieven die mogelijk aanwezig kunnen zijn in het kunststofpolymeer is het overzicht in Tabel 3 aangehouden. Hierbij moet wel worden genoemd dat er nog geen duidelijk overzicht is van welke additieven in welke kunststoffenpolymeren aanwezig zijn. Hierdoor is het mogelijk dat de tabel niet volledig is.

Overige kunststoffen of stofgroepen

In hoofdstuk 3 zijn de meest gebruikte en onderzochte kunststoffen genoemd in Tabel 1. Tevens is een overzicht gegeven van groepen stoffen in kunststoffen waarvan de stofeigenschappen als zorgwekkend of prioritair zijn aangemerkt. De focus van dit onderzoek ligt bij deze kunststofpolymeren en groepen stoffen. Er is geen specifiek onderzoek gedaan naar bijvoorbeeld de afbraak en het vrijkomen van stoffen uit fluorgebaseerde kunststoffen, zoals PTFE. Wel zijn fluorhoudende 'additieven', zoals PFAS onderzocht en dit is in hoofdstuk 7 toegelicht.

Biologisch afbreekbare polymeren zijn ontworpen om op natuurlijke wijze af te breken, maar hun afbraaksnelheid varieert afhankelijk van factoren zoals vochtigheid, temperatuur en de aanwezigheid van micro-organismen. Polymelkzuur bijvoorbeeld, een van de populairste biologisch afbreekbare materialen, is in principe niet afbreekbaar in zeewater. Er zijn ook signalen dat de afbraak van bioafbreekbare polymeren in stortplaatsen zeer beperkt is.[90] Aangezien deze kunststofpolymeren slechts een klein deel van de kunststof- en textielmarkt uitmaken, worden deze ook in veel mindere mate in het afval verwacht. De concentratie van de stoffen die bij het storten van deze specifieke kunststofpolymeren vrijkomen, is dan ook minimaal vergeleken bij de veel voorkomende kunststoffen.

De chemische stoffen die in de literatuur voorkomen hebben een bias naar veelvoorkomende stoffen en stoffen die gereguleerd zijn, zoals bijvoorbeeld ftalaten en gebromeerde brandvertragers. Voor het doel van dit onderzoek is dat niet erg, omdat in heterogene afvalstromen, waarin ook oudere kunststoffen aanwezig zijn, de veelvoorkomende stoffen naar verwachting ook het meest voorkomen. Zogenaemde 'opkomende stoffen'^p komen op basis van de gebruikte onderzoeken niet naar voren. Voor deze stoffen ontbreekt het nog aan gegevens toxicologische effecten.

^p stoffen waarvan het nog onvoldoende bekend is of ze daadwerkelijk een bedreiging vormen voor mens of milieu.

Tabel 7 Stoffen die vrijkomen bij storten van producten van bepaalde kunststofpolymeren. + uitloging in milieu aangetoond,[34, 81] p in percolaat mogelijk,[76, 84] en g in stortplaatsgas mogelijk.[18, 76, 82, 87-89] Toevoeging 'a' niet bekend voor het specifieke polymeer, maar kan vrijkomen o.b.v. de mogelijk aanwezige additieven. Alle afkortingen zijn terug te vinden in de afkortingenlijst in de bijlage.

	Aldehyden en ketonen ¹	Aromatische koolwaterstoffen ²	HCl	HCN	Aminen en andere nitrilen	Fenolen	Ftalaten	Gebromeerde verbindingen ³	Organofosforverbindingen en fosfaten	Vinylchloride en Chloor	PAK	Dioxinen	Organobroom- & fosforverbin.,incl. PBDE	PCB' s	Metaaloxiden en -verbindingen	Tinverbindingen	Quinonen	Benzothiazole	Benzofenonen	Stearinezuur	Benzoaten	VOS	Overig	
PE							+				+/g			+										
LDPE															pa									*
HDPE																								**
PP	+	+				+	+				g		+	pa			+				+			
PS		g						+					ga											
PET ^T													pa/ga		+/pa									
PC						+	+													+				***
PVC ^T		g	g			+	+			g		g	ga			+								
PU(R) ^T				g					+				ga											
ABS					+																			
PAN ^T				g									ga											
PA ^T				g											pa									
PA + PE ^T						+			+								+	+	+	+				
onbekend					g								p/g	g	p								g	

¹ Formaldehyde, acetaldehyde, acroleïne, aceton, acetofenon en methylketonen

² Benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, styreen, isobutyleen, cymeen

³ Gebromeerde alkanen, alkenen en aromaten

* Hexanoyl fluoride, (2,2-dimethyl-1,3-dioxolan-4-yl) methanol, Penta ethyleen glycol, Azacyclotridecan-2-one, 11-aminoundecanoic acid, Ethyl 2-fluoroacetaat

**Hexanoyl fluoride, 11-aminoundecanoic acid, Azacyclotridecan-2-one, 12-aminododecanoic acid, (2E,6Z)-dodeca-2,6-dienol

*** 4-hydroxybenzoëzuur, methylparabeen

6 Gevaarseigenschappen van vrijgekomen stoffen op mens en milieu

Mogelijke risico's van stoffen die vrijkomen zijn afhankelijk van de manier en mate van blootstelling en de gevaarseigenschappen van de stoffen. In voorgaande hoofdstukken is beschreven welke stoffen er vrijkomen en hoe deze zich kunnen verspreiden in de omgeving. Dit zijn factoren die meespelen in de mate van blootstelling via verschillende blootstellingsroutes. In dit hoofdstuk worden de gevaarseigenschappen van de vrijgekomen stoffen op mens en milieu beschreven per blootstellingsroute. Voor verschillende blootstellingsroutes kunnen verschillende stoffen en stoffeigenschappen relevant zijn. In Tabel 3 zijn reeds de gevaarseigenschappen voor de belangrijkste groepen gevaarlijke stoffen gegeven.

Opgemerkt wordt dat er veel onzekerheden zijn over de mogelijke effecten van het vrijkomen van stoffen. Er zijn voor veel kunststofadditieven, naast beperkte gegevens over het vrijkomen, ook geen gegevens beschikbaar over de schadelijkheid voor mens of milieu.[27] Microplastics geven naast de chemische effecten van de additieven ook fysieke effecten, afhankelijk van de grootte en de vorm van de deeltjes.[76] Daarnaast is het bij het beoordelen van de effecten belangrijk om niet alleen naar de toxiciteit van de verschillende losse stoffen te kijken, maar ook naar het mengsel van stoffen waaraan mens of milieu wordt blootgesteld. Een mengsel kan leiden tot grotere effecten, of effecten bij lagere concentraties.[91]

6.1 Effecten voor mens

Kunststofadditieven zijn onder andere geïdentificeerd als hormoonverstorende stoffen, maar zijn ook gelinkt aan verschillende soorten kanker, diabetes en neurologische afwijkingen.[81] Bijvoorbeeld fenolen en ftalaten staan bekend om de hormoonverstorende effecten, maar ook als kankerverwekkend en immunotoxisch.[84] Maar van veel additieven zijn de gevaarseigenschappen ook nog onbekend.[27] Doordat de mens op verschillende manieren wordt blootgesteld aan kunststofadditieven (bv. voedsel, verpakkingsmateriaal, water), is de bijdrage vanuit stortplaatsen moeilijk te bepalen. Wel is duidelijk dat er hierdoor cumulatieve blootstelling (blootstelling aan een stof via verschillende blootstellingsroutes) is, en een blootstelling aan mengsels (blootstelling aan verschillende stoffen tegelijk).[81]

Voor stortplaatsen zijn de belangrijkste blootstellingsroutes voor de mens het inademen van stortplaatsgassen of verbrandingsgassen- en rookdeeltjes, directe aanraking van percolaat en verontreinigde bodem, en blootstelling door inname van verontreinigd voedsel. Deze blootstellingsroutes worden in onderstaande paragrafen verder toegelicht.

6.1.1 Inademing

Mensen kunnen in aanraking komen met gassen en deeltjes in de lucht die vrijkomen door brand of als stortplaatsgas. Gassen kunnen giftig zijn

voor de mensen die op de stortplaats werken of in de omgeving van een brand of stortplaats verblijven. Rookstof en andere deeltjes kunnen gevaarlijke stoffen bevatten, zoals dioxinen en PAK.

6.1.1.1 Verbrandingsgassen en rookstof

De emissie van (gevaarlijke) stoffen naar de lucht is een van de meest directe en onderzochte effecten van een brand. Hierbij ligt de nadruk vaak op acute effecten en minder op de chronische. Met de nadruk op stoffen die acuut toxisch zijn en concentraties die direct effecten opleveren. Echter, bij dumpplaatsen vinden de branden langduriger en vaker plaats en zal het effect op mens en milieu groter zijn door chronische blootstelling.

Gebromeerde brandvertragers, waarvan TBBPA de meest voorkomende is, zijn vaak niet gebonden aan de kunststof en kunnen daardoor bij verbranding gemakkelijk vrijkomen als gas of in de as achterblijven.[40] De stoffen zijn vaak kankerverwekkend en reproductietoxisch.

In as of in vrijgekomen stofdeeltjes kunnen (zware) metalen zoals antimoon voorkomen. Deze elementen zijn kankerverwekkend en/of kunnen de longen beschadigen. Met name chronische blootstelling en opbouw in het milieu kunnen voor schadelijke effecten zorgen.

Dioxines zijn wellicht een van de meest onderzochte groepen van gevaarlijke stoffen die bij branden van chloor of broomhoudende materialen vrijkomen. Ze zijn persistent in het milieu en bioaccumulatief.[73, 92] Naast kankerverwekkend, mutageen en reproductietoxisch zijn stoffen uit deze groep ook hormoon verstorend en neurotoxisch. De mens kan ook aan dioxines worden blootgesteld door het eten van vlees, vis, eieren en melkproducten. Furanen en bisfenylen zorgen voor eenzelfde soort effecten op mens en milieu.

Bisfenolen (de meest bekende is BPA) staan bekend om hormoonverstorende effecten en stoffen uit deze groep kunnen ook kankerverwekkend en mutageen zijn.[93] Ftalaten komen vanwege hun lage moleculaire gewicht en niet-covalente binding aan polymeren gemakkelijk vrij uit kunststoffen bij verbranding. Ze zijn hormoonverstorend en/of kankerverwekkend.[94]

Daarnaast zijn de gassen die vrijkomen toxisch. Dit is met name relevant voor mensen in de directe omgeving van de brand, omdat de gassen verspreiden en er verdunning plaatsvindt op afstand van de brand. In hoge concentraties kunnen CO en HCN toxisch zijn en zelfs dodelijk.[42] Echter is het onwaarschijnlijk dat men aan dermate hoge concentraties van deze gassen wordt blootgesteld bij deze branden. Mogelijk relevanter is om de lange termijn effecten van (herhaalde) blootstelling aan de gassen, zoals bijvoorbeeld formaldehyde en isocyanaten, te inventariseren, echter is hier weinig onderzoek naar gedaan. PAK zijn vaak kankerverwekkend bij relatief lage concentraties en kunnen in de bodem ophopen door depositie of verspreiding van verontreinigd as.

6.1.1.2 Stortplaatsgassen

Door de onzekerheid over de uitdamping van stoffen en vorming van gassen specifiek uit kunststoffen en de mogelijke concentraties in de omgeving is het niet mogelijk om de effecten van stortplaatsgas te kwantificeren.

Het RIVM heeft een beoordelingskader voor veilige recreatie op voormalige (gesloten) stortplaatsen opgesteld.[95] Stortplaatsen voor afval die niet meer in gebruik zijn, kunnen in Nederland worden gebruikt als gebied waar mensen recreëren. In het beoordelingskader is het uitgangspunt dat deklagen de migratie van stortgassen (deels) belemmeren. Dat is niet het geval bij open stortplaatsen, waardoor concentraties hoger kunnen zijn. Op basis van dit RIVM-onderzoek kan gesteld worden dat risico's voor mensen die zich op een onbeheerde stort begeven niet uitgesloten kunnen worden.

Prioritaire stoffen uit het beoordelingskader die te relateren zijn aan kunststoffen zijn onder meer vinylchloride, acrylonitril, benzeen, toluen, xylenen. Ook PBDE's komen mogelijk vrij via stortplaatsgas. Al deze stoffen, met uitzondering van xyleen, zijn kankerverwekkend. Daarnaast zijn benzeen, toluen en xylenen acuut toxisch. De stoffen zijn in lage concentraties irriterend, maar kunnen ook inwerken op het zenuwstelsel wat bij hoge concentraties kan leiden tot sterfte.

6.1.2 *Direct contact percolaat en verontreinigde grond*

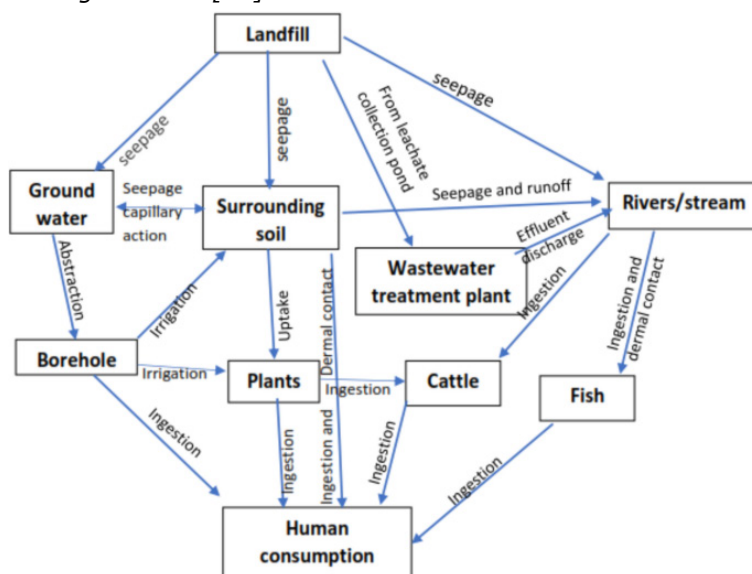
Onderzoek naar de humane toxiciteit van stortplaatspercolaat richt zich enerzijds op risicobeoordeling van concentraties van stoffen in het percolaat, en anderzijds op biologische testen van het gehele mengsel (bioassays, in vitro testen). Uit de onderzoeken blijkt dat percolaat van stortplaatsen giftig is voor de mens.[96, 97] In vitro geeft het percolaat onder andere mutagene, genotoxische en hormoonversturende effecten. Deze effecten kunnen worden gemeten in cellen die al aan lage concentraties zijn blootgesteld.[97] Dit laat het potentiële risico voor de menselijke gezondheid zien. Echter in hoeverre mensen blootgesteld worden aan chemische stoffen uit gestort kunststof is onzeker.

In het onderzoek van het RIVM is het uitgangspunt dat een recreant (mensen die bv. wandelen of sporten op een oude stortplaats) niet in contact mag komen met water dat door het afval heen heeft gestroomd. [95] Dit advies komt voort uit het feit dat het niet bekend is welke stoffen in de stortplaats zitten en hoe hoog de concentraties van deze stoffen in het percolaat zijn. Daarnaast zijn metingen in het water niet betrouwbaar omdat concentraties van stoffen op verschillende plekken en tijdstippen sterk verschillen. Concentraties en mogelijke risico's kunnen daardoor niet goed bepaald worden.[95] Een oude en beheerste stortplaats in Nederland is niet te vergelijken met een actieve stortplaats in het buitenland, waar mogelijk ook mensen (onbeschermd) op de stortplaats werken of verblijven. Maar op basis van dit onderzoek blijkt dat voor onbeheerde stortplaatsen het niet is uit te sluiten dat mensen in contact komen met het percolaat.

6.1.3 Indirecte inname

In de onderstaande figuur zijn verschillende blootstellingsroutes van mensen aan stoffen uit percolaat weergegeven. Hierbij gaat het vooral om inname van producten (voedsel en drinkwater) waarin stoffen uit het percolaat aanwezig kunnen zijn.

Figuur 9 Blootstellingsroutes van stoffen uit stortplaatspercolaat. Bron: Matike and Ngole-Jeme.[84]



Stoffen die persistent en bioaccumulatief zijn kunnen ophopen in het milieu en de voedselketen. Daarnaast kunnen mobiele stoffen makkelijk in het water verspreiden. Hierdoor wordt de kans en mate van blootstelling voor de mens groter. Het is niet te bepalen in hoeverre de mens stoffen binnenkrijgt die in het milieu terecht zijn gekomen als gevolg van het storten en/of verbranden van kunststof. Wel is het bekend dat veel stoffen die door brand of uitloging vrijkomen persistent en bioaccumulatief zijn (zie paragraaf 4.3 en 5.3) en schadelijk voor de mens (eerder dit hoofdstuk).

6.2 Effecten voor milieu

22% van het wereldwijde kunststofafval wordt niet milieuverantwoord verwerkt, door bijvoorbeeld ongecontroleerd dumpen, open verbranding of achterlaten in het milieu.[4] Hierdoor komen gevaarlijke stoffen terecht in het milieu. Stoffen kunnen echter ook tijdens de gebruiksfase al in het milieu terecht komen, zoals microvezels bij het wassen van kleding[78] en microplastics door bandenslijtage.[98] Veel additieven in kunststoffen zijn geïdentificeerd als aquatisch toxisch. Daarnaast zijn deze stoffen vaak persistent, waardoor ze niet afbreken in het milieu.

Er is ontdekt dat ijzer, vrijgekomen bij (bos)branden in Australië, heeft geleid tot een toename aan fytoplankton in de zuidelijke oceaan benedenwinds Australië.[99] Dit soort effecten van stoffen die verspreiden vanuit branden en in het milieu terecht komen, kunnen leiden tot negatieve effecten op de biodiversiteit en de (kwetsbare) ecosystemen. Ook van verontreinigingen uit stortplaatspercolaat is bekend dat ze negatieve effecten kunnen hebben op ecosystemen en de

voedselketen.[91] Om deze effecten te kwantificeren zijn blootstellingsscenario's van belang. Aangezien dit rapport niet een specifieke situatie onderzoekt zijn deze gegevens niet bekend. Wel zijn in Tabel 3 de gevaarseigenschappen van de stoffen die uit kunststoffen vrij kunnen komen weergegeven.

6.2.1 *Bodem en gewassen*

Bij open lucht verbranding en ongecontroleerd storten komen gassen en roet of (fijn) stofdeeltjes vrij. Deze kunnen zich benedenwinds verspreiden en neerslaan op de bodem terecht komen. Daarnaast kan de as gebruikt worden als meststof en op land terecht komen. Bij niet beheerde stortplaatsen komt stortplaatspercolaat direct in de bodem terecht, en kan daarmee impact hebben om het ecosysteem. Het is bekend dat chemische stoffen die uit kunststoffen logen van invloed zijn op micro-organismen in de bodem.[34]

Microplastics kunnen zich met het percolaat verspreiden door de bodem. En zijn verschillende mogelijke effecten bekend die afhangen van het type microplastic, het organisme, en de omgeving.[100] Microplastics hebben negatieve effecten op de bodem zelf, zoals de doorlaatbaarheid van water, de hoeveelheid organisch materiaal en de hoeveelheid fosfaat. Ook kunnen microplastics in planten terecht komen en de groei, zaadkieming en aantal bladgroenkorrels belemmeren. Microplastics kunnen ook de voortplanting, groei en beweging van ongewervelden negatief beïnvloeden. Er zijn veel onzekerheden in risicobeoordelingen van microplastics in bodem. Wel zijn er enkele onderzoeken beschikbaar die risico's voor het bodemecosysteem hebben onderzocht. Alle onderzoeken concluderen dat risico's van microplastics voor het bodemmilieu niet kunnen worden uitgesloten.[100]

6.2.2 *Water*

De meeste onderzoeken naar de risico's van kunststofadditieven voor het aquatische milieu richten zich op directe uitloging van de stoffen uit kunststoffen in het water (in zout en/of zoet water). Uitloging kan negatieve effecten hebben op micro-organismen, planten en fauna in het water. De effecten kunnen lokaal optreden, in de omgeving van de stortplaatsen. In het geval van verwaaiing waarbij kunststoffen in zee terechtkomen kan er ook uitloging plaats vinden in zeewater.

De ernst van de effecten loopt in de onderzoeken uiteen.[34] Uit Tabel 3 blijkt dat alle stoffen waarvan bekend is dat die uit kunststoffen kunnen logen op een stortplaats toxisch zijn voor het aquatisch milieu. Ook bij verbranding kunnen stoffen vrijkomen die toxisch zijn voor het aquatisch milieu, zoals metalen en metalloïden, dioxines en furanen, ftalen, PCB's en PDBE's.

7 Overzicht per kunststofsoort

In dit hoofdstuk is per kunststofpolymeer de beschikbare informatie over toepassing, chemische samenstelling, verbranding en storten samengevat. Er is gekozen voor een overzicht per kunststofpolymeer omdat dit het best aansluit bij de inspectie- handhavingspraktijk van ILT. Dit overzicht geeft geen volledig beeld, aangezien er veel onzekerheden zijn. Over het algemeen geldt dat de meest voorkomende kunststofpolymeren het meest onderzocht zijn en er dus de meeste informatie over beschikbaar is.

Per type polymeer worden de voornaamste toepassingen beschreven (zie meer informatie in Tabel 1). Vervolgens worden de veel toegepaste additieven en bijbehorende stofgroepen benoemd (zie Tabel 2 en Tabel 4). De lijst van additieven is niet uitputtend, omdat er veel meer stoffen in specifieke producten of toepassingen kunnen worden toegevoegd, of als vervuiling in het kunststof(afval) aanwezig kunnen zijn. Anderzijds zijn sommige gevaarlijke stof(groepen) al gereguleerd en worden die niet meer in nieuwe kunststofproducten en textiel toegepast. Dit geldt bijvoorbeeld voor POP-stoffen. Deze stoffen kunnen nog wel in afval voorkomen, zeker als het producten met een lange levensduur betreft.

Bij het onderzoek naar vrijkomende stoffen bij verbranding van kunststoffen, zijn metingen van stoffen bij 'echte' branden gecombineerd met de resultaten van laboratoriumonderzoeken (zie Tabel 5). Opgemerkt wordt dat het verbranden van koolstof-houdende materialen altijd zorgt voor het vrijkomen van gevaarlijke stoffen, zoals CO, fijnstof, NO_x, koolwaterstoffen (zowel alifatisch als aromatisch) en PAK. Voor stoffen die vrijkomen bij storten is enerzijds naar uitloging naar percolaat gekeken, en anderzijds naar het vrijkomen via stortgassen. Hiervoor is gebruik gemaakt van gegevens over uitloging van stoffen uit kunststofproducten en stoffen uit stortplaatspercolaat (zie Tabel 7). Dit combineert hele specifieke gegevens die niet direct aan stortplaatsen te relateren zijn met algemene gegevens waarbij er een beperkte relatie met kunststoffen is. Ook voor stortplaatsgassen is dit het geval (zie Tabel 7).

Afsluitend is beschreven welke stoffen er mogelijk vrijkomen bij brand of storten op basis van de additieven die in de kunststofpolymeren aanwezig zijn. Van deze stoffen is niet aangetoond dat ze daadwerkelijk vrijkomen, waardoor er meer onzekerheid is (zie Tabel 5 en Tabel 7).

Tot slot is aan het eind van dit hoofdstuk beknopt omschreven wat bekend is over PFAS in relatie tot het verbranden en storten van kunststofafval en afgedankt textiel.

Polyetheen (PE), incl. Lagedichtheidpolyetheen (LDPE) (13% van Europese productie[2]) en Hogedichtheidpolyetheen (HDPE) (8%), wordt voornamelijk toegepast als verpakkingsmateriaal en in de bouw. In PE kunnen PFAS (bv. als proceshulpstof bij folies), pigmenten (o.a. metaalverbindingen), en biociden (bv. triclosan) zijn gebruikt. Bij brand van PE zijn o.a. fenolen gemeten. Het is bekend dat ftalaten, metalen en

PAK uit PE-producten kunnen logen, en dus in percolaat aanwezig kunnen zijn. Volatiele PAK kunnen ook in gassen terechtkomen. Op basis van additieven kunnen mogelijk ook metaaloxiden en andere metaalverbindingen vrijkomen bij brand en in het percolaat. Daarnaast kunnen fluorhoudende stoffen vrijkomen door de aanwezigheid van PFAS, zie pagina 66 'PFAS in kunststoffen en textiel'.

Polyproppeen (PP) (16% van Europese productie) wordt onder andere toegepast in verpakkingen, de bouw, de auto-industrie en textiel. In PP kunnen o.a. PFAS (bv. als proceshulpstof bij folies), pigmenten (o.a. metaalverbindingen), en biociden (bv. triclosan) zijn gebruikt. Bij brand van PP zijn dezelfde stoffen gemeten als bij de verbranding van PE, namelijk o.a. fenolen. Het is bekend dat o.a. ftalaten, fosfaten, fenolen en aromatische koolwaterstoffen kunnen uitlogen uit PP-producten. Volatiele PAK kunnen ook in gassen terechtkomen. Ook kunnen op basis van de additieven metalenoxiden en metaalverbindingen vrijkomen bij brand en in het percolaat. Daarnaast kunnen fluorhoudende stoffen vrijkomen door de aanwezigheid van PFAS, zie hierna ook op pagina 66 'PFAS in kunststoffen en textiel'.

Polyvinylchloride (PVC) (8% van Europese productie) wordt vooral in de bouw toegepast, maar ook in textiel in de bedrukking en in regenjassen. Daarnaast komt PVC ook voor als verpakkingsmateriaal. Afhankelijk van de gewenste eigenschappen van PVC worden verschillende additieven toegevoegd: weekmakers (fenolen, ftalaten, organofosfaten), antioxidanten, hitte- en UV-stabilisatoren (metalen zoals lood, cadmium en zink als hitte-stabilisatoren, en benzofenonen en benzotriazolen als UV-stabilisatoren), brandvertragers op basis van broom (PBDE's), chloor, organofosfaten en metaalhydroxiden), pigmenten en biociden (bv. triclosan). Andere stofgroepen die in PVC aanwezig kunnen zijn betreffen PAK, alkylfenolen en alkylfenolextoxylaten, en (organo)metalen, zoals titanium, barium, antimoon en cadmium. Er is veel onderzoek gedaan naar verbranding van PVC. In PVC zit chloor, waardoor er bij brand chloorhoudende aromaten en overige chloorhoudende koolwaterstoffen, zoals chloormetaan, vinylchloride en fosgeen vrijkomen. Ook kunnen PCB's en dioxinen ontstaan. Aromaten, HCl en dioxinen kunnen ook in stortplaatsgassen terechtkomen. Daarnaast blijkt dat fenolen, ftalaten en tin kunnen uitlogen uit PVC-producten. Op basis van de additieven kunnen ftalaten, organobroomverbindingen (waaronder HBr en broomdibenzodioxinen en -furanen), organofosforverbindingen en metaalverbindingen vrijkomen bij brand, en kunnen PBDE's in stortplaatsgassen vrijkomen.

Polyetheentereftalaat (PET) (5% van Europese productie) wordt voornamelijk in verpakkingen toegepast en het is de meest toegepaste textielvezel (polyester). Bij de productie van PET wordt antimoon als katalysator gebruikt. Voor synthetisch textiel op basis van PET zijn NPEO en bisfenolen relevante additieven. Textiel kan behandeld zijn geweest met biociden (bv. triclosan) om dit een antimicrobiële werking te geven maar intussen geldt hiervoor een verbod voor Europa. Synthetisch textiel op basis van polyester kan behandeld (gecoat) zijn met brandvertragers (obv. broom (PBDE's), chloor, organofosfaten en metaalhydroxiden); dit is vooral een risico bij (afgedankt) professioneel

textiel. Consumentenkleding kan waterafstoters bevatten met PFAS. Aangezien PET zuurstofhoudend is kunnen er bij brand aldehyden, alcoholen, fenolen, furanen, carbonzuren, esters en methylmethacrylaat vrijkomen. Antimoon kan uitloggen en in het percolaat terecht komen. Specifiek voor brandwerend textiel, kunnen op basis van de additieven gechloreerde verbindingen (waaronder HCL, vinylchloride en gechloreerde PAK), fosgeen, organobroomverbindingen (waaronder HBr en broomdibenzodioxinen en -furanen), organofosforverbindingen, dioxinen, PCB's en metaalverbindingen bij brand vrijkomen. PBDE's kunnen mogelijk uitloggen en in stortplaatsgas terecht komen. En ook andere metalen uit de additieven kunnen naar het percolaat uitloggen. Daarnaast kunnen fluorhoudende stoffen vrijkomen door de aanwezigheid van PFAS, zie hierna op pagina 66 'PFAS in kunststoffen en textiel'.

Polyurethaan (PUR) (6% van Europese productie) wordt vooral in de bouw en auto-industrie toegepast. Ook zijn veel matrassen van PUR (schuim) gemaakt. PU wordt ook gebruikt als coating of bedrukking op textiel. Additieven die aan PUR kunnen worden toegevoegd zijn onder andere brandvertragers (obv. broom, chloor, organofosfaten en metaalhydroxiden), waterafstoters (PFAS), lossingsmiddelen, biociden (bv. tinverbindingen), UV-stabilisatoren (waaronder benzotriazolen) en katalysatoren. Ook PAK en metaalverbindingen kunnen in PUR aanwezig zijn. Specifiek in PU gecoat textiel zijn NPEO en ftalaten aanwezig. Bij branden met PUR wordt onder andere HCN gemeten. Omdat PUR een stikstofhoudend polymeer is, kunnen er bij brand ook nitrillen, aminen, isocyanaten, ureum en amino-PAK gevormd worden. In stortplaatsgas kan door het stikstof ook HCN vrijkomen. In uitloogonderzoek is aangetoond dat TCPP, een gechloreerde fosfaatester uit PUR-producten (bijvoorbeeld matrassen) kan logen. Verder zijn er zeer weinig gegevens bekend over uitloging van stoffen uit PUR. Op basis van de additieven kunnen gechloreerde verbindingen (waaronder HCL, vinylchloride en gechloreerde PAK), fosgeen, organobroomverbindingen (waaronder HBr en broomdibenzodioxinen en -furanen), organofosforverbindingen, dioxinen, PCB's en metaalverbindingen bij brand vrijkomen. In stortplaatsgassen zouden toegepaste PBDE's aanwezig kunnen zijn. Daarnaast kunnen fluorhoudende stoffen vrijkomen door de aanwezigheid van PFAS, zie hierna op pagina 66 'PFAS in kunststoffen en textiel'.

Polystyreen (PS) (5% van Europese productie) wordt vooral toegepast in de bouw, onder andere als piepschuim (EPS – Expanded Polystyrene). In PS kunnen brandvertragers (obv. broom, chloor, organofosfaten en metaalhydroxiden), waterafstoters (PFAS) en weekmakers zijn toegevoegd. Bij branden met PS zijn HCN en fenolen gemeten. Over het vrijkomen van stoffen bij het storten zijn geen experimentele gegevens bekend. Op basis van de additieven kunnen gechloreerde verbindingen (waaronder HCL, vinylchloride en gechloreerde PAK), fosgeen, organobroomverbindingen (waaronder HBr en broomdibenzodioxinen en -furanen), organofosforverbindingen, dioxinen, PCB's en metaalverbindingen bij brand vrijkomen. In stortplaatsgassen zouden toegepaste PBDE's of aromatische structuren aanwezig kunnen zijn. Daarnaast kunnen fluorhoudende stoffen vrijkomen door de

aanwezigheid van PFAS, zie hierna op pagina 66 'PFAS in kunststoffen en textiel'.

Polyamide (PA) (incl. nylon) wordt voornamelijk in textiel toegepast, bijvoorbeeld in tapijten, kousen en badkleding. Hierin kunnen waterafstoters (PFAS), hitte- en UV-stabilisatoren en biociden (bv. triclosan) zijn gebruikt. In PA in consumententextiel zijn bisfenolen en NPEO aangetroffen. Bij branden met PA zijn HCN en NH₃ gemeten. HCN kan ook in stortplaatsgas aanwezig zijn. Omdat PA een stikstofhoudend polymeer is kunnen er bij brand ook nitrillen, aminen, isocyanaten, ureum en amino-PAK gevormd worden. Over uitloging van stoffen uit PA zijn geen gegevens. Op basis van de additieven zouden er metaalverbindingen, NPEO en bisfenolen in het percolaat kunnen zitten. Voor brand kunnen gechloreerde verbindingen (waaronder HCL, vinylchloride en gechloreerde PAK), fosgeen), organofosforverbindingen, dioxinen, PCB's en metaalverbindingen bij brand vrijkomen. Daarnaast kunnen fluorhoudende stoffen vrijkomen door de aanwezigheid van PFAS, zie hierna op pagina 66 'PFAS in kunststoffen en textiel'.

Acrylonitril-butadien-styreen (ABS) wordt vooral in de bouw en elektronica toegepast. In ABS worden UV-stabilisatoren toegepast, waaronder benzotriazolen. Bij branden met zijn HCN en NH₃ gemeten. Omdat PA een stikstofhoudend polymeer is kunnen er bij brand ook nitrillen, aminen, isocyanaten, ureum en amino-PAK gevormd worden. In uitloogonderzoek is gebleken dat acrylonitril, een van de monomeren in ABS, uit ABS-producten kan logen. Verder zijn er geen gegevens over het uitlogen of stortplaatsgassen bekend. Ook zijn er geen aanvullende stoffen op basis van de additieven te verwachten.

Polycarbonaat (PC) wordt vooral in de auto-industrie toegepast, waarbij waterafstoters (PFAS) en hitte- en UV-stabilisatoren (benzotriazolen) worden gebruikt. Omdat PC zuurstofhoudend is komen bij brand aldehyden, alcoholen, fenol, furanen, carbonzuren, esters en methylmethacrylaat vrij. In het percolaat kunnen benzofenonen, fenolen, ftalaten worden aangetoond. Er zijn geen gegevens over het stortplaatsgassen bekend. Ook zijn er geen aanvullende stoffen op basis van de additieven te verwachten. Daarnaast kunnen fluorhoudende stoffen vrijkomen door de aanwezigheid van PFAS, zie hierna op pagina 66 'PFAS in kunststoffen en textiel'.

Polyoxymethyleen (POM) wordt vooral in de auto-industrie en verpakkingen toegepast. In POM worden UV-stabilisatoren, zoals benzotriazolen, gebruikt. Omdat POM zuurstofhoudend is komen bij brand aldehyden, alcoholen, fenol, furanen, carbonzuren, esters en methylmethacrylaat vrij. Er zijn geen gegevens over het uitlogen of stortplaatsgassen bekend. Ook zijn er geen aanvullende stoffen op basis van de additieven te verwachten.

Acrylaat (PMMA) wordt gebruikt in verpakkingen, elektronica en de auto-industrie. In PMMA worden UV-stabilisatoren, zoals benzotriazolen, gebruikt. Omdat PMMA zuurstofhoudend is komen bij brand aldehyden, alcoholen, fenol, furanen, carbonzuren, esters en methylmethacrylaat vrij. Er zijn geen gegevens over het uitlogen of stortplaatsgassen

bekend. Ook zijn er geen aanvullende stoffen op basis van de additieven te verwachten.

Polyacrylonitril (PAN) wordt voornamelijk in textiel gebruikt, bijvoorbeeld truien. Er is weinig specifieke informatie over welke gevaarlijke stoffen in acryl (PAN) toegepast in consumententextiel voor kunnen komen. In een brede inventarisatie blijkt dat brandvertragers (obv. broom (PBDE's), chloor, organofosfaten en metaalhydroxiden) kunnen worden toegevoegd. Bij branden met PAN worden onder andere HCN en NH₃ gemeten. Omdat PAN een stikstofhoudend polymeer is kunnen er bij brand ook nitrillen, aminen, isocyanaten, ureum en amino-PAK gevormd worden. In stortplaatsgas kan door het stikstof ook HCN vrijkomen. Over uitloging van stoffen uit PAN zijn geen gegevens beschikbaar. Op basis van de additieven kunnen gechloreerde verbindingen (waaronder HCL, vinylchloride en gechloreerde PAK), fosgeen, organobroomverbindingen (waaronder HBr en broomdibenzodioxinen en -furanen), organofosforverbindingen, dioxinen, PCB's en metaalverbindingen bij brand vrijkomen. In stortplaatsgassen zouden toegepaste PBDE's aanwezig kunnen zijn.

PFAS in kunststoffen en textiel

Het vrijkomen van PFAS bij brand en storten van kunststofafval is relatief weinig onderzocht. Wel is bekend dat aan kunststoffen en textielen PFAS kan worden toegevoegd.[67, 68] PFAS kan worden toegepast als proceshulpstof bij de productie van PE en PP folies [29], maar kan ook worden gebruikt om kleding water-, vet- en vuilafstotend te maken. PFAS zijn zeer persistent en veelal mobiel. Studies naar thermolyse van PFAS laten zien dat de benodigde temperatuur voor volledige decompositie varieert vanaf bijvoorbeeld 350 °C voor PFOA, 450 °C voor PFOS tot 850 °C voor PTFE.[101] Bij deze decompositie worden naast CO₂ fluorhoudende gassen, zoals waterstoffluoride (HF), carbonylfluoride (COF₂), perfluoromethaan (CF₄) en perfluoroethaan (C₂F₆) gevormd. Wanneer de brand bij lagere temperaturen plaatsvindt worden meer bijproducten gevormd, zoals bijvoorbeeld langere keten perfluoro-alkanen, -alkenen of -aldehyden, fluorobenzenen, fluorhoudende dioxinen en furanen en perfluorcarbonzuren.

Bij ongecontroleerde open branden is de temperatuur variabel en het is daarom te verwachten dat niet alle PFAS volledig zijn afgebroken. Er kunnen PFAS met langere polymeerketens in de as achterblijven of op roetdeeltjes in de lucht verspreiden. Ook kunnen fluorhoudende gassen worden geëmitteerd. In de geraadpleegde bronnen over emissies bij branden komen echter gelimiteerd gegevens over PFAS voor. Dit kan mogelijk verklaard worden doordat de onderzoeken vooral gericht zijn op acute toxiciteit voor mensen, en daarin is PFAS niet relevant. Ook in de geraadpleegde onderzoeken over het uitloggen van additieven uit kunststoffen en stoffen in stortplaatspercolaat kwamen PFAS niet naar voren. Wel zijn er onderzoeken die zich specifiek op PFAS in stortplaatsen richten.[102] Deze laten zien dat er PFAS in het percolaat terecht kunnen komen vanuit onder andere textiel (incl. tapijten) en papieren voedselverpakkingen.[103, 104] Het vrijkomen van PFAS uit andere kunststoffen komt in deze onderzoeken niet expliciet naar voren. Het is duidelijk dat PFAS zowel in het percolaat als in stortplaatsgassen terecht kunnen komen, en dat er transformatie van PFAS met lange ketens naar PFAS van kortere keten plaatsvindt in de stortplaatsen.[102] Daarnaast kunnen PFAS hechten aan microplastics en zich met de microplastics verspreiden in het milieu.[102]

8 Conclusie en discussie

Dit rapport, in opdracht van ILT, is een inventarisatie van mogelijke toxicologische effecten voor mens en milieu als gevolg van het exporteren van kunststofafval en afgedankt textiel vanuit Nederland. Het onderzoek richt zich op twee verwerkingsmethodes van afval, namelijk verbranden en storten. Uit het onderzoek blijkt dat bij deze laagwaardige manier van afvalverwerking, gevaarlijke stoffen kunnen vrijkomen. Bij verbranding gaat het met name om verbrandingsproducten en bij het storten kunnen kunststofadditieven in het percolaat terecht komen. Ook komen er microplastics vrij, die zich in het milieu verspreiden. Er zijn veel onzekerheden over de stoffen die in kunststoffen zitten en over het vrijkomen en verspreiden ervan. Wel is bekend dat veel van de stoffen schadelijke eigenschappen hebben voor mens en milieu, zoals hormoonverstorend, toxisch voor het aquatische milieu en kankerverwekkend. Daarnaast is een groot gedeelte van deze stoffen persistent, waardoor ze niet afbreken in het milieu. Het is te verwachten dat de concentraties van deze stoffen dicht bij de bron hoger zijn, en daarmee de effecten lokaal het grootst zijn.

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de onderzoeksvragen en is een discussie geformuleerd.

8.1 Conclusie per onderzoeksvraag

1. Samenstelling van (het geëxporteerde) kunststofafval en afgedankt textiel

a. Uit welke polymeren bestaat kunststofafval en afgedankt textiel?

Er bestaan vele verschillende soorten kunststoffen, oftewel polymeren met daaraan toegevoegd additieven. De meest gebruikte polymeren zijn PE, PP, PVC, PET, PUR, PS en PA. De kunststoffen worden in allerlei sectoren en producten toegepast, zoals in Tabel 1 staat beschreven. Zo worden er veel kunststoffen gebruikt voor verpakkingsmateriaal (PE, PET, PP en PVC) en de bouw (PS en PVC). De meest toegepaste synthetische textielvezel voor kleding is polyester, daarnaast wordt nylon (PA), acryl (PAN) en elastaan (PU) ook vaak toegepast.

In dit onderzoek is gekozen voor een brede scope en is voor PE, PP, PVC, PET, PUR, PS, PA, ABS, PC, POM, PMMA, PAN onderzocht welke additieven aanwezig kunnen zijn, Tabel 4. De hoeveelheden en types van kunststofpolymeren die geëxporteerd worden is niet onderzocht.

b. Welke gevaarlijke stoffen zitten er in de polymeren en wat zijn de gevaarseigenschappen daarvan?

Kunststoffen bevatten monomeren, welke het desbetreffende kunststofpolymeer vormen. Daarnaast worden aan kunststoffen additieven toegevoegd om ze bepaalde eigenschappen te geven. Bij het maken van kleding kunnen additieven in het hele productieproces, van grondstof tot eindproduct, toegevoegd worden.

In Tabel 2 is weergegeven welke additieven per polymeersoort zijn aangetoond. Ook kunnen er verontreinigingen in het kunststof aanwezig

zijn, die onbewust zijn gevormd of na het productieproces zijn achtergebleven in het product. Er zijn twee belangrijke onderzoeken gedaan die de stoffen in kunststoffen inventariseren vanuit verschillende andere bronnen, waarbij ook stofgroepen zijn geïdentificeerd die als prioritair of zorgwekkend worden beschouwd. Dit zijn onder andere per- en poly-fluoroalkylstoffen, ftalaten, fenonen, bisfenolen, alkylfenolen en alkylfenoethoxylaten, biociden, metalen en metaloïden, polycyclische aromatische koolwaterstoffen, aromatische amines en ethers, arakyl aldehyden furanen, dioxines, parabenen, chloorparaffinen, azokleurstoffen, benzothiazolen, parabenen en salicylzuur esters.

Uit deze onderzoeken blijkt dat er nog veel onbekend is over de stoffen in kunststoffen. Er zijn vooral gegevens over de meest toegepaste kunststoffenpolymeren, zoals PVC, PET, PP en PE. Hieruit blijkt dat onder andere PVC veel gevaarlijke stoffen kan bevatten. Gevaarseigenschappen van deze stofgroepen zijn onder andere: kankerverwekkend, schadelijk voor het aquatisch milieu en hormoonverstoring. Daarnaast zijn veel stoffen persistent, waardoor ze niet afbreken in het milieu. In Tabel 3 is een volledig overzicht per stofgroep gegeven en in Tabel 4 is aangegeven in welke kunststofpolymeren deze stofgroepen aanwezig kunnen zijn.

De concentraties van deze stoffen in kunststoffen zijn grotendeels onbekend. Alleen van additieven is bekend dat ze in een gemiddeld kunststof in circa 7% g/g worden toegevoegd. Echter verschillen de concentraties van additieven sterk per kunststofsoort en additieven groep. Zo kunnen biociden in 0.001% g/g voorkomen en weekmakers tot wel 70% g/g.[34] Omdat gestort of verbrand afval vaak bestaat uit heterogene afvalstromen is niet te bepalen in welke concentraties deze stoffen voorkomen.

2. Vrijkomen en verspreiden van stoffen bij verbranding van kunststoffen in de open lucht

De brandeigenschappen bepalen in grote mate welke stoffen in welke concentraties vrijkomen. Relevante variabelen zijn onder andere soort brandstof, verbrandingstemperatuur en de beschikbaarheid van zuurstof. Naast de verbrandingstemperatuur hebben weeromstandigheden (met name wind) invloed op de mate van pluïmstijging. Bij geen of geringe pluïmstijging neemt de kans op blootstelling aan schadelijke rookconcentraties toe. Ook zal bij dergelijke omstandigheden meer depositie dicht bij de bron te vinden zijn. Op stortplaatsen vinden met name smeulende branden, waarbij doorgaans beperkte pluïmstijging is, plaats. Bij dit type branden ontstaan in verhouding met goed ontwikkelde branden meer gevaarlijke stoffen door onvolledige verbranding. De kans op blootstelling aan hoge concentraties neemt toe, mede omdat op stortplaatsen vaak 'waste-pickers' aanwezig zijn. Echter is niet goed te kwantificeren in welke concentraties gevaarlijke stoffen vrijkomen en verspreiden omdat open branden onder ongecontroleerde omstandigheden plaatsvinden en daardoor de condities variëren.

a. Welke stoffen komen er per kunststofpolymeer vrij?

De belangrijkste stofgroepen die bij brand van kunststoffen en textiel vrijkomen zijn: fijnstof, PAK, VOS en aromatische koolwaterstoffen. In

Tabel 5 is een volledig overzicht per kunststofpolymeer gegeven. Het type kunststofpolymeer kan leiden tot het vrijkomen van additionele stoffen. Zo komen dioxinen, PCB's en andere gechloreerde verbindingen vrij bij het verbranden van PVC. Daarnaast kunnen bijvoorbeeld HCN, NH₃, amino-PAK en isocyanaten vrijkomen uit stikstofhoudende kunststofpolymeren PUR, ABS, PAN en PA en bijvoorbeeld aldehyden, alcoholen en furanen uit zuurstofhoudende kunststofpolymeren PET, PC, POM en PMMA. Over de invloed van additieven in kunststoffen op de vorming van gevaarlijke stoffen bij verbranding is minder onderzoek bekend. De chemische samenstelling van de additieven, zoals het bevatten van een halogeen of metaal, is van belang voor het bepalen van stoffen die uitgestoten kunnen worden. Denk hierbij aan stoffen zoals metalen of metaaloxides, ftalaten, fosgenen en gechloreerde of gebromeerde verbindingen. Als er PFAS in de kunststoffen of het textiel zit, zal er bij verbranding fluorhoudende moleculen worden gevormd en vrijkomen, zoals perfluorocarbonzuren, fluorhoudende benzenen, furanen en dioxines en perfluoro-alkanen, -alkenen en -aldehyden.

b. Hoe verloopt de verspreiding van deze stoffen?

Naast de verspreiding van gassen in de lucht, kan er ook depositie plaatsvinden en kan ook de as worden uitgereden over gewassen als meststof. Inademing van de gassen is de meest directe blootstellingsroute, maar daarnaast is er ook depositie op gewassen of in water dat kan leiden tot blootstelling en als laatste kunnen de stoffen worden opgenomen in gewassen of dieren welke vervolgens weer door mensen of roofdieren worden gegeten.

Bij branden blijft significante verhoging van de meeste gevaarlijke stoffen over het algemeen relatief lokaal (tot 1 km van de brand). Dit betekent dat met name mensen die dicht in de buurt van branden werken of wonen blootgesteld kunnen worden aan relatief hoge concentraties gevaarlijke stoffen.

3. Vrijkomen en verspreiden van stoffen als gevolg van het storten van kunststoffen

Welke stoffen vrijkomen uit gestorte kunststoffen en hoe deze zich verspreiden in de omgeving van stortplaatsen is moeilijk specifiek te bepalen vanwege beperkte informatie en de verschillende factoren die uitloging beïnvloeden, zoals:

- Stortplaatseigenschappen: onder andere het soort afval, het 'management' van de stort, en de leeftijd
- Stofeigenschappen: verschillende eigenschappen gericht op verspreiding, mobiliteit en persistentie
- Omgevingsfactoren: zoals klimaat, waterhuishouding, landgebruik en bewoning

a. Welke stoffen komen er per kunststofpolymeer vrij door uitloging naar het percolaat?

In algemene zin is bekend dat bisfenolen, ftalaten, metalen (oa. antimoon, koper en lood), PCB's en gebromeerde brandvertragers (PBDE's) door uitloging uit kunststoffen in percolaat van stortplaatsen terecht kunnen komen. In hoofdstuk 7 is een volledig overzicht per kunststofpolymeer gegeven. Vooral de additieven toegevoegd aan de kunststof of textiel zorgen voor het vrijkomen

van deze stoffen. Indien er PFAS zit in de kunststoffen en textiel zitten, zal er transformatie plaatsvinden van PFAS met lange ketens naar PFAS met kortere keten en kunnen PFAS in het percolaat terecht komen.

b. Hoe verloopt de verspreiding van deze stoffen?

Het percolaat zorgt voor directe blootstelling van de bodem, en kan zich verder verspreiden naar het grondwater. Via bodem en grondwater kunnen stoffen uit het percolaat in andere milieucompartimenten en in de voedselketen terecht komen. De mate van verspreiding is onder andere afhankelijk van hoe goed stoffen aan de bodem hechten en of de stoffen afbreken.

c. Welke stoffen komen er per kunststofpolymeer vrij via stortplaatsgassen?

Voor stortplaatsgassen zijn onder andere vinylchloride, vluchtige organische stoffen, PCB's en gebromeerde brandvertragers (PBDE's) relevante stoffen die vrijkomen en aan kunststoffen te relateren zijn. In Tabel 7 is een volledig overzicht per kunststofpolymeer gegeven. Ook hier zorgen vooral de toegevoegde additieven voor het vrijkomen van deze stoffen. Net zoals uitloging naar het percolaat kan er bij de aanwezigheid van PFAS in de kunststoffen en textiel PFAS vrijkomen. Alleen de kleine PFAS-verbindingen zijn vluchtig en kunnen in de stortplaatsgassen vrijkomen.

d. Hoe verloopt de verspreiding van deze stoffen?

Voor gassen is directe blootstelling door inademing de belangrijkste blootstellingsroute. Daarnaast zijn dezelfde routes als besproken bij verbranding in de openlucht, 2.b relevant.

4. Mogelijke effecten van vrijkomende stoffen bij brand of storten op mens en milieu

a. Welke gevaarseigenschappen hebben de vrijkomende stoffen voor mens en milieu?

In onderzoek naar milieu- en gezondheidseffecten bij branden ligt de focus meestal op acute toxiciteit voor mensen. Chronische toxiciteit en toxicologische effecten op het milieu, ook wanneer stoffen ophopen omdat branden herhaaldelijk op dezelfde locatie plaatsvinden, zijn minder onderzocht. Van dioxines is bekend dat de mens daar direct aan blootgesteld kan worden, maar ook indirect via voedingsstoffen waar dioxinen in terecht kunnen komen. Daarnaast zijn ook andere stoffen die vrijkomen toxisch, zoals metalen en PCB's.

Zoals hierboven aangegeven is het bepalen van specifieke risico's van stoffen uit stortplaatsen niet mogelijk. Wel is in algemene zin te stellen dat de stoffen die vrijkomen uit kunststoffen op een stortplaats zowel schadelijk zijn voor het (aquatisch) milieu, als voor de mens. De stoffen zijn onder andere kankerverwekkend en hormoonversturend. De effecten van het vrijkomen van deze stoffen, zijn lastig te voorspellen voor stortplaatsen met een heterogene afvalsamenstelling of welke langdurig in gebruik zijn.

8.2 Discussie

8.2.1 *Scope onderzoek*

In dit rapport zijn de mogelijke toxicologische effecten voor mens en milieu geïnventariseerd die veroorzaakt worden door het ongecontroleerd verbranden of storten van geëxporteerde kunststoffen en textiel.

Handelaren en verwerkers van kunststofafval zijn verplicht om bij de export gedetailleerd aan te geven hoe en waar het kunststofafval milieuverantwoord gerecycled wordt. Afgedankt textiel wordt geëxporteerd voor hergebruik of recycling. Toch is er een kans dat kunststofafval en afgedankt textiel ongecontroleerd in het milieu terecht komt. Hoe groot deze kans is, hoeveel van het geëxporteerde afval en afgedankte textiel en welke kunststofpolymeren of kledingartikelen niet hergebruikt of gerecycled wordt, maar uiteindelijk in het milieu terecht komen, valt buiten de scope van dit onderzoek.

Bij de inventarisatie is een brede groep van kunststoffen onderzocht, op basis van de verschillende toepassingen van kunststofpolymeren per sector. Textiel is afgebakend tot synthetisch textiel. Dit betekent niet dat er geen effecten te verwachten zijn van textiel op basis van natuurlijke vezels zoals katoen.

In dit onderzoek zijn effecten gerelateerd aan het gebruik en verspreiden van chemische stoffen. Het ontstaan van microplastics en de mogelijke effecten zijn benoemd maar uitgebreid onderzoek hiernaar valt buiten de scope.

8.2.2 *Beschikbaarheid informatie*

Om te achterhalen welke gevaarlijke stoffen er in kunststofafval en afgedankt textiel aanwezig kunnen zijn, maken we onder meer gebruik van de PlastChem-database (Wagner, 2024) en een onderzoek van UNEP (UNEP, 2023). Een belangrijk punt om te adresseren is dat deze studies een brede scope (geografisch en temporeel) hebben, en het dus niet bekend is welke van deze stoffen momenteel nog in kunststofafval en afgedankt textiel aanwezig zijn (er zitten ook in de EU verboden stoffen tussen) en in welke concentraties. Daarnaast is niet voor alle kunststofpolymeren en additieven gedegen onderzoek beschikbaar. Dit geldt ook voor metingen en onderzoeken naar het vrijkomen van stoffen bij branden en storten van kunststoffen.

8.2.3 *Effecten van gemengde stromen*

De onderzoeken die zich richten op stoffen die vrijkomen vanaf stortplaatsen kijken niet specifiek naar kunststoffen omdat stortplaatsen over het algemeen bestaan uit gemengde afvalstromen. Dit resulteert erin dat niet voor alle kunststoffen en additieven er informatie naar voren komt.

Daarnaast is het zo dat ingezamelde kunststoffen naar verwachting niet (altijd) voor 100% uit dezelfde kunststoffen bestaan. Kunststoffen worden gesorteerd op basis van specificaties, waarin afspraken worden gemaakt over de samenstelling en de maximale vervuilingsgraad. Een voorbeeld van een specificatie is het maximale gehalte aan PVC in een

gesorteerde stroom. Ook tijdens het gebruik van kunststoffen is vervuiling mogelijk afhankelijk van de toepassing (denk aan resten verf in ingezamelde verfemmers). Met dit type van vervuiling is in het onderzoek geen rekening gehouden.

8.2.4 *Onzekerheden en variabelen*

Er zijn grote verschillen en onzekerheden in de stoffen die in verschillende soorten kunststoffen zijn toegepast en vrij kunnen komen bij het verbranden of storten van kunststofafval. Het vrijkomen van de stoffen is afhankelijk van de kunststoffen, stofeigenschappen maar ook van brandkenmerken en omgevingsfactoren. Verschillende stoffen en stofgroepen die vrij kunnen komen hebben zorgwekkende gevareseigenschappen, bijvoorbeeld omdat ze persistent of toxisch zijn. Daarnaast is het bij het beoordelen van de effecten belangrijk om niet alleen naar de toxiciteit van de verschillende losse stoffen te kijken, maar ook naar het mengsel van stoffen waaraan mens of milieu wordt blootgesteld. Een mengsel kan leiden tot grotere effecten, of effecten bij lagere concentraties. In hoeverre deze stoffen negatieve effecten hebben op mens of milieu is afhankelijk van de verspreiding en de blootstelling. De verspreiding is afhankelijk van stofeigenschappen en omgevingskenmerken. De blootstelling is tevens afhankelijk van de manier waarop mensen en dieren van de omgeving gebruikmaken. Dit rapport kijkt naar het verbranden en storten in het algemeen en niet op een specifieke locatie. Daarom is het vrijkomen, de verspreiding en de blootstelling niet-specifiek te bepalen.

Literatuur

- [1] *Bevorderen hergebruik afval*. Inspectie Leefomgeving en Transport. Geraadpleegd 25 Februari, Beschikbaar via <https://www.ilent.nl/onderwerpen/bevorderen-hergebruik-afval>
- [2] Plastics Europe. (2024). *Plastics – the fast Facts 2024*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- [3] (2022). *Global Plactics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. Paris: OECD Publishing https://www.oecd.org/en/publications/global-plactics-outlook_aa1edf33-en/full-report.html
- [4] (2022). *Global Plactics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. Paris: OECD publishing
- [5] M. Dokl; A. Copot; D. Krajnc; Y. V. Fan; A. Vujanović; K. B. Aviso; R. R. Tan; Z. Kravanja; L. Čuček. (2024). Global projections of plastic use, end-of-life fate and potential changes in consumption, reduction, recycling and replacement with bioplastics to 2050. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 498–518. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.025>
- [6] Circular Plastics NL. (2025). *Navigating Volumes and Value Chains Towards Circularity*. <https://circularplasticsnl.org/wp-content/uploads/2025/05/Circular-Plastics-NL-Navigating-Volumes-and-Value-Chains-FULL-202504.pdf>
- [7] (2010). *Directive 2010/75/EU of the european parliament and the council on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2010L0075:20110106:EN:PDF>
- [8] L. Fraile. (2025). *Waarom is Nederland een belangrijke speler op de wereldwijde markt voor plastic afval*. In: Fair Resource Foundation.
- [9] (2023). *Plastic waste imports encompassing all transport methods per capita. These are calculated by dividing by each country's population* Version 1988-2022).
- [10] (2024). *Sector document internationale handel plastic afval*. AMLC <https://www.amlc.nl/kennisdocument-internationale-handel-plastic-afval/>
- [11] *Strengere regels voor import en export kunststofafval*. Inspectie Leefomgeving en Transport.via <https://www.ilent.nl/onderwerpen/afvaltransport-evoa/regels-afvaltransport/indeling-afvalstoffen-evoa/kunststofafval>
- [12] (2023). *Hoogwaardige grondstoffen naar verre landen door geringe vraag in EU*. Inspectie Leefomgeving en Transport. Geraadpleegd 14 November, Beschikbaar via <https://www.ilent.nl/documenten/leefomgeving-en-wonen/afval/afvalinzameling-en--preventie/factsheets/hoogwaardige-grondstoffen-naar-verre-landen-door-geringe-vraag-in-eu>

- [13] (2023). *Inspecties naar kunststofafval tonen dat hoogwaardige grondstoffen uit EU verdwijnen*. Inspectie Leefomgeving en Transport. Geraadpleegd 25 Februari, Beschikbaar via <https://www.ilent.nl/actueel/nieuws/2023/12/07/inspecties-naar-kunststofafval-tonen-dat-hoogwaardige-grondstoffen-uit-eu-verdwijnen>
- [14] (2024). *Criminaliteit met kunststofafval is verdienmodel*. Inspectie Leefomgeving en Transport. Geraadpleegd 14 November, Beschikbaar via <https://www.ilent.nl/actueel/nieuws/2024/11/05/criminaliteit-met-kunststofafval-is-verdienmodel>
- [15] F. W. Hopstaken, L.A.M.; Custers, F. (2024). *Onderzoek naar de massabalans van het in Nederland ingezamelde afgedankte textiel, de route en resultaten van de verwerking*. (FF23.017). Ffact Strategie and implementation
- [16] Quashie-Idun. (2024). *Fast fashion, slow poison: The toxic textile crisis in Ghana*. Johannesburg, Zuid-Africa: Greenpeace Africa
- [17] U. H.-R. Trunk, G; Banegas, X; Urbancic, N; Rautner, M; Holkar, V. (2023). *Trashion: The stealth export of waste plastic clothes to Kenya*. In: Changing Markets foundation.
- [18] (2006). The Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency. In European Parliament _ Council of the European Union (Ed.), *Regulation (EC) No 1907/2006* (Vol. COD 2003/0256, pp. 53–55): Directorate-General for Internal Market Industry Entrepreneurship and SMEs,.
- [19] A. Boliijn. (2008). Thermoharders: kort & bondig.
- [20] R. Geyer. (2020). Chapter 2 - Production, use, and fate of synthetic polymers. In Letcher, T. M. (Ed.), *Plastic Waste and Recycling* (pp. 13–32). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5>
- [21] E. N. Abrahart, Whewell, C.S. (2025). *Textile*. Encyclopedia Britannica. Geraadpleegd 4 november, Beschikbaar via
- [22] F. Heens; G. Eliesen. (2023). *Textile recycling in the Netherlands. Considerations for ensuring chemical product safety*.
- [23] E. E. Agency. (2020). *Biodegradable and compostable plastics—challenges and opportunities*. In: European Environment Agency Copenhagen, Denmark.
- [24] EuropeanBioplastics. (2024). *Bioplastics market development update 2024*. Geraadpleegd 4-8-2025, Beschikbaar via <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- [25] M. Roosen; N. Mys; M. Kusenber; P. Billen; A. Dumoulin; J. Dewulf; K. M. Van Geem; K. Ragaert; S. De Meester. (2020). Detailed Analysis of the Composition of Selected Plastic Packaging Waste Products and Its Implications for Mechanical and Thermochemical Recycling. *Environmental Science & Technology*, 54(20), 13282–13293. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03371>
- [26] PlasticsEurope. (2022). *Plastics – the Facts 2022*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022-2/>
- [27] M. Wagner; L. Monclús; H. P. H. Arp; K. J. Groh; M. E. Løseth; J. Muncke; Z. Wang; R. Wolf; L. Zimmermann. (2024). *State of the science on plastic chemicals - Identifying and addressing chemicals and polymers of concern*.

- [28] UNEP. (2023). *Chemicals in plastics. A technical report.* <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report>
- [29] F. B. Heens, J.; L. de Boer; M. Broekman; M. Janssen; M. Sanders; J. Lijzen. (2025). *Pyrolyse van kunststofafval.* (RIVM-briefrapport 2024-018). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
- [30] T. Exchange. (2025). *Materials Market Report 2025.* <https://2d73cea0.delivery.rocketcdn.me/app/uploads/2025/09/Materials-Market-Report-2025.pdf>
- [31] Ellen MacArthur Foundation. (2017). A new textiles economy: Redesigning fashion's future.
- [32] L. Heather Margaret; R. Valentina; H. Kamilla Kastrup; S. Maggie Ziggie; D. Anders. (2025). Assessing the circularity potential of textile flows for future markets in Denmark: A study of textile anatomy. *Sustainable Production and Consumption*, 59, 127–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.08.002>
- [33] R. Geyer; J. R. Jambeck; K. L. Law. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.1700782>
- [34] K. C. Omidoyin; E. H. Jho. (2024). Environmental occurrence and ecotoxicological risks of plastic leachates in aquatic and terrestrial environments. *Science of The Total Environment*, 954, 176728. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176728>
- [35] B. Geueke. (2015). *Non-intentionally added substances (NIAS).* <https://doi.org/10.5281/zenodo.33514>
- [36] C. Komen; J. Wezenbeek. (2022). Inventarisatie Zeer Zorgwekkende Stoffen in bestrijdingsmiddelen.
- [37] H. F. Faber M., Spanbroek N., Lijzen J.P.A., van Drongelen A.W. . (2021). *Recycling van matrassen : analyse van risico's van verwerking en nieuwe toepassingen.* (RIVM-briefrapport 2021-0131). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
- [38] H. M. a. IKEA. (2021). Collaborative study on chemicals in recycled textiles. In. Webinar: H&M and IKEA.
- [39] S. Steuperaert. (2023). *Surveillance and product compliance for textile products - risk-based textile testing.* Centexbel.via <https://www.centexbel.be/sites/default/files/2025-04/reach4textiles-risk-based-testing.pdf>
- [40] C. A. Velis; E. Cook. (2021). Mismanagement of Plastic Waste through Open Burning with Emphasis on the Global South: A Systematic Review of Risks to Occupational and Public Health. *Environmental Science & Technology*, 55(11), 7186–7207. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08536>
- [41] W. W. Y. Lau; Y. Shiran; R. M. Bailey; E. Cook; M. R. Stuchtey; J. Koskella; C. A. Velis; L. Godfrey; J. Boucher; M. B. Murphy; et al. (2020). Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 369(6510), 1455–1461. <https://doi.org/doi:10.1126/science.aba9475>
- [42] G. Pathak; M. Nichter; A. Hardon; E. Moyer. (2024). The Open Burning of Plastic Wastes is an Urgent Global Health Issue. *Annals of Global Health*. <https://doi.org/10.5334/aogh.4232>
- [43] M. Cobbing; S. Daaji; M. Kopp; V. Wohlgemuth. (2022). Poisoned gifts: from donations to the dumpsite: textiles waste disguised as second-hand clothes exported to East Africa. *A Greenpeace Germany Report.*

- [44] G. Pathak; M. Nichter; A. Hardon; E. Moyer; A. Latkar; J. Simbaya; D. Pakasi; E. Taqueban; J. Love. (2023). Plastic pollution and the open burning of plastic wastes. *Global Environmental Change*, 80, 102648.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102648>
- [45] T. J. Christian; R. J. Yokelson; B. Cárdenas; L. T. Molina; G. Engling; S. C. Hsu. (2010). Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in central Mexico. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(2), 565–584.
<https://doi.org/10.5194/acp-10-565-2010>
- [46] R. C. Paddock. (2019, 15 november 2019). To make this tofu, start by burning toxic plastic. *The New York Times*.
<https://www.nytimes.com/2019/11/14/world/asia/indonesia-tofu-dioxin-plastic.html>
- [47] UNEP. (2024). *Beyond an age of waste_ turning rubbish into a resource* (DTI/2619/NA). (Global Waste Management Outlook 2024, Issue.
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44939/global_waste_management_outlook_2024.pdf?sequence=3
- [48] J. S. Białowicz; W. Rogula-Kozłowska; A. Krasuski. (2021). Contribution of landfill fires to air pollution – An assessment methodology. *Waste Management*, 125, 182–191.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.046>
- [49] D. Dabrowska; W. Rykala; V. Nourani. (2023). Causes, Types and Consequences of Municipal Waste Landfill Fires—Literature Review. In *Sustainability* (Vol. 15).
- [50] C. Wiedinmyer; R. J. Yokelson; B. K. Gullett. (2014). Global Emissions of Trace Gases, Particulate Matter, and Hazardous Air Pollutants from Open Burning of Domestic Waste. *Environmental Science & Technology*, 48(16), 9523–9530.
<https://doi.org/10.1021/es502250z>
- [51] M. v. B. Mennen, N. (2007). *Emissies van schadelijke stoffen bij branden*. (RIVM Rapport 609021051/2007). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
- [52] H. Keijzer; E. T.; Z. W.; M. Mennen. (2023). *Meetresultaten bij branden: Analyse van MOD-indicentmeetgegevens 2008 - 2021*. (RIVM-rapport 2023-0311). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
- [53] P. M. Lemieux; C. C. Lutes; D. A. Santoianni. (2004). Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(1), 1–32.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.08.001>
- [54] D. Costa. (2011). *Black Carbon Research and Future strategies; Reducing emissions, improving human health and taking action in climate change*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-12/documents/black-carbon-fact-sheet_0.pdf
- [55] K. Mahieu; L. Geraerts; P. Bos. (2020). *Interventiewaarden voor incidentbestrijding: interventiewaarden, stofdocumenten en handleiding 2025*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) <https://rvs.rivm.nl/sites/default/files/2025-03/Handleiding%20%26%20Stofdocumenten%20Interventiewaarden%202025.pdf>

- [56] M. G. Mennen. (2002). *Resultaten van metingen door de Milieuongevallendienst bij branden*. (Rapport 609100002/2002). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
- [57] A. J. C. M. L. Matthijsen, G.M.H.; Post, J.G. (1998). *Studie naar de verbrandingsproducten van chemicalieën of bestrijdingsmiddelen*. (Rapport 610066009/1998). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
- [58] B. R. Stanmore. (2004). The formation of dioxins in combustion systems. *Combustion and Flame*, 136(3), 398–427.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.11.004>
- [59] A. K. D. Liem; R. v.d. Berg; H. J. Bremmer. (1993). *Basisdocument Dioxinen*. (710401024). Bilthoven: RIVM
- [60] A. Tewarson; F. H. Jiang; T. Morikawa. (1993). Ventilation-controlled combustion of polymers. *Combustion and Flame*, 95(1), 151–169. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-2180\(93\)90058-B](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-2180(93)90058-B)
- [61] H. Humphreys; A. J. Christopher. (1985). Acidic volatiles from overheated polymeric materials. *Fire and Materials*, 9(3), 120–124.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fam.810090304>
- [62] A. Baudry; J. Dufay; N. Regnier; B. Mortaigne. (1998). Thermal degradation and fire behaviour of unsaturated polyester with chain ends modified by dicyclopentadiene. *Polymer Degradation and Stability*, 61(3), 441–452.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00230-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00230-9)
- [63] B. V. Andersson B., Holmstedt G., Särdaqvist, S., Winter, G. . (1999). *Simulated fires in substances of pesticide type*. Lund, Sweden
- [64] L. Smith-Hansen. (1994). *STEP – Combustion of chemical substances and the impact on the environment of the fire products*. (Report no. Risø-R-764(EN)). Roskilde, Denmark
- [65] K. E. M. Petersen, F. (1999). *Assesment of fires in chemical warehouses. An overview of the TOXFIRE project*. (Report no. Risø-R-932(EN)). Roskilde, Denmark
- [66] C. Huggett; B. C. Levin. (1987). Toxicity of the pyrolysis and combustion products of poly(vinyl chlorides): A literature assessment. *Fire and Materials*, 11(3), 131–142.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fam.810110303>
- [67] D. Pradeep; C. Lachlan; G. Sara Ghorbani; S. Bastian; V. Sara; S. Saer; V. T. Kevin; L. K. Sarit. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in consumer products: Current knowledge and research gaps. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 4, 100086.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.100086>
- [68] E. E. Agency. (2024). *PFAS in textiles in Europe's circular economy*. Geraadpleegd 10 November, Beschikbaar via <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-in-textiles-in-europes-circular-economy/>
- [69] X. Wang; H. Firouzkouhi; J. C. Chow; J. G. Watson; W. Carter; A. S. M. De Vos. (2023). Characterization of gas and particle emissions from open burning of household solid waste from South Africa. *Atmos. Chem. Phys.*, 23(15), 8921–8937.
<https://doi.org/10.5194/acp-23-8921-2023>

- [70] B. R. T. Simoneit; P. M. Medeiros; B. M. Didyk. (2005). Combustion Products of Plastics as Indicators for Refuse Burning in the Atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 39(18), 6961–6970. <https://doi.org/10.1021/es050767x>
- [71] M. G. K. Mennen, E.S.; Heezen, P.A.M.; van Munster, G.; Barreveld, H.L. (2009). *Verspreiding van stoffen bij branden: een verkennende studie*. (Rapport 609022031/2009). Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
- [72] R. Verma; K. S. Vinoda; M. Papireddy; A. N. S. Gowda. (2016). Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 701–708. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.069>
- [73] O. K. I. Alabi O.A., Awosolu O., Alalade O.E. (2019). Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review. *Journal of Toxicology and Risk Assessment*, 5(1), 1–13. <https://doi.org/DOI: 10.23937/2572-4061.1510021>
- [74] C. E. Smit. (2011). *Streefwaarde en verwaarloosbaar risiconiveau*. (RIVM Rapport 601357002/2011).
- [75] J. R. Rouse. (2006). Seeking common ground for people: Livelihoods, governance and waste. *Habitat International*, 30(4), 741–753. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2005.09.001>
- [76] I. Wojnowska-Baryła; K. Bernat; M. Zaborowska. (2022). Plastic Waste Degradation in Landfill Conditions: The Problem with Microplastics, and Their Direct and Indirect Environmental Effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13223.
- [77] L. An; Q. Liu; Y. Deng; W. Wu; Y. Gao; W. Ling. (2020). Sources of microplastic in the environment. *Microplastics in terrestrial environments: Emerging contaminants and major challenges*, 143–159.
- [78] (2022). *The Hidden Story of Plastics in Our Clothes*. Fibershed. Geraadpleegd 11 November, Beschikbaar via https://fibershed.nl/wp-content/uploads/2023/10/Plastics_Whitepaper_FINAL_15.11.2022.pdf
- [79] P. Wijekoon; P. A. Koliyabandara; A. T. Cooray; S. S. Lam; B. C. L. Athapattu; M. Vithanage. (2022). Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126627>
- [80] H. Luo; C. Liu; D. He; J. Sun; J. Li; X. Pan. (2022). Effects of aging on environmental behavior of plastic additives: Migration, leaching, and ecotoxicity. *Science of The Total Environment*, 849, 157951. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157951>
- [81] N. R. Maddela; D. Kakarla; K. Venkateswarlu; M. Megharaj. (2023). Additives of plastics: Entry into the environment and potential risks to human and ecological health. *Journal of Environmental Management*, 348, 119364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119364>

- [82] J. N. Hahladakis; C. A. Velis; R. Weber; E. Iacovidou; P. Purnell. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- [83] C. Scopetani; S. Selonen; A. Cincinelli; J. Pellinen. (2023). Chemical leaching from polyethylene mulching films to soil in strawberry farming. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1129336.
- [84] D. M. E. Matike; V. M. Ngole-Jeme. (2024). A Review of Phthalates and Phenols in Landfill Environments: Occurrence, Fate and Environmental Implications. *International Journal of Environmental Research*, 18(5), 79. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00627-0>
- [85] Ankit; L. Saha; V. Kumar; J. Tiwari; Sweta; S. Rawat; J. Singh; K. Bauddh. (2021). Electronic waste and their leachates impact on human health and environment: Global ecological threat and management. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102049.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102049>
- [86] T. H. Christensen; P. Kjeldsen; P. L. Bjerg; D. L. Jensen; J. B. Christensen; A. Baun; H.-J. Albrechtsen; G. Heron. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16(7), 659–718. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- [87] H. P. H. Arp; N. A. O. Morin; P. L. Andersson; S. E. Hale; F. Wania; K. Breivik; G. D. Breedveld. (2020). The presence, emission and partitioning behavior of polychlorinated biphenyls in waste, leachate and aerosols from Norwegian waste-handling facilities. *Science of The Total Environment*, 715, 136824.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136824>
- [88] N. A. Morin; P. L. Andersson; S. E. Hale; H. P. H. Arp. (2017). The presence and partitioning behavior of flame retardants in waste, leachate, and air particles from Norwegian waste-handling facilities. *Journal of Environmental Sciences*, 62, 115–132.
- [89] T. Lomonaco; E. Manco; A. Corti; J. La Nasa; S. Ghimenti; D. Biagini; F. Di Francesco; F. Modugno; A. Ceccarini; R. Fuoco; et al. (2020). Release of harmful volatile organic compounds (VOCs) from photo-degraded plastic debris: A neglected source of environmental pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 394, 122596.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122596>
- [90] D. Adamcová; M. D. Vaverková. (2016). New Polymer Behavior Under the Landfill Conditions. *Waste and Biomass Valorization*, 7(6), 1459–1467. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9542-0>
- [91] G. Gajski; V. Oreščanin; V. Garaj-Vrhovac. (2012). Chemical composition and genotoxicity assessment of sanitary landfill leachate from Rovinj, Croatia. *Ecotoxicology and environmental safety*, 78, 253–259.
- [92] J. R. Pertlik, R.A.; Schoevers, A. ;Havel, M. (2005). *After Incineration: The Toxic Ash Problem*. Prague - Manchester: IPEN
- [93] H. R. U. (2010). Plastic and Health Risks. *The Annual Review of Public Health*, 179–194.
<https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.012809.103714>

- [94] I. Petrovičová; B. Kolena; M. Šidlovská; T. Pilka; S. Wimmerová; T. Trnovec. (2016). Occupational exposure to phthalates in relation to gender, consumer practices and body composition. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(23), 24125–24134. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7394-6>
- [95] R. Vis; A. Negash; P. van Breemen. (2024). Beoordelingskader veilige recreatie op gesloten stortplaatsen.
- [96] A. Jabłońska-Trypuć; U. Wydro; E. Wołejko; A. Pietryczuk; A. Cudowski; J. Leszczyński; J. Rodziewicz; W. Janczukowicz; A. Butarewicz. (2021). Potential toxicity of leachate from the municipal landfill in view of the possibility of their migration to the environment through infiltration into groundwater. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(9), 3683–3698. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00867-5>
- [97] D. Baderna; F. Caloni; E. Benfenati. (2019). Investigating landfill leachate toxicity in vitro: A review of cell models and endpoints. *Environment International*, 122, 21–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.024>
- [98] J. T. K. Quick; A. R. Hids; M. A. Steenmeijer; Y. Mellink; A. van Bruggen. (2024). *Emission of Microplastics to Water, Soil and Air; what can we do about it?* (RIVM report 2024-0106). Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
- [99] W. Tang; J. Llort; J. Weis; M. M. G. Perron; S. Basart; Z. Li; S. Sathyendranath; T. Jackson; E. Sanz Rodriguez; B. C. Proemse; et al. (2021). Widespread phytoplankton blooms triggered by 2019–2020 Australian wildfires. *Nature*, 597(7876), 370–375. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03805-8>
- [100] E. Swart; P. van Breemen; A. Koelmans; J. Quik. (2025). *Towards ecological risk assessment of microplastics for regulatory purposes*.
- [101] J. Bakker; B. Bokkers; M. Broekman. (2021). *Per- and polyfluorinated substances in waste incinerator flue gases*. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
- [102] M. N. Goukeh; D. Ssekimpi; B. K. Asefaw; Z. Zhang. (2025). Occurrence of per- and polyfluorinated substances, microplastics, pharmaceuticals and personal care products as emerging contaminants in landfill leachate: A review. *Total Environment Engineering*, 3, 100019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.teengi.2025.100019>
- [103] S. L. Capozzi; A. L. Leang; L. A. Rodenburg; B. Chandramouli; D. A. Delistraty; C. H. Carter. (2023). PFAS in municipal landfill leachate: Occurrence, transformation, and sources. *Chemosphere*, 334, 138924. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138924>
- [104] E. S. Coffin; D. M. Reeves; D. P. Cassidy. (2023). PFAS in municipal solid waste landfills: Sources, leachate composition, chemical transformations, and future challenges. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 31, 100418. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100418>

Afkortingenlijst

Algemeen:

AFIRM	Apparel & Footwear International RSL Management Working Group
ILT	Inspectie Leefomgeving en Transport
I&W	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Kton	Kiloton = 1000 ton
Mton	Megaton = 1,000,000 ton
EU	Europese Unie
g/g	Gram per gram; verhouding in gewicht
REACH	Registratie, Evaluatie, Autorisatie en restrictie van Chemische stoffen
Rgseea	Regeling gevaarlijke stoffen in elektrische en elektronische apparatuur
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances
SML's	Stofspecifieke migratielimiten
UNEP	United Nations Environment Program
bv.	Bijvoorbeeld
incl.	Inclusief
obv.	Op basis van
oa.	Onder Andere
CLP	Classification, Labelling and Packaging
MOD	Milieuongevallen Dienst
mm	Milimeter
µg	Microgram
ppm	Parts per million; deeltjes per miljoen

Stoffen en stofgroepen:

4-NP	4-n-nonylfenol
BBP	Benzylbutylftalaat
BDE-109	Decabroomdifenylether
BPA	Bisfenol A
BTEXS	Benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, styreen, isopropylbenzeen en isopropyltolueen
CDP	Cresyldifenylfosfaat
CO	Koolstofmonoxide, of koolmonoxide
CO ₂	Koolstofdioxide
DBEP	Bis(2-n-butoxyethyl)ftalaat
DBP	Dibutylftalaat
DEHA	Bis(2-ethylhexyl)adipaat
DEHIP	Bis(2-ethylhexyl)isoftalaat
DEHP	Bis(2-ethylhexyl)ftalaat
DEHPA	Bis(2-ethylhexyl)fosfaat
DEHT	Di(2-ethylhexyl)tereftalaat
DEP	Di-ethylftalaat
DHP	Dihexylftalaat
DIBP	Diisobutylftalaat
DINP	Diisononylftalaat
DMP	Dimethylftalaat
DMT	Dimethyltin
DnOP	Di-n-octylftalaat
DPP	Difenyl fosfaat

DTBHQ	2,5-di-tert-butylhydrochinon
DTBP	2,4-di-tert-butylfenol
HBCDD	Hexabroomcyclododecaan
HBr	Waterstofbromide
HCl	Waterstofchloride
HCN	Waterstofcyanide, Blauwzuur
MBT	Monobutyltin
DBT	Dibuthyltin
N ₂ O	Lachgas
NH ₃	Ammoniak
NIAS	Non-Intentionally Added Substances - niet bewust toegevoegde stoffen
NO	Stikstofoxide
NO ₂	Stikstofdioxide
NO _x	Stikstofoxiden
NPEO	Nonylfenol ethoxylaar
PAK	Polycyclische aromatische koolwaterstoffen
PBB's	Polybroombifenyleen
PBDE's	Polybroomdifenylethers
PCB's	Polychloorbifenyleen
PEG	Pentaethyleenglycol
PFAS	Per- en polyfluoroalkyl stoffen (PFAS)
POP	Persistent Organic Pollutant
SO ₂	Zwavel dioxide
TBBP-A	Tetrabroombisfenol A
TBBPA-BDBPE	Tetrabroombisfenol A-bis(2,3-dibroompropylether)
TCEP	Tris(2-chloorethyl)fosfaat
TCPP	Tris(1-chloor-2-propyl)fosfaat
TDCPP	Tris(1,3-dichloor-2-propyl)fosfaat
TEP	Triethylfosfaat
TIBP	Triisobutylfosfaat
TPP	Trifenylfosfaat
TPPO	Trifenylfosfineoxide
UV-P	(2'-hydroxy-5'-methylfenyl)benzotriazol
VOS	Vluchtige organische stoffen

Polymeren:

ABS	Acrylonitril-butadieen-styreen
EPS	Expanded Polystyrene - piepschuim
HDPE	Hogedichtheidpolyetheen
LDPE	Lagedichtheidpolyetheen
PA	Polyamide (onder andere nylon en aramide)
PAN	Polyacrylonitril
PC	Polycarbonaat
PE	Polyetheen
PET	Polyethyleentereftalaar
PMMA	Polymethylmethacrylaar of acrylaar
POM	Polyoxymethyleen of polyacetaal
PP	Polypropeen of Polypropyleen
PPS	Polyfenyleensulfide
PS	Polystyreen
PTFE	Polytetrafluoretheen
PU	Polyurethaan
PVC	Polyvinylchloride

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

januari 2026

De zorg voor morgen
begint vandaag