



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

Veilige en duurzame recycling: Casus pyrolyse van **autobanden**

Veilige en duurzame recycling: Casus pyrolyse van autobanden

RIVM-rapport 2023-0359

Colofon

© RIVM 2023

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.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2023-0359

J.P.A. Lijzen (auteur), RIVM
L. de Boer (auteur), RIVM
M. Broekman (auteur), RIVM
E. Dekker (auteur), RIVM

Contact:
Johannes Lijzen
Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
Johannes.lijzen@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van IenW Directie DLCE in het kader van de opdracht Grondstoffen en Recycling.

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

Publiekssamenvatting

Veilige en duurzame recycling: pyrolyse van autobanden

Een voorbeeld van een innovatieve manier van recyclen is autobanden verhitten zonder zuurstof (pyrolyse). Het RIVM heeft beoordeeld of deze manier van recyclen veilig is voor mens en milieu en duurzamer is vergeleken met de huidige verwerking. Zo is gekeken hoeveel materiaal behouden blijft om te worden hergebruikt.

De conclusie is dat elke methode van recycling voor- en nadelen heeft, die goed tegen elkaar moeten worden afgewogen. Het RIVM beveelt daarvoor aan enkele onzekerheden weg te nemen, vooral over het recyclen van stalmatten.

Recyclen van reststromen is belangrijk om in 2050 een circulaire economie te realiseren. Met pyrolyse wordt uit banden het materiaal 'carbon black' gewonnen, dat kan worden gebruikt om weer nieuwe banden te maken. Ook wordt er gas en olie uit verkregen, die als brandstof worden gebruikt.

De pyrolyse is vergeleken met twee manieren waarmee autobanden nu worden verwerkt: gebruik als vervanger van kolen in cementovens en via mechanische recycling tot stalmatten voor vee. Deze casus is uitgewerkt met een methode die het RIVM eerder heeft ontwikkeld (Safe and Sustainable Material Loops).

Bij een mechanische verwerking blijft er meer materiaal over dat geschikt is voor nieuwe producten, dan bij pyrolyse. De vraag is wel of die nieuwe producten na het tweede leven opnieuw te recyclen zijn. Het is bijvoorbeeld nog onzeker of stalmatten kunnen worden hergebruikt, omdat ze tijdens het gebruik vervuild raken. Over meerdere levenscycli valt dat voordeel dus mogelijk weg. Het RIVM beveelt aan om dit verder te onderzoeken.

Het effect op het klimaat, een andere belangrijke indicator waarnaar is gekeken, is bij pyrolyse vrijwel even groot als bij de verbranding van autobanden in cementovens. Bij mechanische recycling tot stalmatten is het effect op het klimaat gunstiger. Vergeleken met het gebruik in cementovens blijft er bij pyrolyse wel meer materiaal over waarvan nieuwe producten kunnen worden gemaakt.

Wat de samenstelling van het materiaal betreft, lijkt het herwonnen carbon black bij de pyrolyse voldoende veilig. Voor de olie die uit pyrolyse ontstaat, is niet met zekerheid te zeggen of die wel veilig is.

Kernwoorden: autobanden, recycling, pyrolyse, rubbergranulaat

Synopsis

Safe and sustainable recycling: pyrolysis of car tyres

One example of an innovative recycling method involves heating car tyres in the absence of oxygen (a process known as pyrolysis). RIVM has conducted an assessment to determine the safety of this recycling method for both humans and the environment, as well as its sustainability when compared to current processing techniques. This assessment included an examination of the extent to which materials are preserved for reuse.

The conclusion is that each recycling method carries its own set of advantages and disadvantages, and these should be carefully weighed against each other. RIVM recommends addressing a few uncertainties, particularly concerning the recycling of stable mats.

The recycling of residual flows plays a pivotal role in realising a circular economy by 2050. Through pyrolysis, a material called 'carbon black' is recovered from tyres, which can be used in the production of new tyres. Additionally, pyrolysis yields gas and oil that serve as valuable fuels.

RIVM compared pyrolysis to two techniques currently employed for processing end-of-life car tyres: using them as a coal substitute in cement kilns and mechanical recycling into stable mats used for livestock. RIVM worked on this case study using a methodology developed previously (known as 'Safe and Sustainable Material Loops').

Mechanical recycling results in recovering of more materials that are suitable for repurposing into new products than pyrolysis. However, the question is whether these new products can be efficiently recycled after this second use phase. For example, there is uncertainty surrounding the potential for stable mats to be reused, because of contamination during use. RIVM suggests further investigation into this matter.

With respect to climate-impact, another crucial aspect under examination, pyrolysis was found to be nearly on par with the process of burning car tyres in cement kilns. However, mechanical recycling into stable mats has a more favourable climate impact. It should be noted that pyrolysis results in more recovered materials suitable for repurposing into new products than burning in cement kilns.

In terms of material composition, it appears that the recovered carbon black from pyrolysis is reasonably safe. However, the safety of the oil produced through pyrolysis could not be ascertained definitively.

Keywords: car tyres, recycling, pyrolysis, rubber granules

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 13

- 1.1 Context — 13
- 1.2 Doel en vraagstelling — 14
- 1.3 Aanpak — 14
- 1.4 Leeswijzer — 15

2 Proces en scope — 17

- 2.1 Vaststellen scope — 17
- 2.2 Pyrolyse van autobanden en beleidsmatige context — 19
- 2.3 Het pyrolyseproces op hoofdlijnen — 20

3 Milieuwinst: module milieu-impact en circulariteit — 23

- 3.1 Methode — 23
- 3.2 Resultaten — 24
 - 3.2.1 Milieu-impact — 24
 - 3.2.2 Circulariteit — 26
- 3.3 Discussie — 27

4 Module Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) — 29

- 4.1 Inleiding op de ZZS-module — 29
- 4.2 Informatiebronnen — 30
- 4.3 ZZS in het afval, pyrolyseolie, rCB en pyrolyse gas — 31
- 4.4 Uitwerking bestaande module SSML — 36
 - 4.4.1 Trede 1: aanwezigheid ZZS — 36
 - 4.4.2 Trede 2: verwijdering of behoud van ZZS — 39
 - 4.4.3 Trede 3 — 42

5 Conclusies — 43

- 5.1 Milieuwinst: Milieu-impact en circulariteit — 43
- 5.2 ZZS — 43
- 5.3 Voorlopige afweging — 44

6 Reflectie en aanbevelingen voor de methodiek — 47

7 Referenties — 51

Bijlage 1 Herkomst gegevens voor berekening milieu-impact — 53

Bijlage 2 Vóórkomen en criteria van zorgstoffen bij pyrolyse van autobanden — 54

Samenvatting

De circulaire economie is een van de topprioriteiten van het kabinet. Komen tot veilige en duurzame materiaalkringlopen betekent dat gezorgd moet worden dat materialen lang in gebruik blijven. Hiervoor wordt gezocht naar (hoogwaardige) toepassing van grondstoffen uit afvalstoffen en dat hergebruik en recycling veilig is. Bij het herwinnen van materialen uit reststromen is het gewenst inzicht te hebben in de mate van materiaalbehoud, de milieu-impact ervan en of risico's voor mens en milieu acceptabel zijn.

Eén van de nieuwe initiatieven om reststromen hoogwaardiger te verwerken, is het recyclen van voertuigbanden via pyrolyse (chemische recycling). Vanuit Rijkswaterstaat en vanuit Omgevingsdiensten zijn vragen gesteld aanhebben het RIVM over de veiligheid en bijdrage aan een circulaire economie van dit initiatief. In deze studie wordt daarom een verkenning gedaan van de circulariteit en milieu-impact van deze recycling in vergelijking met twee bestaande verwerkingstechnieken en van de risico's voor mens en milieu van de herwonnen materialen.

Er is gebruikgemaakt van het raamwerk Safe- and Sustainable Material Loops (SSML), dat is opgesteld om initiatieven te beoordelen voor het verwerken van reststromen waarin materiaal wordt behouden. Daarbij is informatie gebruikt die in 2021 beschikbaar was voor advies over veiligheid van dit initiatief. Daarnaast is informatie verkregen van de stakeholders om de duurzaamheidsaspecten te kunnen uitwerken. Nieuwe ontwikkelingen in verwerkingstechnieken en data kunnen in de toekomst tot andere conclusies leiden (denk daarbij aan devulcanisatie).

Om pyrolyse van banden te kunnen vergelijken met de bestaande verwerkingsmethoden, is een vergelijking gemaakt met mechanische recycling tot stalmatten en het referentiescenario 'toepassing in cementovens' (Europese minimum standaard). De scope is het verwerken van rubbergranulaat van voertuigbanden tot nieuwe producten. Bij pyrolyse gaat het om de producten 'recycled carbon black' (rCB), dat toepasbaar is in voertuigbanden en pyrolyseolie als brandstof. Voor de milieu-impact van de verwerking is daarbij naar één recyclingcyclus gekeken, waarbij alleen de verschillen zijn gekwantificeerd. Voor de circulariteit zijn drie indicatoren gekwantificeerd: over de eerste recycling, de bijdrage aan de markt, en over het recyclingpotentieel na de gebruiksfase van het nieuwe product. De module 'Zeer zorgwekkende stoffen' is toegepast om op basis van wat bekend is van de samenstellingen en het proces de veiligheid voor mens en milieu te beoordelen.

Met de beschikbare data en meetgegevens zijn de volgende conclusies te trekken. Voor de circulariteit concluderen we dat de pyrolyse van banden met het herwinnen van recovered carbon black (rCB) (voor toepassing in nieuwe banden) leidt tot meer materiaalbehoud (efficiency indicator van 0,41-0,45, inclusief het staal) in vergelijking met het referentiescenario 'toepassing in cementovens'. Het leidt echter tot

minder materiaalbehoud dan mechanische recycling tot stalmatten (efficiency 0,9).

Bij pyrolyse kan dus rCB in de bandenketen blijven en daarbij ook weer na de volgende toepassing herwonnen kan worden ('recyclability' = 0,26 voor het rubbergranulaat), terwijl voor stalmatten het momenteel onzeker is of deze aan het einde van de levensduur door de vervuiling gerecycled kunnen worden (recyclability = 0).

Wat betreft de berekende milieu-impact (in CO₂-equivalenten en landgebruik) bespaart de pyrolyse van banden vergeleken met het referentiescenario toepassing in cementovens 0,1 kg CO₂-equivalenten per kg granulaat. Recycling via toepassing van granulaat in stalmatten bespaart meer (2,1 kg CO₂-equivalenten per kg granulaat). Belangrijk is te melden dat de exacte hoogte afhankelijk is van veel factoren, bijvoorbeeld de energietransitie (duurzamere energiemix).

Op basis van de berekende milieu-impact scoort pyrolyse minder goed dan mechanische recycling (voor de eerste recyclingscyclus). Op basis van de circulariteits-indicatoren is niet eenduidig vast te stellen welke verwerkingsoptie het meest bijdraagt aan het meer circulair maken van deze materiaalstroom. Mechanische recycling tot stalmatten leidt bij de eerste recycling tot meer materiaalbehoud (hoge efficiency) en is energetisch gunstiger dan het gebruik van primaire grondstoffen, maar het is vanwege de vervuiling nog onzeker of stalmatten aan het einde van de levensduur weer gerecycled kunnen worden. Over meerdere levenscycli valt dat voordeel dus mogelijk weg. We bevelen aan dit nader te onderzoeken.

Bij pyrolyse tot rCB (met weer toepassing in banden) kan na de volgende gebruiksfase nogmaals pyrolyse worden toegepast (hogere recyclability). Bij pyrolyse ontstaat ook pyrolyseolie. De inzet als brandstof is geen recycling (geen materiaalbehoud). Wanneer pyrolyseolie gebruikt gaat worden voor productie van nieuwe kunststoffen (deze ambitie is er) wordt de circulariteit hoger.

Op basis van de beschikbare gegevens en de ZZS-module kan geconcludeerd worden dat de aanwezige ZZS uit rCB voldoende verwijderd worden. Voor pyrolyseolie (voor toepassing in brandstof) kan momenteel niet worden gegarandeerd dat mogelijk aanwezige ZZS afdoende kunnen worden verwijderd. Er kunnen met name organo-halogenen en BTEX ontstaan in het pyrolyseproces, die terecht kunnen komen in de scheepsbrandstoffen (de grenswaarden voor benzeen en organo-halogenen van respectievelijk 1.000 en 50 mg/kg worden mogelijk overschreden). Bij verbranding kunnen de laatste omgezet worden in dioxinen. We bevelen aan meer metingen te doen van concentraties van verschillende ZZS in deze reststromen en de recyclingproducten; hiermee kunnen onzekerheden over mogelijke emissies en blootstelling worden weggenomen.

Voor stalmatten wordt aanbevolen na te gaan of en in welke mate emissie van stoffen of microplastics naar het milieu optreden.

Tot slot is gereflecteerd op de gevolgde SSML-methode en is aangegeven waar doorontwikkeling mogelijk is. We constateren dat het voor een indicator voor circulariteit (of 'hoogwaardige verwerking') gewenst is om onderscheid te maken in recycling tot nieuwe

grondstoffen (na bv pyrolyse), tot hetzelfde product of tot andere (laagwaardiger) producten. Voor de ZZS-module is het van belang niet alleen te kijken naar de (absolute) risico's van een nieuwe toepassing, maar ook naar risico's van gebruikte virgin grondstoffen en de risico's bij de huidige afvalverwerking. Ook is duidelijk geworden dat bij verwerking van afvalstromen ook nieuwe (zorg)stoffen kunnen worden gevormd. Daarmee is bij de productregelgeving op basis van 'virgin' grondstoffen dan geen rekening gehouden.

Tot slot bevelen we aan te streven naar de beschikbaarheid van kentallen voor de berekening van de milieu-impact te verbeteren en data over het voorkomen en concentraties van stoffen in reststromen, bijvoorbeeld via databases, beter toegankelijk te maken. Hierdoor zal het in de toekomst eenvoudiger worden deze analyses uit te voeren.

1 Inleiding

1.1 Context

Bij het herwinnen van materialen is het gewenst inzicht te hebben in de mate waarin de milieu-impact afneemt en of risico's voor mens en milieu acceptabel zijn. Komen tot veilige en duurzame materiaalkringlopen betekent dat materialen lang in de keten blijven, teruggwinning wordt geoptimaliseerd, wordt gezocht naar (hoogwaardige) toepassing van grondstoffen uit afvalstoffen, en dat hergebruik en recycling veilig is. We richten ons in deze studie op het omgaan met bestaande afvalstromen. Daarbij zijn einde-afvalcriteria van belang, zoals beschreven in het LAP3¹ (en opgenomen in Wet Milieubeheer art 1.1 en Kaderrichtlijn afval artikel 6). REACH-regelgeving² van toepassing op de samenstelling van nieuwe producten, die gericht is op het vervangen van de meest milieugevaarlijkste stoffen uit ketens. Met einde-afvalcriteria, en met de beoordeling van de netto-effecten op milieukwaliteit, dient bekeken te worden of een nieuwe levenscyclus of toepassing mogelijk en gewenst is.

In 2020 hebben bedrijven het initiatief genomen tot pyrolyse van oude voertuigbanden. Dit kunnen banden zijn voor personenauto's en licht tot zware vrachtwagens, in dit advies noemen we alle voertuigbanden 'autobanden'. Initiatiefnemers konden bij Rijkswaterstaat (RWS) verzoeken doen om tot een (informeel) rechtsoordeel te komen. Vanuit RWS en vanuit omgevingsdiensten zijn binnen die context vragen gesteld over de veiligheid en de bijdrage aan de circulaire economie van deze initiatieven. Het RIVM is gevraagd om over deze casus te adviseren.

Om te adviseren over vragen over risico's en milieuwinst van alternatieve recycling is het raamwerk Safe- and Sustainable Material Loops (SSML) (Quik et al., 2019) gebruikt. Dat is opgesteld om initiatieven voor verwerken van reststromen te beoordelen. Deze methodiek kijkt zowel naar de milieuwinst als naar de potentiële risico's van de aanwezigheid van stoffen bij de verwerking en in de nieuwe materialen en producten. De modules richten zich enerzijds op milieu-impact en circulariteit ('milieuwinst') en anderzijds op risicobeheersing van zeer zorgwekkende stoffen (ZZS), geneesmiddelen, bestrijdingsmiddelen, pathogenen en antibioticaresistentie. Door een trapsgewijze boordeling wordt gestreefd naar een benadering die eenvoudig is als het kan en uitgebreider als dat nodig is.

Het SSML-raamwerk geeft stappen aan die gevolgd kunnen worden om tot een advies te komen. Daardoor ontstaat meer consistentie en transparantie in de beoordeling van verwerkingsmethoden dan wanneer dat per geval wordt gedaan. Dit draagt bij tot het beter en verantwoord sluiten van productketens.

¹ Landelijk Afvalbeheer Plan, Ministerie van IenW, zie <https://lap3.nl/>.

² <https://echa.europa.eu/nl/regulations/reach/legislation>.

1.2 Doel en vraagstelling

Het doel van deze studie is om enerzijds meer inzicht te geven in de veiligheid van de verwerking van voertuigbanden met pyrolyse en anderzijds in de milieuwinst van deze technologie ten opzichte van een referentie verwerkingswijze. Mede op basis van deze informatie kunnen beter onderbouwde beslissingen worden genomen over keuzes die gemaakt moeten worden bij einde-afvalvraagstukken. Ook helpt het om aandachtspunten bij de vergunningverlening scherper te krijgen.

De uitwerking heeft als nevensdoel bij te dragen aan de verdere ontwikkeling van een afwegingskader dat geschikt is om voor een keten de veiligheid van herwonnen materiaalstromen voor mens en milieu te beoordelen én de circulariteitswinst en milieu-impact zichtbaar te maken.

Deze doelen leiden tot de volgende onderzoeksvragen over beoordelen van de veiligheid en milieuwinst:

- Wat zijn belangrijke keuzes bij het bepalen van de scope (afbakening) van de casus? Welke opties zijn er daarvoor, welke kiezen we en waarom?
- Is alle informatie beschikbaar die gevraagd wordt in de huidige SSML-methode?
- Zijn de bestaande criteria voldoende om tot een beoordeling te komen? Zijn aanvullingen op toetsingscriteria zijn nodig?
- Welke secundaire materialen en producten worden gemaakt en zijn voor deze producten gegevens beschikbaar om een beoordeling te doen?
- Wat is het (voorlopige) eindoordeel voor het verwerkingsproces en de eindproducten (zijn er nog onzekerheden die meer data of criteria vragen)?

1.3 Aanpak

Volgens de stappen in het SSML-raamwerk gaan we in op de milieuwinst en veiligheidsaspecten van deze casus. Daarvoor gaan we eerst in op het verwerkingsproces en de afbakening (scope) van de beoordeling en zijn de modules milieu-impact, circulariteit en ZZS geselecteerd om uit te werken. Hierbij is geprobeerd gebruik te maken van de relevante informatie in de literatuur en gegevens bij stakeholders (RWS en bedrijven). Op basis hiervan is inzicht verkregen in de samenstelling van de materialen en producten voor en na verwerking. Ook is bij de verwerker informatie opgevraagd voor het inschatten van de milieuwinst, circulariteitsindicatoren en milieu-impact ten opzichte van een referentieverwerking. Op basis van de informatie die in 2021 beschikbaar was, zijn voorlopige conclusies getrokken over de producten en het proces. Deze conclusies zijn gedeeld met de stakeholders. Daarbij zijn nog aanvullende data verkregen. Aansluitend is gereflecteerd op de SSML-methode om tot aanbevelingen voor verfijning te komen.

1.4 Leeswijzer

Eerst wordt de afbakening (scope) van de casus beschreven en wordt ingegaan op het pyrolyseproces (H2). De milieuwinst wordt ingeschat voor deze casus met de modules milieu-impact en circulariteit (H3). Daarna wordt ingegaan op de samenstelling en risico's van de materialen en de verwerking met de module ZZS (H4). Tot slot worden op basis van de informatie conclusies getrokken over de milieuwinst en de risico's voor deze casus (H5) en wordt afgesloten met een reflectie op de methode en enkele aanbevelingen voor ontwikkelpunten voor de SSML-methode (H6).

2 Proces en scope

2.1 Vaststellen scope

Om een vergelijking te maken tussen methoden van verwerking van materiaalstromen, is het van belang tot een heldere afbakening te komen. Voor het alternatieve verwerkingsproces en voor de referentie (huidige state-of-art-verwerking en productie van grondstoffen) gaan we in op de verwachte milieuwinst (via de module Duurzaamheid en de module Circulariteit). Daarnaast gaan we met name voor de alternatieve verwerking in op de veiligheid voor mens en milieu van de herwonnen materialen en van het verwerkingsproces. Figuur 2.1 geeft de scope schematisch weer, met aan de linkerzijde het alternatieve (of recyclingsscenario) en aan de rechterzijde het referentiescenario (of standaardscenario).

Alternatief verwerkingsproces

Het verwerkingsproces dat we in deze casus beschouwen, gaat om de volgende productketen:

- Afgedankte (vracht)autobanden tot granulaat (+ versterkende materialen, zoals staal en textiel; deze zijn geen onderdeel van de casus).
- Pyrolyse van (vracht)autobandengranulaat tot gassen (10-15 procent) + pyrolyseolie (circa 45 procent, range 30-60 procent) + viskeuze tot vaste stoffractie: recovered carbon black, rCB (circa 40 procent, range 30-60 procent).

De materialen/producten die worden gemaakt of ontstaan, worden op de volgende wijze toegepast:

- gassen die worden ingezet in de eigen energievoorziening;
- pyrolyseolie die kan worden ingezet als blend-olie voor stookolie/bunkerolie/brandstofolie;
- rCB die kan worden toegepast als vulstof in de verfindustrie en bij de productie van nieuwe autobanden.

We beperken de scope tot het deel dat nodig is voor een vergelijk. Dit betekent dat we starten met het granulaat dat afkomstig is uit voertuigbanden (exclusief granuleren van de hele band) en stoppen bij de producten rCB en de blend-olie.

Referentie: huidige verwerking autobanden

De alternatieve verwerking wordt vergeleken met de state-of-the-art-verwerking van autobanden als referentie. In sectorplan 52 van LAP3³ staat als minimumstandaard: recycling en pyrolyse van granulaat onder een aantal voorwaarden. Daarnaast is voor banden die niet geschikt zijn voor recycling een 'andere nuttige toepassing' toegestaan (bijvoorbeeld hoofdgebruik als brandstof).

RecyBEM organiseert de inzameling en verwerking van alle afgedankte Nederlandse autobanden (9,6 miljoen in 2019) en zorgt voor een milieuverantwoorde verwerking (RecyBEM, 2020, 2022), in

³ Landelijk Afvalbeheer Plan; <https://lap3.nl/>

overeenstemming met de producentenverantwoordelijkheid uit het Besluit beheer autobanden. Vrachtwagenbanden vallen niet onder dit besluit (ze vallen wel onder sectorplan 52 wanneer ze qua samenstelling overeenkomen met autobanden). In Tabel 2.1 is de verwerking van banden en toepassing van rubbergranulaat voor twee jaren opgenomen. Het kan van jaar tot jaar verschillen.

Tabel 2.1 Verwerking van autobanden en toepassing van rubbergranulaat in 2019 en 2021 (RecyBEM, 2020, 2022).

Verwerking	2019	2021
Producthergebruik door banden van nieuw loopvlak te voorzien (dit valt binnen het LAP onder 'voorbereiden voor hergebruik!')	0,56%	1,08%
Producthergebruik: tweede gebruik als band	26,9%	26,1%
Producthergebruik: gebruik van hele band in de weg en waterbouw, de landbouw of bij kartbanen ('alternatief hergebruik')	0,9 %	0,19%
Recycling en toepassing van rubbergranulaat: <ul style="list-style-type: none"> o Stalmatten o als rubber-infill in kunstgrasvelden o veiligheidstegels (in speeltuinen) en daktegels o onderlaag van kunstgras sportvelden o rubber in asfalt o industriële rubberpoeders, onder meer via pyrolyse o vormproducten o in overige toepassingen, waaronder atletiekbanen 	69,8%; 54,2 kton 11,4 kton 11,4 kton 10,9 kton 8,1 kton 0,03 kton 2,7 kton - 9,7 kton	70,9%, 54,7kton 3,61 kton 10,33 kton 12,70 kton 6,49 kton 0,18 kton 2,38 kton 15,46 kton 3,50 kton
Alternatieve brandstof in de cementindustrie, in warmtekrachtinstallaties en bij staalproductie (= nuttige toepassing en herwinning staal).	1,89%; max 400.000 banden/jr)	1,71%
Storten (stortverbod)	0%	-
Totaal	100%	100%

Op basis van de in omvang grootste toepassing en die het minimum is in het LAP, kiezen we voor twee referentiescenario's:

- direct gebruik van autobanden als alternatieve brandstof in cementovens (huidige meest laagwaardige verwerking dat in Nederland klein is, maar in Europa nog gangbaar);
- gebruik van rubbergranulaat in stalmatten (in 2019 in omvang de meest voorkomende toepassing).

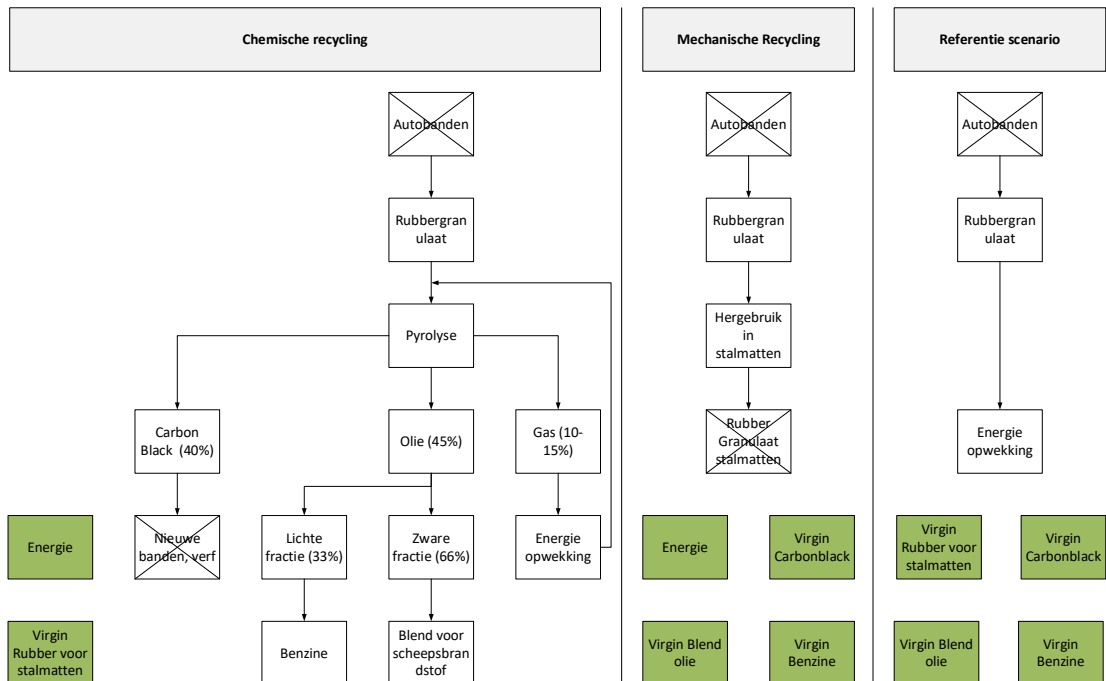
Referentie: vervanging primaire grondstoffen

Een belangrijk perspectief is om na te gaan welke primaire grondstoffen door de secundaire kunnen worden vervangen. Deze worden door recycling uitgespaard. Via pyrolyse van autobanden worden twee primaire grondstoffen/materialen uitgespaard ten opzichte van de referentiescenario's:

- carbon black voor toepassing in nieuwe autobanden en verf; deze is afkomstig van de verbranding van olie: zogenaamde 'furnace carbon black'); we gaan niet specifiek in op de verschillende toepassingen waartussen ook de kwaliteit kan verschillen;

- blend-olie om te gebruiken voor het meer vloeibaar maken van stookolie.

Binnen de module Duurzaamheid en de module Circulariteit wordt de afbakening voor het vergelijk verder uitgewerkt (zie hoofdstuk 3). Voor de beoordeling van zorgstoffen wordt gekeken naar de aanwezigheid en potentiële risico van stoffen in de nieuwe materialen en de potentiële emissies naar het milieu tijdens de verwerking en tijdens het gebruik (hoofdstuk 4).



Figuur 2.1 Systeemgrenzen SSML milieu-impactmodule voor de recycling van autobanden; tot het referentiescenario (rechterzijde) behoren ook de materialen die worden vervangen in het recyclingsscenario (groene blokken onder zijde); de blokken met een kruis zijn buiten de scope geplaatst van de milieu-impactanalyse, maar wel onderdeel van de keten.

2.2 Pyrolyse van autobanden en beleidsmatige context

In Nederland verkennen enkele bedrijven het pyrolyseren van rubbergranulaat van ingezamelde afgedankte (vracht)autobanden tot nieuwe vermarktbare producten. Het recovered carbon black (rCB) kan toegepast worden bij de fabricage van nieuwe autobanden of als vulstof in verven en lakken. De niet condenseerbare gassen worden grotendeels gebruikt voor de energievoorziening van de eigen inrichting. De pyrolyseolie is mogelijk geschikt als blendolie voor scheepsbrandstof of zal worden gebruikt als grondstof om koolwaterstoffen, zoals isopreen, limoneen, benzeen, ethylbenzeen, toluen en xylenen terug te winnen. Deze stoffen zijn op hun beurt basischemicaliën in de (petro)chemische industrie.

Het beleidskader wordt gevormd door de Wet milieubeheer en het LAP3⁴ (die een invulling geven aan de huidige Kaderrichtlijn over afvalstoffen

⁴ Ministerie van IenW, 2021a (<https://lap3.nl/beleidskader/>).

(Richtlijn 2000/98/EG)⁵). Essentieel bij het benutten van reststromen is dat er een onderscheid wordt gemaakt tussen een afvalstof en een product (zie Leidraad 'afvalstof of product' (zie ministerie van IenW, 2021b⁶). De niet herbruikbare autobanden en de afgescheiden gegranuleerde rubbermaterialen zijn afvalstoffen. Dit betekent dat het op de markt brengen van pyrolyseolie, evenals het rCB en de niet condenseerbare gassen, moet voldoen aan de einde-afvalstatus volgens de voorwaarden in artikel 6, eerste lid, van de Kaderrichtlijn afvalstoffen⁷ (Kra). De beoordeling is afhankelijk van een (beoogde) specifieke toepassing van de pyrolyseolie in de markt en moet per specifieke toepassing uitgevoerd worden. Deze voorwaarden gaan over de toetsingscriteria zekerheid en rechtmatigheid. In lid 1a en 1b gaat het over de mogelijkheid en zekerheid van het gebruik van de pyrolyseolie in de markt. Lid 1c betreft de rechtmatigheid over de conformiteit van de toepasselijke wet- en regelgeving van het gebruik van de pyrolyseolie als product en lid 1d betreft de kwaliteit en de veiligheid van het product voor de mens en het milieu. Daarnaast bepaalt de minimumstandaard in het sectorplan 52 van het LAP3 de minimale hoogwaardigheid van de verwerking van de autobanden en het rubbergranulaat. De uitwerking in dit rapport geeft inzicht in mogelijke nadelige effecten voor mens en milieu (risico's) van de materialen en anderzijds de hoogwaardigheid op basis van de module milieu-impact en module circulariteit. Ook de risico's voor de omgeving door emissies tijdens de verwerking, de arbeidsveiligheid en externe veiligheid tijdens de verwerking zijn van belang. Deze blijven in deze rapportage buiten beschouwing.

2.3 Het pyrolyseproces op hoofdlijnen

Pyrolyse van (vracht)autobanden is te omschrijven als een chemische omzetting of ontleding van de rubbermaterialen en de daarin aanwezige organische verbindingen door verhitting in afwezigheid van (voldoende) in de lucht aanwezige vrije zuurstof. In de basis vinden er tijdens de pyrolyse degradatiereacties plaats van de copolymeren waaruit het rubber bestaat, zoals kraken (verbreken van koolstofverbindingen), eliminatie en dehydrogenering (onttrekking van waterstof). Nieuwe stoffen kunnen tijdens de pyrolyse uit de ontledingsproducten ontstaan door substitutie en additie. Hieruit vormen zich drie fracties:

- **Gasvormige fractie** zoals: waterstof (H₂), waterstofsulfide (H₂S), methaan (CH₄), ethaan (C₂H₆), propaan (C₃H₈), butaan (C₄H₁₀), ammoniak (NH₃) en relatief kleine hoeveelheden koolmonoxide (CO) en kooldioxide (CO₂). Bij halogeenhoudende rubbers ontstaan ook waterstofchloride (HCl) en waterstofbromide (HBr);
- **Vloeibare fractie** ofwel **pyrolyseolie**. De olie bestaat grotendeels uit verzadigde en onverzadigde lineaire (rechtketenig en vertakt) en cyclische alifatische koolwaterstoffen (alkanen en alkenen), monocyclische aromatische koolwaterstoffen (benzeen en alkylbenzenen) en polycyclische aromatische koolwaterstoffen -PAK- (zoals naftaleen en benzo(a)pyreen). De alifatische

⁵ Opmerking: de kaderrichtlijn over afvalstoffen is in 2018 gewijzigd via Richtlijn 2018/851/EU). Op 2 maart 2021 is deze richtlijn in de Nederlandse wetgeving (tweede versie LAP3) geïmplementeerd.

⁶ IenW, 2021b. Leidraad_afvalstof_en_product, versie 1.2

⁷ Richtlijn 2008/98/EG.

- koolwaterstoffen worden ook wel paraffinen (alkanen), olefinen (alkenen) en naftenen (cyclische koolwaterstoffen) genoemd.
- een viskeuze tot **vaste stoffractie**. Hiervoor zijn verschillende namen in gebruik, zoals teer, bitumen, asfalt, *char* en *rCB*. Deze fractie bevat hoofdzakelijk de elementen koolstof en waterstof die aanwezig zijn in organische verbindingen met een kookpunt vanaf ruwweg 350°C en hoger. De vaste stoffractie kan hoge PAK-gehalten bevatten en verder lage gehalten tot enkele massaprocenten aan organische verbindingen met elementen zoals stikstof, zwavel, halogenen (chloor en broom) zuurstof en fosfor. Tevens zijn lage gehalten aan metalen en hun verbindingen afkomstig van additieven in de banden en restanten van afgescheiden metalen onderdelen in de banden te verwachten.

De producten van het pyrolyseproces zijn afhankelijk van:

- de samenstelling van de banden;
- de deeltjesgrootte van het rubbergranulaat;
- de snelheid van de verhitting in de oven;
- de eindtemperatuur van de oven, variërend van 300 tot 900°C;
- de pyrolysetijd;
- eventuele nabehandelingsschappen.

De productsamenstelling van het pyrolyseproces uitgedrukt in massaprocenten verhoudt zich in grootteorde als: 10-30 procent gas, 30-60 procent pyrolyseolie en 30-60 procent rCB (Williams, 2013; Sathiskumar & Karthikeyan, 2019). De fractiegrootte en de chemische samenstelling van de pyrolyseolie wordt in belangrijke mate bepaald door de procesparameters, zoals temperatuur en verblijftijd en minder door de rubbersamenstelling van de (vracht)autobanden. Ook is het type oven (reactor) van significante invloed.

3 Milieuwinst: module milieu-impact en circulariteit

3.1 Methode

Voor de bepaling van de milieuwinst van de pyrolyse van voertuigbanden is de SSML milieu-impact module en de circulariteitsmodule gebruikt (Quik et al., 2019). Het SSML-raamwerk maakt gebruik van een getrapte aanpak, waarbij elke trede meer data behoeft, maar ook meer detail toevoegt aan de resultaten.

Voor de **milieu-impact**module is geen eerste trede beschikbaar. De tweede trede gaat uit van een vergelijking van het recyclingscenario met een referentiescenario aan de hand van twee milieu-impactcategorieën (energie/CO₂-equivalenten en landgebruik), die in deze module als proxy gebruikt worden voor andere impacts. In de derde trede past een volledige (multi-cycli) levenscyclusanalyse. De analyse richt zich op trede twee, zodat een vlotte analyse mogelijk is. Een volledige (m)LCA zou meer data en tijd vragen en is alleen nodig wanneer er kleine verschillen zouden zijn. Voor de milieu-impactanalyse van pyrolyse van (vracht)autobanden tot recovered carbon black (rCB) en pyrolyseolie vergelijken we dit scenario met het scenario Mechanische recycling tot stalmatten én met het referentiescenario Verbranding in een cementoven. We kiezen deze laatste als referentie, omdat verbranding in een cementoven momenteel in Europa een zeer gangbare (laagwaardige verwerking is, anders dan in Nederland). Omdat virgin rubber deels een natuurproduct is, kijken we naast klimaat-impact ook naar het landgebruik dat nodig is om dit rubber te produceren (40 procent natuurrubber en 60 procent synthetisch rubber; Ecomatters, 2018).

Figuur 2.1 geeft een beeld van het pyrolyseproces en de systeemgrenzen die aangehouden worden. Daarnaast zijn de systeemgrenzen van het referentiescenario weergegeven. Het vermalen/granuleren van de autobanden tot rubbergranulaat valt buiten de scope van de analyse, omdat dit in alle drie scenario's voorkomt (bij verbranding worden banden vaak alleen verkleind, maar zonder staal en textiel te verwijderen). Bij pyrolyse van het rubbergranulaat ontstaat rCB (circa 40 procent), olie (ongeveer 45 procent) en gas (circa 15 procent) (zie Figuur 2.1). Het rCB dat vrijkomt, kan ingezet worden bij nieuwe autobanden of in verf. Beide toepassingen zelf vallen buiten de scope (de productie van rCB ligt binnen de scope en de toepassing ligt buiten de scope). De oliefractie uit het pyrolyseproces (ook binnen de scope) is op te delen in een lichte fractie (33 procent), die tot benzine opgewerkt kan worden, en een zware fractie (66 procent) die als blendolie voor scheepvaartbrandstoffen ingezet kan worden. Het gas dat vrijkomt, wordt gebruikt als energie-input van het pyrolyseproces zelf en is daarmee geen materiaal/product uit het verwerkingsproces. Rubbergranulaat kan ingezet worden als bouwsteen voor stalmatten. Op deze manier wordt virgin rubber vervangen voor recycled rubber. De laatste verwerkingsoptie waar naar gekeken is, is energieopwekking vanuit rubbergranulaat, hierbij vervangt het de gemiddelde energiemix (of de gebruikte andere brandstoffen). De gebruikte databronnen staan in Bijlage 1.

Voor de bepaling van de **circulariteit** van verwerking van autobanden maken we gebruik van de circulariteitsmodule van SSML (Quik et al., 2019). Binnen de circulariteitsmodule gebruiken we trede één en trede twee. Trede één gaat om een check op of er critical raw materials (CRM⁸) in de afvalstroom zitten en of de vraag naar de grondstof op korte termijn flink zal groeien. Trede twee geeft inzicht in de circulariteitsscore van het recyclingproces aan de hand van drie indicatoren:

- recovery efficiency;
- contribution to the market; en
- recyclability.

Alle drie indicatoren kijken naar de grondstoffen die weer in een nieuw product verwerkt kunnen worden. Toepassing als brandstof wordt niet gezien als recycling, omdat deze stoffen afgebroken worden voor energieopwekking. In het geval van de pyrolyse van autobanden kijken we naar de winning van rCB. Het gas en de olie die ook gewonnen worden uit pyrolyse van autobanden, vallen vooralsnog buiten de scope van recycling. Wanneer de olie ook ingezet wordt voor de productie van bijvoorbeeld kunststoffen, verandert dit.

De *recovery efficiency* geeft een inzicht in hoe efficiënt het pyrolyse proces is in het winnen van rCB uit autobanden en hoeveel hulpstoffen er nodig zijn om deze grondstoffen te winnen.

De *contribution (to the market)* geeft een inzicht in hoeveel van de vraag naar carbon black vervuld kan worden vanuit het pyrolyseproces wanneer alle autobanden (die in Nederland vrijkomen) op deze manier verwerkt zouden worden.

Recyclability geeft inzicht in of de herwonnen rCB ook weer gewonnen kan worden uit de nieuwe toepassing (in de volgende afvalfase), oftewel in hoeverre het bijdraagt aan het sluiten van de materiaal kringloop van de nieuwe toepassing.

3.2 Resultaten

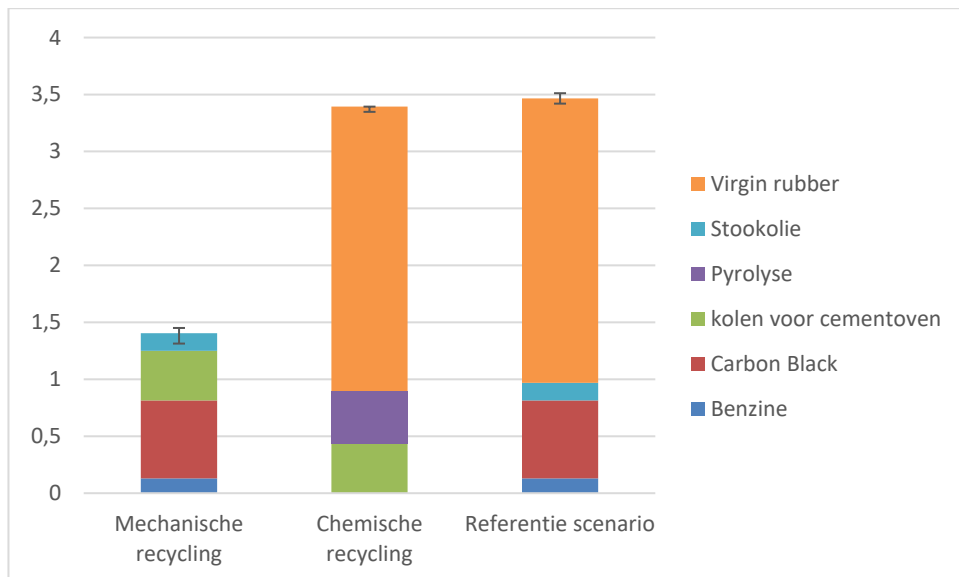
3.2.1 Milieu-impact

Zowel mechanische recycling van autobanden als pyrolyse van autobanden heeft besparing van broeikasgasemissies tot gevolg ten opzichte van verbranding van autobanden (met energierugwinning). Mechanische recycling bespaart 2,1 kg CO₂-eq per kg rubbergranulaat ten opzichte van het referentiescenario. Pyrolyse bespaart 0,1 kg CO₂-eq (zie Figuur 3.1). De daadwerkelijke besparing kan door bijvoorbeeld verschillen in transport bewegingen anders zijn. Doordat verbranding in een cementoven kolen uitspaart (met relatief veel CO₂- emissie), is het verschil met pyrolyse beperkt. Veel emissiebesparing (2,5 kg CO₂/kg) bij mechanische recycling wordt gehaald doordat er op deze manier geen virgin rubber gebruikt hoeft te worden voor stalmatten. Mechanische recycling zelf wordt geen impact aan toegekend, omdat het granuleren buiten de scope voor het bepalen van de milieu-impact is geplaatst, net als het vormen van nieuwe producten (stalmatten/nieuwe banden). Granuleren (of verkleinen voor de referentie) gebeurt voor alle drie scenario's, waardoor dit proces weinig onderscheidend zal zijn. Daarom is het niet meewogen.

⁸ Critical Raw Materials Resilience: Charting a path towards greater security and sustainability. 2020. Accessed through <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.

Het pyrolyseproces zelf veroorzaakt een deel (0,46 kg CO₂/kg) van de totale emissies van het pyrolysescenario. Bij pyrolyse is de besparing van virgin carbon black (CB) daarnaast een belangrijke factor (0,68 kg CO₂/kg). Het toepassen van rubbergranulaat in cementovens in plaats van kolen levert, uitgaande van een vervanging van 1:1 kolen en rubbergranulaat, een CO₂-besparing op van (0,43 kg CO₂/kg). Wel leidt het mogelijk tot hogere fijn stof- en zwavelemissie. Wanneer in de toekomst andere brandstoffen (gas of groene energie) worden gebruikt, zal de besparing aanzienlijk minder zijn.

Wanneer alle autobanden (55kton) verwerkt zouden worden via pyrolyse tot rCB en pyrolyse olie in plaats van de referentie, zou dit 4 kton CO₂ per jaar besparen. Bij het mechanisch recyclen van rubbergranulaat tot stalmatten zou dit een besparing opleveren van (115 kton CO₂ per jaar).



Figuur 3.1 Vergelijkende berekening emissies (in CO₂-equivalenten/kg rubbergranulaat) per scenario: pyrolyse, mechanische recycling tot stalmatten en het referentiescenario verbranding in een cementoven, uitgesplitst naar stap in het recyclingproces. Onzekerheidsmarges zijn gebaseerd op marges in teruggewonnen materiaal. In de presentatie van deze figuur worden de producten uit het verwerkingsproces bijgeteld als emissies bij de overige scenario's.

Landgebruik

Omdat rubbergranulaat van autobanden ook deels een natuurproduct is, wordt door het hergebruik van het rubber ook landgebruik vermeden dat anders nodig zou zijn voor de productie van natuurlijk rubber. 60 procent van het rubbergranulaat van autobanden komt van synthetisch rubber en 40 procent van het rubber is natuurrubber. Door dit rubbergranulaat intact te houden en in te zetten bij stalmatten, hoeft hiervoor geen virgin natuurrubber gewonnen worden en kan per kg rubber er 0.062 m² per jaar aan landgebruik bespaard worden (EcoInvent v3). Wanneer alle 8,4 miljoen autobanden op deze manier verwerkt zouden worden, bespaart dit 4,2 km² per jaar (RecyBem, 2018).

3.2.2 *Circulariteit*

Binnen module circulariteit, trede 1 worden voor het rubbergranulaat geen leveringsproblemen verwacht. Ook bevat de materiaalstroom geen critical raw materials, waardoor voor duiding van circulariteit de analyse verder gaat naar trede 2. Binnen de circulariteitsmodule trede 2 tellen alleen de materiaalstromen mee voor de circulariteitscore die niet eindigen als brandstof.

Uit rubbergranulaat van autobanden kan volgens de verwerker tussen de 350 en 400g rCB gewonnen worden per kg rubbergranulaat (Ecomatters, 2018). Omdat per kg band 0,75 kg rubbergranulaat ontstaat (naast 0,15 kg staal en 0,1 kg textiel fractie⁹, gaat het om 0,263 – 0,30 kg/kg band. Voor dit proces is 9,2g aan additieven nodig, zoals 5 gram verpakkingsmateriaal, 4 gram natronloog en 0,2g waterbehandelingsmiddelen voor koelsystemen (Ecomatters, 2018). Hiermee komt de **recycling efficiency** van een autoband op 0,41 tot 0,45 (zie Figuur 3.2), waarvan 0,15 voor het staal (voor rubbergranulaat is dat 0,34 en 0,39).

Voor de **recyclability** van rubbergranulaat kijken we naar de situatie waarin de gewonnen grondstoffen in nieuwe autobanden ingezet kunnen worden. In geval van pyrolyse is dat rCB.. Een nieuwe autoband zal voor 21-30 procent bestaan uit carbon black en deze fractie is in principe ook weer terug te winnen uit de autoband. De recyclability van het rubbergranulaat in de autoband komt daarmee op circa 0,25.

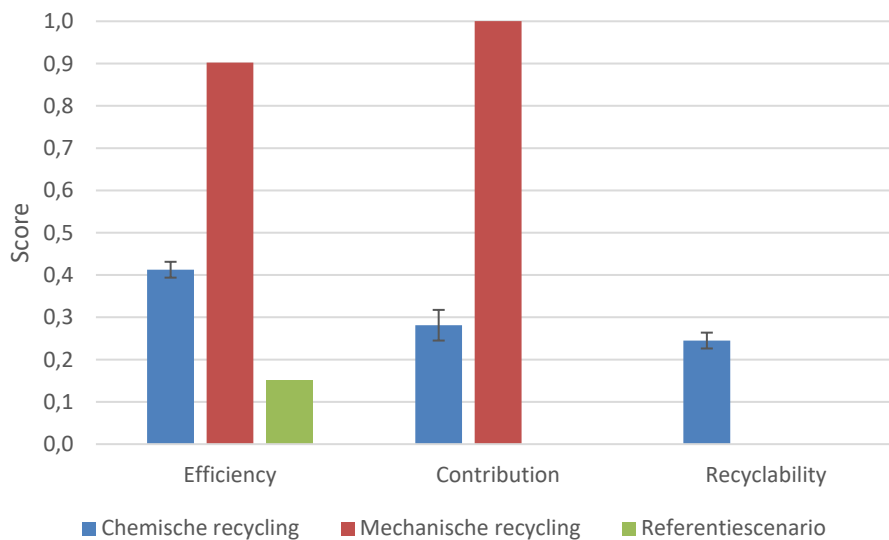
Contribution to the market. In 2017 zijn er 8,4 miljoen nieuwe autobanden op de Nederlandse markt geplaatst (RecyBEM, 2018). Met een gemiddeld gewicht van ongeveer 8 kg (FFact, 2020) gaat het om ongeveer 67 kton autobanden. Dit is exclusief de hoeveelheid vrachtwagenbanden die in 2018 naar verwachting in dezelfde orde van grootte in gewicht zal liggen (totaal voertuigbanden 108 kton in 2005 (SENTERNOVEM, 2008)). Om 67 kton banden te produceren, is 17 kton aan carbon black nodig. Met de efficiency van gemiddeld 0,37 (range 0,34-0,39) zou uit deze hoeveelheid banden 6,1 kton aan rCB gewonnen kunnen worden. Uitgaande van verwerking van alle oude banden (ca. 8,4 miljoen excl. vrachtwagenbanden) via pyrolyse, komt dit neer op een contribution van 0,37 aan de vraag naar carbon black voor nieuwe autobanden. Andere toepassingen, zoals toepassing van carbon black in verf, zijn buiten de scope gelaten.

Deze circulariteitscores moeten vergeleken worden met de circulariteitscores van het referentiescenario. De circulariteitscore van pyrolyse van rubbergranulaat vergelijken we met de inzet in stalmatten én met het verbranden van rubbergranulaat. Wanneer het rubbergranulaat verbrand wordt in een cementoven, is de recycling efficiency 0,15 (recycling van het staal) de andere twee indicatoren zijn 0. Materialen die verbrand worden, dragen namelijk niet bij aan deze circulariteitsindicatoren.

Wanneer rubbergranulaat ingezet wordt voor stalmatten, komt dit neer op een efficiency van 1. Voor de verwerking van rubbergranulaat naar de grondstof voor stalmatten heeft het rubbergranulaat geen verdere verwerkingsstappen of hulpstoffen nodig.

⁹ Bron: RecyBEM 2022 en <https://www.genan.eu/products/textile-fibres/>.

Wanneer alle oude autobanden verwerkt zouden worden tot stalmatten, is hiermee de vraag naar rubber voor stalmatten ongeveer 1,1x te vervullen (CLO, 2020; Van der Peet, 2018). Dit komt neer op een contribution van boven de 1. Dit is in werkelijkheid niet mogelijk, maar geeft aan dat het mogelijk is virgin rubbergebruik te vervangen in de totale markt voor stalmatten. De huidige verdeling van gebruik van rubbergranulaat laat echter zien dat de werkelijke bijdrage lager zal zijn (zie paragraaf 2.1). Voor stalmatten is het momenteel onbekend recycling vanwege vervuiling mogelijk is. Daarom is vooralsnog aangenomen dat stalmatten na gebruik volledig verbrand worden (met warmte terugwinning); dit is gelijk aan een recyclability van 0.



Figuur 3.2 SSML circulariteitsindicatoren trede 2 resultaat van chemische recycling (pyrolyse), mechanische recycling en het referentiescenario. De waarden voor het referentiescenario zijn deels 0, waardoor deze niet zichtbaar zijn.

3.3 Discussie

Pyrolyse van autobanden heeft minder milieu-impact en een hogere circulariteitsscore dan het referentiescenario van verbranden met energierugwinning. Toepassing van rubbergranulaat in stalmatten heeft een lagere milieu-impact dan pyrolyse en verbranden. Dat toepassing van rubbergranulaat in stalmatten minder milieu-impact heeft wordt verklaard door het behoud van de integriteit van het materiaal bij deze toepassing, terwijl bij pyrolyse het materiaal deels wordt vernietigd. Daarbij is de toepassing van rubbergranulaat in stalmatten een vorm van mechanische recycling en scoort dit -door het behoud van materiaal- ook hoger op de R-ladder dan pyrolyse. Toepassing van rubbergranulaat in stalmatten heeft echter een score groter dan 1 voor de contribution, dit betekent dat er ook gekeken moet worden naar andere mogelijke toepassingen van het rubbergranulaat. Het verschil in milieu-impact tussen verbranding en pyrolyse van autobanden zal in de toekomst groter worden dan nu het geval is (ten gunste van pyrolyse). Dit komt doordat de Nederlandse energiemix meer uit duurzame energie zal bestaan. Momenteel vervangt de energieopwekking door verbranding van rubbergranulaat voornamelijk

Nederlandse netstroom die nog grotendeels opgewekt is uit fossiele brandstoffen. Wanneer in de toekomst de Nederlandse netstroom voornamelijk duurzaam opgewekt is, zal verbranding van rubbergranulaat nog minder gunstig worden.

Voor het bepalen van de circulariteit van pyrolyse van rubbergranulaat zijn de olie en gas die gewonnen zijn niet meegenomen, terwijl dit wel stoffen zijn die gewonnen worden uit de materiaalstroom. Omdat het brandstoffen zijn, helpen ze verder niet bij het circulair maken van de materiaalstroom. Naar verwachting zullen in de toekomst uit de zware oliefractie grondstoffen voor plastics worden geproduceerd. Wanneer dit mogelijk is, verbetert de circulariteit van het pyrolyse proces.

Autobanden bestaan uit meer dan enkel carbon black. Om uit oude autobanden door pyrolyse weer nieuwe autobanden te maken, zullen dus altijd nieuwe grondstoffen nodig zijn. Dit zien we ook terug in de circulariteitsscore. Ondanks dat bijna al het carbon black uit het rubbergranulaat teruggewonnen wordt, blijft de efficiency onder de 0,4. Deze score is hoger te krijgen door de andere stoffen die uit rubbergranulaat gewonnen worden niet als brandstof in te zetten. Dat er nog altijd nieuwe grondstoffen nodig zijn om na pyrolyse weer nieuwe autobanden te maken, zien we ook terug in de contribution (to the market). Er is meer voor nodig dan pyrolyse om autobanden volledig circulair te maken.

In SSML worden drie verschillende circulariteitsindicatoren aangeboden: efficiency, contribution en recyclability. Pyrolyse en mechanische recycling scores verschillend ten opzichte van elkaar op deze indicatoren. Door een gebrek aan perspectief op recycling van het product stalmatten (recyclability = 0), is deze toepassing momenteel overall minder circulair dan pyrolyse $0,37 \times 0,37$ versus 1×0 voor twee cycli. Ondanks de lagere recycling efficiency is de recyclability van pyrolyse hoger. Daardoor blijft deze materiaalstroom ook in de toekomst beschikbaar, hetgeen een belangrijk aspect van materiaal circulariteit is. Daardoor is het momenteel lastig te stellen welke verwerkingsoptie het meest bijdraagt aan het circulair maken van de materiaalstroom. Daarbij komt dat de contribution van mechanische recycling en pyrolyse (chemische recycling) eigenlijk over verschillende markten gaat. Mechanische recycling levert een bijdrage aan de markt voor rubber(granulaat), terwijl pyrolyse een bijdrage levert aan de markt voor carbon black. Mogelijke oplossingen zouden zijn om een weging aan te brengen in de indicatoren en om de functionele eenheid voor de circulariteit uit te breiden met een tijdshorizon waarin de materialen nog nuttig gebruikt worden. Ook is het van belang om te weten of stalmatten -na een voorbehandeling- toch te recyclen zijn.

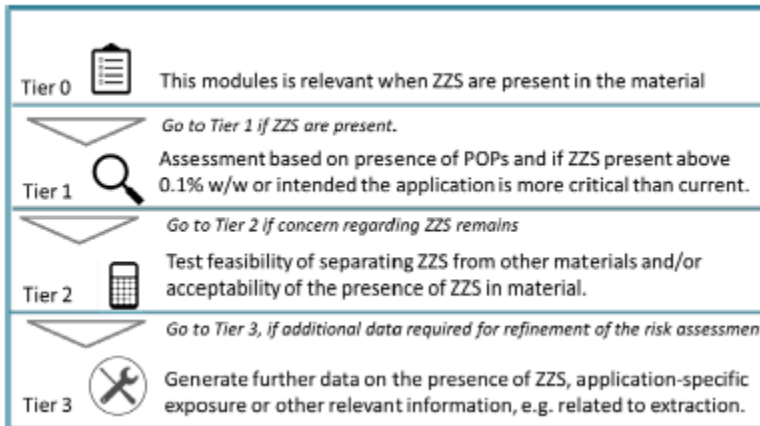
4 Module Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS)

4.1 Inleiding op de ZZS-module

De ZZS-module kijkt naar mogelijke risico's van de aanwezigheid van ZZS vanuit de afvalstroom of het proces in de nieuwe toepassing. Hierbij wordt zowel gekeken naar wettelijke eisen als naar de risico's. Het verwijderen van de ZZS gaat daarbij altijd boven de mogelijke veilige toepassing.

De module bestaat uit drie treden (zie Figuur 4.1)

1. De aanwezigheid van ZZS in de afvalstroom en product.
2. De mogelijkheden voor verwijdering of het veilig toepassen.
3. De onzekerheden wegnemen.



Figuur 4.1 Schematische weergave van treden in de ZZS-module (uit: Quik et al., 2019).

Regelgeving ZZS in afvalstoffen

Het onderwerp ZZS in afvalstoffen krijgt veel aandacht in hoofdstuk B.14 en Bijlage 11 van het LAP3. Voor i) de verwerking van afvalstoffen en ii) de beoordeling van de einde-afvalstatus van een afvalstof voor een specifieke toepassing is een risicoanalyse nodig als ZZS voorkomen boven een in het LAP genoemde concentratiegrenswaarde. Deze risicoanalyse is alleen nodig indien de betreffende minimumstandaard uit het LAP of de Europese stoffenwetgeving (REACH, POP) niet voorziet in een veilige toepassing van de producten met geïdentificeerde ZZS. Via deze risicoanalyse wordt getoetst of de producten risico's op onaanvaardbare blootstelling aan ZZS van mens en milieu met zich meebrengen tijdens het gebruik, bij einde van de levenscyclus of volgende levensfase. RWS heeft een handreiking uitgebracht over het afwegingskader, de methodiek en de interpretatie van de risicoanalyse¹⁰.

De ZZS-module van SSML is grotendeels in lijn met LAP3 en de handreiking van Rijkswaterstaat. Beide hanteren een generieke concentratiegrenswaarde (gcw) van 0,1 massaprocent bij aanwezigheid

¹⁰ Rijkswaterstaat – Handreiking risicoanalyse ZZS (LAP3.NL)_versie 1.0 (nov 2018).

van geïdentificeerde ZZS voor een risicoanalyse. Voor een selecte groep van ZZS zijn specifieke concentratiegrenswaarden vastgesteld. Deze grenswaarden kunnen aanmerkelijk lager zijn dan de gcw en zijn te vinden in Tabel 17 van Bijlage 11 van LAP3.

4.2 Informatiebronnen

Voor de ZZS-module maken we gebruik van een aantal informatiebronnen die hieronder kort worden geïntroduceerd.

Informatie van pyrolysebedrijf

Een bedrijf dat een proces voor pyrolyse van banden heeft ontwikkeld, heeft informatie aangeleverd over het rCB uit pyrolyse uit hun productieproces. De informatie betreft analyserapporten van onderzoek op PAK's, PCDD/PCDF en PCB's, en de MSDS van de rCB. Binnen drie analyses van rCB uit pyrolyse op 16 PAK's is de maximale somconcentratie 7,57 mg/kg. Benzo(a)pyreen komt maximaal met een concentratie van 0,6 mg/kg voor. De analyses op PCDD/PCDF (dioxine) waren allen onder de rapportagegrens. De maximale som van dioxine in TEQ is 6,8 ng/kg (inclusief de rapportagegrens). Er zijn ook geen PCB's boven de rapportagegrens aangetoond. De maximale som 6PCB's inclusief rapportagegrens is 0,12 mg/kg.

Notitie pyrolyseolie in opdracht van RWS

In opdracht van Rijkswaterstaat heeft het RIVM eerder gekeken naar zorgstoffen bij de verwerking van autobanden tot pyrolyseolie. rCB was geen onderdeel van de vraagstelling. In Bijlage 2 zijn relevante delen van deze notitie over samenstelling en criteria opgenomen.

Op basis van informatie uit de wetenschappelijke literatuur en analyserapporten van chemische analyses staat vast dat pyrolyseolie een grote verscheidenheid aan stoffen bevat. Op basis daarvan is een lijst met aandachtstoffen opgesteld (Broekman, 2023). Hiervan zijn een aantal stoffen kritisch vanwege hun gevaarseigenschappen bij de blootstelling van de mens en het leefmilieu hieraan. Deze lijst met aandachtstoffen wordt (in combinatie met de andere bronnen) gebruikt voor de ZZS-module. Opgemerkt wordt dat deze lijst enkel over de pyrolyseolie gaat.

RIVM-onderzoeken naar rubbergranulaat

In 2016 heeft het RIVM onderzoek gedaan naar mogelijke gezondheidseffecten van synthetisch rubbergranulaat (Styreen butadiëen rubber, SBR) op sportvelden. Er zijn 600 granulaatmonsters van 100 velden geanalyseerd op 45 stoffen, waaronder PAK's, fenolen (4-tert-octylfenol, bisphenol A), ftalaten en vluchtige organische stoffen, benzothiazolen en metalen (zink en koper) (Oomen & De Groot, 2016). In 2018 is er een vervolgonderzoek gedaan naar de mogelijke milieurisico's rondom de sportvelden (Verschoor et al., 2018). Daaruit bleek dat kobalt, zink en minerale olie in het rubbergranulaat kunnen uitloggen en in de ondergrond terecht kunnen komen. In welke mate dat ook voor -vormgegeven- SBR stalmatten geldt, is onbekend.

VU-onderzoeken 2020 en 2021

De VU heeft in 2020 een onderzoek gedaan waarin PAK's, weekmakers, antioxidanten en vulcanisatiemiddelen zijn geanalyseerd van 50 kunstgrasvelden in Portugal (Celeiro et al., 2020). De resultaten laten concentraties PAK zien van 57 mg/kg in het materiaal en de aanwezigheid van verschillende weekmakers en vulcanisatiemiddelen.

In 2021 heeft de VU ook een onderzoek gepubliceerd van velden in Spanje, waarbij ook autobanden zelf en alternatieven, zoals zand of kurk, zijn geanalyseerd (Celeiro et al., 2021).

ERASSTRI-onderzoek (Schneider et al, 2020)

In het onderzoek 'European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber Infill' is Europeabreed onderzoek gedaan naar rubbergranulaat van voertuigbanden. Er zijn onder andere PAK's aangetoond (som 8-PAKs gemiddeld 8,5 mg/kg (standaarddeviatie (SD) 7,25), som 16-PAKs 51 mg/kg (SD 18,7)). Andere aangetoonde stoffen zijn aluminium (gemiddeld 5.383 mg/kg (SD 10.107)), kobalt (168 mg/kg (SD 12,6)), benzothiazole (48 mg/kg (SD 39,8)) en 2-hydroxybenzothiazole (34 mg/kg (SD 17,7)), 6PPD (571 mg/kg (SD 563)) en DPG (51 mg/kg (SD 25)), en 4-tert-octylphenol (14 mg/kg (SD 9)).

Cheng et al., 2021

In deze publicatie is een onderzoek uitgevoerd naar de aanwezigheid en de verdeling van de verontreinigingen met de elementen N, S en Cl in rCB, olie en gassen. In rCB is het hoogste aandeel aangetoond, waarbij ook aantoonbare aandelen in olie en gassen zijn gedetecteerd, geïdentificeerd en gekwantificeerd. De onderzoekers maken zich vooral zorgen over de organochloorverbindingen. Op basis van de gegevens van Cheng over CB en olie uit pyrolyse is respectievelijk 0,3 en 0,1 massaprocent organisch chloor te verwachten. Deze gehalten zijn onderhevig aan spreiding/onzekerheid die van parameters in het pyrolyseproces afhangen, de procesomstandigheden en uiteraard van de uitgangshehalten in het autobandengranulaat. Tevens kunnen in de gassen behalve zoutzuur ook organochloorverbindingen worden verwacht.

4.3 ZZS in het afval, pyrolyseolie, rCB en pyrolyse gas

Zoals in hoofdstuk 2 is beschreven, ligt de focus in dit rapport op de verwerking van autobanden door pyrolyse. Dit proces resulteert in drie producten: pyrolyseolie, carbon black (rCB) en niet-condenseerbare gassen. Hieronder worden de beschikbare gegevens over zorgstoffen samengevat voor achtereenvolgens autobanden, pyrolyseolie, en rCB. De pyrolyse gassen worden als brandstof in de eigen installaties benut en niet als product op de markt gezet. De ZZS-module is daarom niet van toepassing voor deze groep van stoffen.

Autobanden en granulaat

Het ingangsmateriaal voor het pyrolyseproces is een granulaat van de afgedankte rubberen (vracht)autobanden waarvan de versterkende materialen grotendeels zijn afgescheiden.

Het rubber van (vracht)autobanden bestaat doorgaans uit een mengsel van 2 of 3 copolymeren, waaronder meestal natuurrubber en synthetisch rubber en in mindere mate isobutyleen-isopreenrubber (IIR). In wetenschappelijke publicaties is grote overeenkomst in de samenstelling van de elementen en de materialen van autobanden (MVT- middle vehicle tyres) en vrachtwagenbanden (HVT- heavy vehicle tyres). Er is verschil in de samenstelling van auto- en vrachtautobanden. Het aandeel natuurrubber in vrachtautobanden is groter dan die in autobanden. Het verschil in rubbersoorten zou effect kunnen hebben op de hoeveelheid aromatische koolwaterstoffen fractie van de geproduceerde pyrolyseolie.

De (vracht)autobanden bevatten verder de volgende stoffen:

- Vulstoffen, zoals Carbon black (roet) en silica (alleen in personenautobanden) die de banden tevens de kenmerkende zwarte kleur geven;
- antidegradanten om de banden langer stabiel te houden tegen invloeden, zoals zonnestraling, zuurstof, ozon en extreme temperaturen;
- oliën en harsen die tijdens het productieproces worden toegevoegd om het gietproces van de rubbermaterialen te vergemakkelijken, waarbij ze ook als weekmakers dienen voor het bereiken van de juiste vormgeving;
- zwavel, zinkoxide en benzothiazolen voor de vulkanisatie van de rubber copolymeren om de elasticiteit te verbeteren en sterkte en hardheid aan de banden te bieden;
- versterkende materialen zoals staal, rayon en nylon om ondersteuning en stevigheid te bieden aan de band (deze materialen worden bij de verwerking verwijderd en zijn niet in het rubbergranulaat aanwezig);
- stoffen die tijdens het productieproces worden gevormd,
- stoffen die tijdens het gebruik als verontreiniging in de banden zijn terechtgekomen of gevormd.

Uit de onderzoeken naar stoffen in rubbergranulaat (bij RIVM, VU en ERASSTRI) komen vergelijkbare uitkomsten. Het totaalgehalte aan PAK's bedraagt maximaal enkele tientallen mg/kg. Daarnaast worden er metalen, weekmakers en vulcanisatiemiddelen aangetoond.

Pyrolyseolie (van autobanden)

In Bijlage 2 is veel informatie over de mogelijke aanwezigheid van ZZS in de pyrolyseolie is opgenomen. De somgehalten van benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen (BTEX) zijn circa 100.000 mg/kg (10 massa procent) in de pyrolyse olie (zie Tabel B2 van Bijlage 2). Ook kunnen PAK's en organische chloorverbindingen (0,1 massaprocent organisch-chloorgehalte (Cheng et al., 2021)) aanwezig zijn.

Het bedrijf heeft aangegeven de pyrolyseolie verder op te willen werken via stoomdestillatie. Stoomdestillatie is als scheidingstechniek toe te passen voor stoffen met relatief hoge kookpunten en voldoende hoge dampdrukken (vluchtigheid) die onder hun kookpunt al ontleden zoals bij een klassieke destillatie. De klassieke destillatie is namelijk gebaseerd op het scheiden van stoffen op grond van het verschil in kookpunten. In de condensatiestap ontstaat een vloeistof van twee niet mengbare fasen (water en organische fase), waarbij de organische fase

wordt afgescheiden en verder kan worden opgewerkt of gezuiverd voor nieuwe toepassingen. In deze studie zijn dat BTEX.

Het doel van stoomdestillatie bij de productie van pyrolyseolie is de te hoge benzeengehalten effectief te verlagen tot onder de grenswaarde van 0,1 massaprocent (1000 mg/kg). Onder de grenswaarde mag men de pyrolyseolie als blendolie in stookolie voor de zeescheepvaart toepassen. Men zou behalve benzeen tevens ethylbenzeen, toluen xyleen of limoneen op deze manier kunnen afscheiden om het vervolgens als een grondstof te benutten voor de productie van kunststoffen.

Blendolie kan volgens Marpol Annex VI uitsluitend begrepen worden als lichtere aardoliefracties waarmee een residuale aardoliefractie kan worden gemengd. Dit bijmengen is bedoeld om de beoogde stookolie voor de zeescheepvaart op specificaties (viscositeit, vlampunt, dichtheid) te brengen zodat het een geschikte brandstof is. Afvalstoffen uit bijvoorbeeld de petrochemie mogen niet als blendolie worden toegepast, tenzij aan einde-afval criteria worden voldaan. Er is sprake van een blendolie en niet een additief als tussen 2 tot 15 massaprocenten van de stookolie uit blends bestaan.

Recovered Carbon Black (rCB) uit pyrolyse

In de literatuur is nog weinig informatie te vinden over de chemische samenstelling van stoffen die hoofdbestanddelen zijn in rCB anders dan koolstof en waterstof. Bij de pyrolyse van (vracht)autobanden zijn naast koolstof en waterstof nog andere bestanddelen te verwachten (zie Bijlage 2). In de publicatie van Cheng et al. (2021) is de aanwezigheid van 0,3 massaprocent organisch-chloorgehalte in rCB aangetoond.

Uit de analyses van verwerker blijkt de maximale som-PAK-concentratie in het rCB 7,6 mg/kg, met 0,6 mg/kg BaP. Er zijn geen PCDD/PCDF- of PCB-verbindingen in het rCB aangetoond. De zinkcomponenten waaronder zinkoxides worden in het pyrolyseproces vrijwel geheel omgezet in Zinksulfide (ZnS). Deze stof komt in een concentratie van 3-5 procent voor in het rCB.

Gegevens over virgin CB:

De aard en hoeveelheid van ZZS in virgin CB hangt vooral af van de productiemethode. Verreweg de meest (circa 95 procent van het totaal) geproduceerde type CB wereldwijd is het zogeheten *furnace black*. Hierbij wordt aardoliedestillaten onder gecontroleerde omstandigheden in een oven verhit en verbrand tot gassen waar het gevormde CB eruit wordt afgescheiden. Andere typen zijn *thermal black*, *lampblack*, *channel black* en *acetylene black*. Ze worden in meer specialistische toepassingen gebruikt. Virgin CB wordt in REACH getypeerd als UVCB-stof¹¹.

De dominant aanwezige ZZS zijn PAK's, nitro-PAK's en S-PAK's. De PAK's zijn vooral geadsorbeerd aan CB-deeltjes. Het effectieve oppervlak van CB is groot en CB kan daardoor hoge PAK-gehalten bevatten. De chemische analyse van PAK-gehalten is vanwege de zeer sterke binding

¹¹ UVCB= Chemical Substances of Unknown or Variable Composition, Complex Reaction Products and Biological Materials.

van PAK aan CB gecompliceerd. Het is van de (vloeistof)extractiemethode afhankelijk of men in staat is om volledig de PAK's van de CB-matrix te ontsluiten. PAK-gehalten zijn vergeleken voor *thermal black* en *furnace black*. Niveaus van benzo[a]pyreen varieerden van 0,03 tot 0,2 mg/kg in de *thermal black*-monsters en tot 0,001 mg/kg in *furnace black*. Niveaus van de totaal som van PAK's varieerde van 1,5 tot 9,2 mg/kg in de *thermal black*-monsters en van 0,01 tot 0,26 mg/kg in de *furnace black*-monsters (bron: IARC, met verwijzing naar; Cabot Corporation, 2005a). Sporen van een verscheidenheid aan anorganische elementen (bijv. calcium, koper, ijzer, mangaan, kalium, lood, arseen, chroom, selenium en zink) zijn geïdentificeerd in sommige analyses van monsters van carbon black (bron: IARC, met verwijzing naar; Collyer, 1975; Sokhi et al., 1990; Cabot Corporation, 2005b).

Pyrolyse gassen

Aangezien de pyrolyse gassen in het verwerkingsproces verbrand worden, vallen deze buiten de scope van de ZZS-module.

In de Bijlage 2 is toegelicht welke gassen kunnen voorkomen. Daarin zijn genoemd: waterstof (H₂), waterstofsulfide (H₂S), methaan (CH₄), ethaan (C₂H₆), propaan (C₃H₈), butaan (C₄H₁₀), ammoniak (NH₃) en relatief kleine hoeveelheden koolmonoxide (CO) en kooldioxide (CO₂). Bij halogeenhoudende rubbers ontstaan ook waterstofchloride (HCl) en waterstofbromide (HBr).

In Cheng (2021) is tevens de aanwezigheid van organochloorverbindingen vastgesteld. Het zou vooral kunnen gaan om chloorbenzenen. Deze stoffen zijn, bij de verbranding (reactie met zuurstof) voor de energieopwekking van de pyrolyseovens van de eigen inrichting, precursors voor de vorming van chloordioxinen PCDD/PCDF. Een aantal stoffen van de chloorbenzenen en de chloordioxinen is ZZS. Een risico van de verspreiding en de blootstelling van de leefomgeving aan deze stoffen is relevant indien een pyrolyse-inrichting bij de emissie van de rookgassen onvoldoende maatregelen heeft getroffen om de uitstoot van PDCC/PCDF te minimaleren. De vraag is bovendien of er emissieconcentraties en emissievrachten bekend zijn.

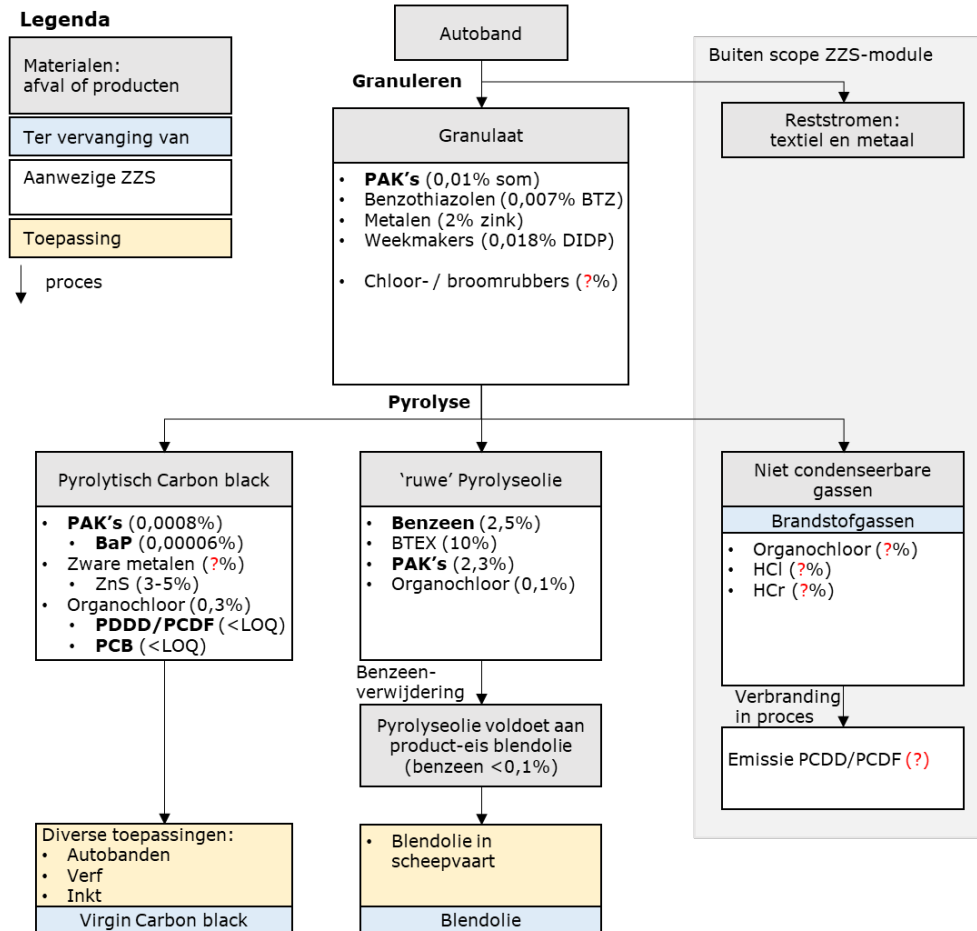
Samenvatting beschikbare gegevens over ZZS

Samenvattend kan gesteld worden dat de specifieke samenstelling van de pyrolyseproducten slechts bij benadering bekend is en dat deze ook te uiteenlopend is om die eenduidig te kunnen karakteriseren (zie Tabel 4.1 en Figuur 4.2). Voor rCB kan worden gesteld dat er geen hoge concentraties PAK's, PCDD/PCDF's of PCB's in voorkomen. Van de onbewerkte pyrolyseolie is bekend dat er hoge concentraties PAK's en BTEX aanwezig kunnen zijn.

Op basis van de beschikbare gegevens zijn de concentraties PAK's in rCB en virgin CB (thermal en furnace) in dezelfde orde van grootte aanwezig. Het is niet bekend in hoeverre de chemische samenstellingen van pyrolyse-olie en 'virgin' blendolie overeenkomstig zijn. De organochloorverbindingen die in de pyrolyseproducten gevonden worden komen voort uit het rubber en worden dus niet verwacht in virgin carbon black of blendolie.

Tabel 4.1 Maximale waargenomen concentraties of gemiddelde concentratie + standaarddeviatie (%g/g) in startmateriaal en producten uit geraadpleegde bronnen. ZZS zijn met sterretje (*) aangegeven. Bronnen: [1] Celeiro et al., 2021, [2] Oomen & de Groot, 2016, [3] meetgegevens verwerker, [4] Cheng et al., 2021, [5] bijlage 2, [6] ERASSTRI, 2020.

%	Granulaat	rCB	(onbewerkte) Pyrolyseolie
PAK's	<ul style="list-style-type: none"> · som PAK's*: 0,01 [1] · BaP*: gem. 0,00015 (+SD 0,00013) [6] 	<ul style="list-style-type: none"> · som PAK's*: 0,0008 [3] · BaP*: 0,06 mg/kg [3] 	<ul style="list-style-type: none"> · som PAK's*: 2,3 [5]
Metalen: o.a. zink	<ul style="list-style-type: none"> · Zink: 1,9375 [2] · Cadmium*: gem. 0,0007 (+SD 0,0013) [6] · Kobalt*: gem. 0,017 (+SD 0,01) [6] 	<ul style="list-style-type: none"> · zink sulfide: 3-5 [3] 	
Weekmakers: o.a. ftalaten	<ul style="list-style-type: none"> · DIDP: 0,018 [1] · DEHP*: gem. 0,0009 (+SD 0,0009) [6] 		
Antioxidanten: o.a. benzothiazolen	<ul style="list-style-type: none"> · BTZ: 0,007 [1] 		
(Organo) chloor-verbindingen		<ul style="list-style-type: none"> · Chloor: 0,3 [4] · PCDD/PCDF* : < LOQ [3] · PCB*: < LOQ [3] 	<ul style="list-style-type: none"> · Chloor: 0,1 [4]
Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen en Xyleen (BTEX)			<ul style="list-style-type: none"> · BTEX: 10% [5] · Benzeen*: 2,5% [5]



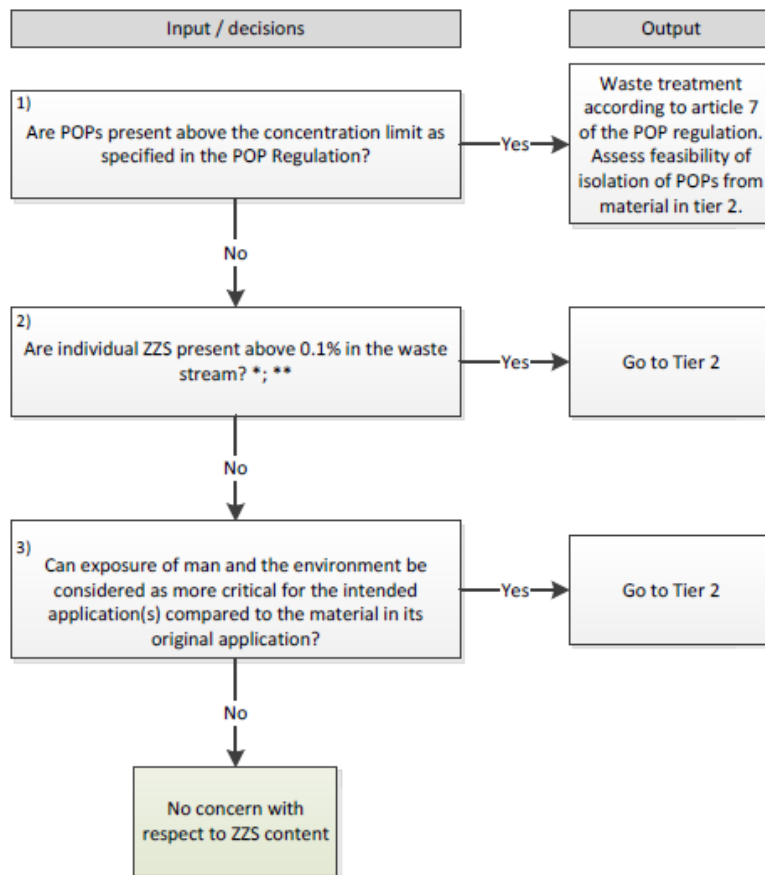
Figuur 4.2 Overzicht voorkomen van zorgstoffen in materiaalstromen binnen en buiten de scope.

4.4 Uitwerking bestaande module SSML

4.4.1 Trede 1: aanwezigheid ZZS

Belangrijke vragen binnen trede 1 zijn (zie Figuur 4.3): 1. Welke ZZS zijn aanwezig in de afvalstroom, worden toegevoegd in het proces of ontstaan? 2. Wat zijn de concentraties en voldoen deze aan de concentratienormen in afval? En: 3. hoe kritisch is de beoogde toepassing wat betreft blootstelling?

Bij gebrek aan specifieke gegevens van het productieproces zijn ook gegevens uit de literatuur gebruikt om deze aan te vullen.



Figuur 4.3 Trede 1 van de ZCS-module (uit Quik et al., 2019). De concentratiegrenswaarde ('concentration limit') is de waarde opgenomen in bijlage IV van de POP-verordening. * of is er reden om aan te nemen dat ZCS worden gevormd tijdens de verwerking tot boven 0,1%? ** meerdere lagere stof-specifieke concentratiegrenswaarden, zoals opgenomen in Annex VI van de CLP-verordening, moeten beschouwd worden.

1. Are POPs present above the concentration limit as included in Annex IV of the POP regulation?

Uitgangsmateriaal

- Granulaat: **Nee - naar stap 2.** Er worden in rubbergranulaat van autobanden geen POP's verwacht boven de concentratiegrenswaarde (cgw) o.b.v. de onderzoeken van Verschoor et al. (2018) en Celeiro (2020, 2021). Mogelijk zijn er organochloor/broom verbindingen in de rubbers aanwezig, waaruit in het proces organochloor- en/of broomverbindingen kunnen ontstaan. Zie het kopje 'na verwerking'.

Na verwerking

- rCB: **Nee - naar stap 2.** Uit het onderzoek van Cheng (2021) blijkt dat er circa 0,3 procent aan organochloor is aangetoond. Dit zijn mogelijk POP-stoffen. Aan de hand van analyses van het bedrijf blijken er geen PCDD/PCDF en PCB's aanwezig in het rCB boven de daarvoor geldende grenswaarden in de POP-

verordening. Het is onbekend welke extractiemethoden er bij deze analyses gebruikt zijn.

- Pyrolyseolie: **Ja (mogelijk) - naar trede 2.** Uit het onderzoek van Cheng (2021) blijkt dat er ongeveer 0,1 procent aan organochloor is aangetoond. Dit zijn mogelijk POP-stoffen. Aan de hand van analyses dient bevestigd te worden dat het gehalte onder de limiet blijft. Als dit niet het geval is dient de pyrolyseolie te voldoen aan de regels gesteld in de POP-verordening en opgeschoond te worden, alvorens het benut kan worden als secundair materiaal.

2. *Are individual ZZS present above 0.1 percent in the waste stream or above the substance specific concentration limits?*

Uitgangsmateriaal

- Granulaat: **Nee – naar stap 3.** Uit de geraadpleegde bronnen blijkt dat de maximale aangetoonde concentraties niet boven de 0,1 procent uitkomen, maar mogelijk wel gelijk aan specifieke cgw. De maximale concentraties zijn voor som PAK's 0,01 procent, gelijk aan de specifieke cgw van BaP uit de CLH-verordening. Indien worst-case alle PAK's bestaan uit alleen BaP dan kan de concentratielimiet gehaald worden, maar dan nog betreft het de maximum toegestane concentratie. In het ERASSTRI-onderzoek is een gemiddelde concentratie van 0,00015 procent (+SD 0,00013) aangetoond voor BaP. Voor weekmakers zijn de maximale concentraties in granulaat 0,02 procent. Er zijn geen zware metalen die ook ZZS zijn aangetoond boven de 0,1 procent. Wel is zink in een concentratie van maximaal 2 procent aangetoond. Zink is geen ZZS, maar behoort wel tot de groep genormeerde stoffen die in latere toepassingen limiterend kan zijn.

Na verwerking

- rCB: **Nee – naar stap 3.** Er worden PAK's en zware metalen verwacht in rCB. Op basis van de gegevens van het bedrijf blijken PAK's stoffen niet boven de geldende normen aanwezig te zijn.

Er zijn geen gegevens beschikbaar over metalen (behalve zink) in rCB. Gezien de aanwezigheid van metalen in rubbergranulaat zou er accumulatie van metalen in het rCB kunnen optreden.

- Pyrolyseolie: **Ja – naar Trede 2.** Uit de beschikbare gegevens blijkt dat er concentraties benzeen van circa 2,5 procent zijn aangetoond (en 10 procent BTEX) en de som PAK's max 2,3 procent bedraagt (zie Bijlage 2).

3. *Could exposure of man and the environment be considered as more critical for the intended application compared to the material in its original application?*

Uitgangsmateriaal

- Granulaat: **n.v.t.** Het granulaat is na pyrolyse niet meer aanwezig. Er is dus geen voorgenomen toepassing voor het granulaat.

Na verwerking

- rCB: het rCB wordt voornamelijk toegepast in autobanden, maar kan ook als verf of inkt worden toegepast.
Autobanden: **Nee – ZZS-module afgerond.** De toepassing in autobanden is vergelijkbaar met de eerdere toepassing. Hierbij wordt opgemerkt dat de concentraties zware metalen in rCB nog onbekend zijn en dienen te voldoen aan de productwetgeving.
Verf/inkt: **ja – naar Trede 2.** Verf/inkt is een nieuwe toepassing t.o.v. het CB in autobanden, waarbij het niet is uit te sluiten dat de blootstelling aan schadelijke stoffen toeneemt.

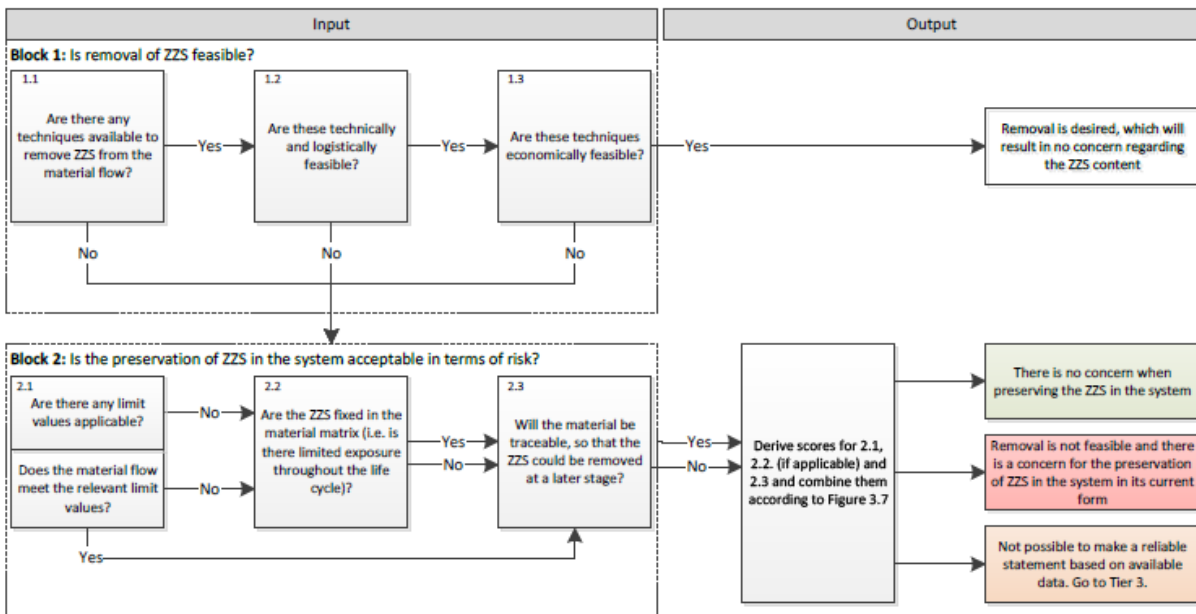
Conclusies:

- Granulaat: **niet van toepassing.** Het granulaat wordt in het pyrolyseproces ontleed/geheel omgezet en is niet meer als zodanig aanwezig na het recyclingproces. Eventuele aanwezige ZZS die aanwezig zijn of ontstaan gedurende het pyrolyseproces worden in de nieuwe producten/fracties beoordeeld.
- rCB: **toepassing in verf/inkt naar Trede 2.** Er zijn o.b.v. de bekende gegevens geen POP en/of ZZS boven de voor de stof geldende concentratiegrenswaarde aanwezig in het rCB. Echter kan de kans op blootstelling in de andere toepassing als verf/inkt ten opzichte van banden toenemen. Daarom moet in Trede 2 verder gekeken worden naar het beheersen van de risico's.
- Pyrolyseolie: **naar Trede 2.** Er is ZZS aanwezig boven de 0,1 procent (benzeen) en mogelijk ook andere POP/ZZS boven de voor de stof geldende concentratiegrenswaarde. Daarom moet in Trede 2 verder gekeken worden naar het beheersen van de risico's.

4.4.2 *Trede 2: verwijdering of behoud van ZZS*

Binnen trede 2 wordt er gekeken naar de beschikbaarheid en haalbaarheid van verwijdering van ZZS (zie Figuur 4.4). Zo niet; is het mogelijk om de ZZS in de nieuwe toepassing veilig te behouden? Welke normen zijn dan toepasbaar? Blijft de ZZS in het materiaal zitten en blijven deze materialen traceerbaar?

Om trede 2 goed te kunnen doorlopen, is allereerst informatie uit trede 1 nodig over de aanwezigheid van ZZS. Op dit moment zijn er geen concrete gegevens over mogelijke verwijdering beschikbaar. Wel kan op basis van de beoogde toepassingen bekeken worden of veilig gebruik mogelijk is.



Figuur 4.4. Trede 2 van de ZZS-module (uit Quik et al., 2019). Een beschrijving van de onderliggende sub-vragen voor block 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2 en 2.3 staan in de tekst. Meer informatie is te vinden in de bron: Zweers et al. (2018).

Trede 2, Block 1: Is removal of ZZS feasible?

Vragen die bij dit blok worden gecombineerd beantwoord. De vragen zijn:

1. Are there any techniques available to remove ZZS from the material flow?
2. Are these technically and logistically feasible?
3. Are these techniques economically feasible?
 - rCB: **Onbekend – naar blok 2:** Er worden PAK's en zware metalen verwacht in CB. De PAK's kunnen tot op zekere hoogte geëxtraheerd worden. Maar het is nog onbekend of alle mogelijk aanwezige ZZS afdoende voor de beoogde toepassing in verf/inkt verwijderd kunnen worden en of die methoden haalbaar en betaalbaar zijn.
 - Pyrolyseolie: **Ja (waarschijnlijk, gedeeltelijk onbekend) – naar blok 2.** Door stoomdestillatie wordt benzeen (BTEX) verwijderd. Concentraties na de stoomdestillatie van benzeen dienen gereduceerd te worden tot de toegestane concentraties. De oplosmiddelen die teruggewonnen worden met het destillaat kunnen als grondstof benut worden voor de productie van kunststoffen. Het rendement en de kosteneffectiviteit van verwijdering van benzeen is onbekend, maar het wordt in de praktijk gedaan. Verwijderingsmogelijkheden van mogelijk andere aanwezige ZZS (halogenen en PAK's) zijn niet bekend. Het is de vraag in hoeverre dit met het oog op de toepassing als blendolie benodigd is.

Conclusies:

- rCB: **verwijdering van ZZS niet te garanderen.** Het is niet te garanderen dat alle stoffen afdoende verwijderd kunnen worden voor toepassing in verf/inkt. Door naar Trede 2, block 2.
- Pyrolyseolie: **Ja (voor een deel).** Het lijkt op basis van de beschikbare gegevens mogelijk om met stoomdestillatie de benzeenconcentratie onder de toegestane norm te krijgen in de blendolie. Voor de overige ZZS dient nog nagegaan te worden in hoeverre deze voor block 2 nog relevant zijn.

Trede 2, block 2:

Is the preservation of ZZS in the system acceptable in terms of risk?

2.1. Are there any limit values applicable? Does the material flow meet the relevant limit values?

- rCB: Er zijn verschillende eisen voor de toepassingen waarin CB gebruikt wordt.
Verf/inkt: gedeeltelijk – naar vraag 3. De toepassing in verven en inkten is (worst-case) een consumententoepassing. Er is een REACH restrictie¹² voor PAK's voor 'supply to the general public', waarin een grenswaarde van 1 mg/kg voor 8 specifieke PAK's is opgenomen. Voor speelgoed geldt een grens van 0,5 mg/kg voor deze PAK's. De concentraties van de PAK's uit de restrictie die door het bedrijf in het rCB zijn gemeten, blijven onder de grens van 1 mg/kg, maar voor BaP boven de grens voor speelgoed.
Opgemerkt wordt dat niet voor alle 8 PAK's er analysegegevens beschikbaar zijn. Voor de missende PAK's dient nog wel aangetoond te worden dat de PAK's onder de norm blijven. Ook voor de overige ZZS dient te worden bevestigd dat er geen specifieke productnormen worden overschreden.
- Pyrolyseolie: **niet te bevestigen.** Voor toepassing van pyrolyseolie als blendolie in de zeescheepvaart geldt de technische eis ISO 8217 (eis EOX 50 mg/kg). Er wordt verwacht dat de benzeenconcentratie na de stoomdestillatie aan die technische eis voldoet. Voor andere ZZS is dat onbekend, maar het is de vraag in hoeverre dit met het oog op de toepassing als blendolie nodig is.

2.2. Are the ZZS fixed in the material matrix (i.e. is there limited exposure throughout the life cycle)?

- rCB: **Verf/inkt (voor speelgoed): nee.** De ZZS kunnen uit de verf of inkt vrijkomen.
- Pyrolyseolie: **nee.** De pyrolyse-olie wordt verbrand als scheepsbrandstof en voldoet aan de eisen daarvoor. Daarmee is de vraag irrelevant.

2.3. Will the material be traceable, so that the ZZS could be removed at a later stage?

rCB: **Verf/inkt (voor speelgoed): nee.** Verf en inkt worden wijd verspreid toegepast en ook in consumentenproducten.

¹² https://echa.europa.eu/documents/10162/15792/guideline_entry_50_pahs_en.pdf/f12ac8e7-51b3-5cd3-b3a4-57bfc2405d04.

- Pyrolyseolie: **nee**. De pyrolyseolie wordt verbrand. Daarmee is de vraag irrelevant.

Conclusies:

- rCB: **Verf/inkt: risico's aanwezig bij toepassing in speelgoed**. Voor toepassing in speelgoed is er overschrijding van de grenswaarden uit de REACH-restrictie. In deze toepassing zijn de mogelijke ZZS niet gebonden in de matrix en niet traceerbaar. Daarom is de toepassing in speelgoed niet acceptabel (zowel 2.2 als 2.3 scoren rood). Voor toepassing in overige consumentenproducten moet worden voldaan aan de PAK-norm uit REACH; ook dienen de andere ZZS aan de productnormen getoetst te worden.
- Pyrolyseolie: **veilig behoud niet te garanderen**. Op basis van de beschikbare informatie is niet te garanderen dat alle ZZS in pyrolyseolie aan de eisen voor de blendolie voldoen. Als dit wel het geval is, dan is de toepassing toegestaan. 2.2. en 2.3 zijn niet relevant voor het gebruik als brandstof.

4.4.3

Trede 3

In trede 3 wordt gekeken of het mogelijk is om de onzekerheden in de voorgaande treden weg te nemen zodat er een conclusie kan worden getrokken. Dit kan ook met een pilotfase waarin de risico's worden onderzocht. Deze trede is nog niet uitgevoerd. Uit paragraaf 4.4.2. volgen de aanbevelingen: analyses van voornamelijk pyrolyseolie, om daarmee het voldoen aan de relevante concentratiegrenswaarden aan te tonen. Op basis van de gegevens over de samenstelling zouden de kans op blootstelling en de mogelijkheid tot verwijdering van de ZZS bekeken moeten worden.

5 Conclusies

5.1 Milieuwinst: Milieu-impact en circulariteit

Op basis van de beschikbare gegevens komt uit het vergelijk van de milieu-impact (CO₂-equivalenten en landgebruik) van pyrolyse van banden tot rCB met 'toepassen in cementovens' naar voren dat recycling via pyrolyse 0,1 kg CO₂-equivalenten per kg granulaat bespaart. Recycling via toepassing in stalmatten bespaart 2,1 kg CO₂-equivalenten per kg granulaat. Naast de gehanteerde scope heeft ook de op termijn meer duurzame energieopwekking invloed op de vergelijking.

De circulariteit van de pyrolyse van autobanden verschilt duidelijk van de toepassing van granulaat in stalmatten. De *efficiency* van pyrolyse is met 0,43 (gemiddeld) lager dan de *efficiency* mechanische recycling tot granulaat in stalmatten (0,9). De *efficiency* van toepassing in cementovens is 0,15 (alle materialen behalve staal worden vernietigd). Op basis hiervan heeft pyrolyse de voorkeur boven de referentie toepassing in cementovens maar niet boven de toepassing in stalmatten. Wanneer in de toekomst pyrolyseolie voor de productie van materialen gebruikt kan worden (in plaats van brandstof) wordt de *efficiency* hoger.

De *recyclability* van de nieuwe toepassing van rCB (in autobanden) is momenteel echter hoger (0,26 voor granulaat) dan die van de toepassing in stalmatten (momenteel op 0 gesteld, omdat het onzeker is of recycling daarvan technisch mogelijk is). Wanneer beide indicatoren (*efficiency* en *recyclability*) in combinatie worden beschouwd, is de voorkeur van toepassing in stalmatten ten opzichte van pyrolyse tot CB niet direct te trekken. Daarvoor is meer duidelijkheid over toekomstige verwerking van stalmatten nodig.

Pyrolyse van autobanden zou voor circa een derde van de vraag naar carbon black kunnen voldoen (indicator *contribution*). De potentiële bijdrage van granulaat aan de (Nederlandse) markt voor stalmatten is moeilijk in te schatten; de hoeveelheid vrijkomende rubbergranulaat in Nederland lijkt meer dan voldoende voor deze toepassing (1,1 bij toepassing van alle granulaat). Dat kan dus snel tot marktverzadiging leiden.

5.2 ZZS

Door een beperkte beschikbaarheid van gegevens ontbreekt nog een bevestiging van een afdoende verwijdering van de aanwezige ZZS uit de reststroom of de pyrolyseproducten.

Voor het rCB lijken de concentraties POP en ZZS onder de geldende concentratiegrenswaarden te blijven. Wel is de toepassing in inkt of verf in consumentenproducten kritischer voor blootstelling dan toepassing in banden. Voor inkt en verf is nog onbekend of het rCB aan die producteisen voldoet.

In de pyrolyseolie kunnen onder andere organohalogenen en BTEX terecht komen die ontstaan in het pyrolyseproces. Voor deze stoffen

gelden grenswaarden voor toepassing als blendolie in scheepsbrandstoffen (voor organohalogenen en benzeen gelden grenswaarden van respectievelijk 50 en 1.000 mg/kg; zie Broekman, 2023). Benzeen kan naar verwachting uit de pyrolyseolie worden verwijderd en toegepast. De organohalogenen (POP's) dienen onder de toegestane limiet te blijven, wil men de uit pyrolyse verkregen olie benutten voor nieuwe toepassing. Vanwege de verbranding van pyrolyseolie kunnen bovendien organohalogenen omgezet worden in dioxinen. Ook de (te) hoge PAK-gehalten vormen een aandachtspunt voor de pyrolyseolie. Metingen van daadwerkelijke concentraties van verschillende ZZS in de pyrolyseolie zijn belangrijk en kunnen waarschijnlijk een groot deel van de vragen en onzekerheden wegnemen. Per pyrolyseproces (per verwerker) kunnen de concentraties sterk verschillen.

Tot slot merken we een aantal zaken op dat buiten de scope van de ZZS-module valt, maar wel van belang is voor de veiligheid. Emissies van stoffen uit het pyrolyseproces en bij toepassing van de producten zijn nu niet in de beoordeling meegenomen, maar dienen te voldoen aan de emissiewetgeving. Dit geldt ook voor de emissies bij toepassing van rubbergranulaat in cementovens (in plaats van kolen). Ook voor arbeidsveiligheid. Hierbij moet speciale aandacht zijn voor stoffen die specifiek zijn voor de pyrolyseproducten en niet in de virgin producten aanwezig zijn. De huidige regelgeving en productnormen houden in dat geval mogelijk geen rekening met deze stoffen, waardoor risico's aanwezig kunnen zijn.

Tot slot is niet beschouwd welke risico's er mogelijk aanwezig zijn in de referentiesituaties. Bij toepassing in stalmatten is het mogelijk dat ZZS (met name PAK) en microplastics kunnen vrijkomen en via de mest in de bodem kunnen terechtkomen.

5.3 Voorlopige afweging

Pyrolyse van rubbergranulaat is hier vergeleken met de toepassing in stalmatten en met het referentiescenario toepassen in cementovens. Op basis van de ZZS-module lijkt toepassing van het rCB in de meeste gevallen mogelijk. Voor de pyrolyseolie is het nog onzeker en dient onderzocht te worden of aan alle producteisen voldaan kan worden. Wat betreft de milieu-impact scoort pyrolyse van autobanden lager dan de mechanische recycling tot stalmatten. Pyrolyse van rubbergranulaat is iets gunstiger dan toepassing in cementovens op basis van de gehanteerde data. Een meer uitgebreide levenscyclusanalyse zou gedaan moeten worden om ook voor andere impact-categorieën verschillen nader te bekijken.

Op basis van de circulariteits-indicatoren concluderen we dat pyrolyse meer bijdraagt aan circulariteit dan toepassing in cementovens. Mechanische recycling tot stalmatten leidt (vooralsnog éénmalig) tot veel meer materiaalbehoud (hoge efficiency) dan pyrolyse. Terwijl pyrolyse van banden tot rCB ook na de volgende gebruiksfase weer mogelijk is (hogere recyclability) en leidt tot toepassing in dezelfde productketen. Omdat het nog onzeker is (vanwege vervuiling) of stalmatten na de tweede gebruiksfase (van mogelijk tientallen jaren) nog gerecycled kunnen worden en omdat het pyrolyseproces nog in

ontwikkeling is, kunnen de indicatoren in de toekomst veranderen. We bevelen aan na te gaan wat de recyclingsmogelijkheden zijn van stalmatten om deze onzekerheid te verminderen.

Tot slot moet vermeld worden dat andere recyclingsmogelijkheden, zoals devulcanisatie van rubber, worden onderzocht die kunnen bijdragen aan duurzamer grondstoffengebruik. Deze zijn hier buiten beschouwing gebleven.

6 Reflectie en aanbevelingen voor de methodiek

Uit de resultaten van deze casus valt een aantal leerpunten te halen dat kan bijdragen aan een beoordeling van toekomstige initiatieven en verfijning van de SSML-methoden.

Milieu-impactmodule

De SSML-milieu-impactmodule geeft een vereenvoudigde vergelijking van milieu-impact tussen drie verschillende scenario's op basis van de CO₂-footprint of op basis van de benodigde energie (Cumulative energy demand). Voor de analyse in deze casus is gebruikgemaakt van LCA-data van het proces en kentallen uit databases. De focus ligt op de verschillen tussen de scenario's. Waren deze gegevens uit een eerdere levenscyclusanalyse van dit proces niet voorhanden geweest, dan was het lastiger geweest om een betrouwbare inschatting te maken van de milieu-impact en hadden veel data nog verzameld moeten worden.

Pyrolyse van autobanden is als proces nog in ontwikkeling en geen standaardproces dat in de openbare life-cycle inventory (LCI) databases voorhanden is. Voor de evaluatie van de SSML-methode zou het voor het vergelijk nog interessant zijn om de analyse van het pyrolyseproces ook uit te voeren aan de hand van de hoeveelheid energie die bij het pyrolyseproces nodig is (naast de aangeleverde LCA resultaten in CO₂-eq). In dat geval zou er een omrekening van energie naar CO₂-eq nodig zijn. Het verdient aanbeveling binnen de SSML-methodiek een handreiking op te nemen voor een eenvoudige omrekening van verschillende vormen van energiegebruik naar CO₂-equivalenten.

Pyrolyse van autobanden gebeurt op dit moment nog niet in Nederland, alleen in pilots. Pyrolyse van autobanden is dus nog in ontwikkeling. De gegevens die gebruikt zijn voor de analyse zijn van een inmiddels verouderde opzet van de pyrolyse installatie. In de milieu-impact analyse is het gewenst ook rekening te kunnen houden met de verwachte toekomstige situatie. Gezien de onzekerheden zou daarvoor zo mogelijk een bandbreedte moeten worden aangegeven.

Tot slot zou het belang van landgebruik nader bekeken kunnen worden en de weging met klimaat-impact (CO₂-equivalenten).

Circulariteitsmodule

Binnen de circulariteitsmodule scoort pyrolyse op de indicator efficiency veel lager dan mechanische recycling. Pyrolyse maakt het echter mogelijk rCB black na toepassing in een nieuwe band weer te herwinnen. Na de toepassing van granulaat in stalmatten is het nog onduidelijk of recycling nogmaals mogelijk is (door de vervuiling van de matten). Dit levert de vraag op hoe binnen SSML aanvullend op de afzonderlijke indicatoren de indicatoren efficiency en recyclability gewogen kunnen worden. Het (deels) sluiten van kringlopen en het behoud van materiaal door het toevoegen van extra loops naar andere producten zijn allebei van belang. Hoogwaardigheid van recycling verdient daarom verdere uitwerking, waarbij ook een tijdschikhorizon wordt

betrokken waarin de materialen nog nuttig gebruikt worden en mogelijk de waarde per kg. Tevens kan daarbij onderscheid worden gemaakt tussen toepassing in dezelfde productketen, toepassing in een andere productketen of het recyclen tot een nieuwe bouwsteen, bijvoorbeeld via een factor voor kwaliteit.

In deze rapportage is gekeken naar de recycling van autobanden via pyrolyse in relatie tot mechanische recycling tot stalmatten en toepassing van rubbergranulaat in cementovens. De rapportage vergelijkt deze opties ten opzichte van elkaar. In de praktijk zijn er echter veel meer verwerkingsopties van oude autobanden mogelijk en zal het een mix zijn van de verschillende mogelijke verwerkingsopties die met de autobanden mogelijk zijn. Wat dat betreft, is het mogelijk ook relevant om als referentie niet de worst case te nemen, maar de huidige marktverdeling te gebruiken als referentie en te kijken naar een mogelijke verschuiving in de toekomst. Dit verhoogt de complexiteit, maar geeft de mogelijkheid om scenario's voor verwerking van de hele afvalstroom te tonen.

Rubbergranulaat kan op meerdere plekken toegepast worden (indicator 'contribution to market'). De score is sterk afhankelijk van naar welke markt je kijkt, waardoor de score vooral informerend is. Het is belangrijk in elk geval onderscheid te maken in toepassing in dezelfde keten en in een andere keten, waarbij hoogwaardigheid een rol speelt. Bij toepassingen in een andere keten is het belangrijk om te kijken welke grondstof het kan vervangen en hoe breed de keten bekeken moet worden.

ZZS-module

De casus over het pyrolyseren van autobanden is tekenend voor een recyclingproces waaruit verschillende recyclingproducten voortkomen, die niet te vergelijken zijn met het primaire product. Hierdoor is de scope van de beoordeling extra belangrijk.

De ZZS-beoordeling verschilt van de duurzaamheids- en circulariteitsmodule. Er wordt gekeken of de verwerking zonder onaanvaardbare risico's kan plaatsvinden, maar niet hoe dit zich verhoudt tot de risico's van (grondstoffen voor) de producten die het vervangt of tot het referentiescenario (verbranding met energierugwinning en mechanische recycling tot stalmatten).

We bevelen aan ook uit te werken hoe een herwonnen materiaal of product zich wat betreft samenstelling en potentieel risico verhoudt tot een 'virgin' grondstof of product. Denk hierbij aan rCB versus virgin CB (furnace black of aan rookgassen van scheepsbrandstoffen met en zonder pyrolyseolie (met mogelijk meer organohalogenen)).

Het is in de huidige SSML-methodiek niet expliciet gemaakt hoe met afvalstromen of bijproducten uit het recyclingproces moet worden omgegaan. Bijvoorbeeld of het destillaat moet worden meegenomen in de beoordeling. Heeft een zuivere ZZS, zoals in dit geval benzeen, een waarde als grondstof (bijvoorbeeld als basischemicaliën), dan hoeft het niet als ZZS te worden beoordeeld. Het is belangrijk expliciet aan te geven of de (blootstelling bij) verbranding van het materiaal na de volgende toepassing (in dit geval scheepsbrandstoffen) moet worden

meegewogen. Voor de gewenste transitie naar een 'non-toxic environment' is een dergelijke brede scope belangrijk.

Als derde belangrijke punt komt naar voren dat productnormen en milieunormen rond de beoogde toepassing van een recyclingproduct van belang zijn. Deze milieunormen worden gebruikt om een inschatting van de risico's voor mens en milieu te maken, maar bepalen niet direct of een product wettelijk daadwerkelijk mag worden toegepast. Meer risicogebaseerde productnormen of methoden om deze af te leiden worden daarom aanbevolen. Aanbevolen wordt meer kwaliteitsnormen (of methoden daarvoor) voor bepaalde toepassingsgebieden te ontwikkelen. Dit helpt om op een consistente wijze de potentiële risico's van ZZS in nieuwe toepassingen te bepalen.

Tot slot is niet altijd duidelijk hoe bij verwijdering van de ZZS moet worden omgegaan met de hoogte van de mogelijke restverontreiniging. Deze moet voldoen aan de relevante productnormen van de (beoogde) nieuwe toepassing. Bij afwezigheid daarvan moeten ze minimaal voldoen aan de generieke norm voor de ZZS in afvalstromen en geen gevaar opleveren. Dit moet onderdeel worden van de systematiek.

7 Referenties

- Broekman, M., 2023. Pyrolyseolie van afgedankte banden; Lijst van aandachtstoffen. RIVM rapport 2023-0437. RIVM, Bilthoven.
- Celeiro, M., Armada, D., Ratola, N., Dagnac, T., De Boer, J., & Llompart, M., 2020. Evaluation of chemicals of environmental concern in crumb rubber and water leachates from several types of synthetic turf football pitches. *Chemosphere*, 128610.
- Celeiro, M., Armada, D., Dagnac, T., de Boer, J., & Llompart, M., 2021. Hazardous compounds in recreational and urban recycled surfaces made from crumb rubber. Compliance with current regulation and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 755, 142566.
- Cheng et al., 2021. Zhanjun Cheng, Miao Li, Jiantao Li, Fawei Lin, Wenchao Ma, Beibei Yan, Guanyi Chen. Transformation of nitrogen, sulfur, and chlorine during waste tire pyrolysis *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 153 (2021) 104987
- CLO, Compendium voor de Leefomgeving (2020). Ontwikkeling veestapel op landbouwbedrijven, 1980-2019 | Compendium voor de Leefomgeving (clo.nl). Bekeken: 1-11-2021. Toegankelijk via <https://www.clo.nl/indicatoren/nl212409-ontwikkeling-veestapel-op-landbouwbedrijven->
- Ecomatters (2018). LCA report for Black Bear carbon black production process (1.0 & 2.0). Utrecht, December 2018 [niet openbaar].
- FFact, 2020. Ecotest Banden 2.0. Analyse van de inzamel- en verwerkingsketen van in Nederland ingezamelde autobanden. Onderzoeksjaar 2018. FF/FH/17.022 20 april 2020
- International Agency for Research on Cancer (IARC) WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2010. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, VOLUME 93, Carbon Black, Titanium Dioxide and Talc. Lyon France, 2010
- Oomen, A.G., G.M. de Groot, 2016. Beoordeling gezondheidsrisico's door sporten op kunstgrasvelden met rubbergranulaat. RIVM Rapport 2016-0202
- Peet, Geert van der, Ferry Leenstra, Izak Vermeij, Nico Bondt, Linda Puister, Jaap van Os (2018). Feiten en Cijfers over de Nederlandse Veehouderijsectoren 2018. <https://doi.org/10.18174/464128>
- Quik, J. T. K., J. P. A. Lijzen and J. Spijker (2019). Creating safe and sustainable material loops in a circular economy: Proposal for a tiered modular framework to assess options for material recycling. Bilthoven, The Netherlands., RIVM. 2018-0173, DOI: 10.21945/RIVM-2018-0173.
- RecyBEM, 2018. Verslag Band & Milieu, Feiten en cijfers 2017.
- RecyBEM B.V., 2020. AVV-MONITOR AUTOBANDEN 2019. Rapportage van de algemeen verbindend verklaring van de Overeenkomst inzake de afvalbeheersbijdrage voor autobanden. Den Haag.
- RecyBEM B.V., 2022. AVV-monitor autobanden 2021; Rapportage van de algemeen verbindend verklaring van de overeenkomst inzake de afvalbeheersbijdrage voor autobanden. Den Haag.

- Sathiskumar C., Karthikeyan S., 2019. Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products- a review. *Sustainable Materials and Technologies*, 22 (2019) 1-6
- SENTERNOVEM, 2008. Nederlands afval in cijfers: gegevens 2000-2006 SenterNovem Uitvoering Afvalbeheer. Utrecht, 2008. 166p. ISBN978-90-5748-065-2
- Schneider, K., de Hoogd, M., Pelle Madsen, M., Haxaire, P., Kaiser, E., 2020. ERASSTRI - European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber Infill – Part 1: Analysis of infill samples. *Science of The Total Environment*, Volume 718, 2020, 137174.
- Verschoor | C.W.M. Bodar | R.A. Baumann, 2017. Verkenning milieueffecten rubbergranulaat bij kunstgrasvelden. RIVM-briefrapport 2018-0072.
- Williams P.T., 2013. Pyrolysis of waste tyres: A review *Waste Management*, 33 (2013) 1714-1728.

Bijlage 1 Herkomst gegevens voor berekening milieu-impact

Proces	Hoe- veelheid	Eenheid	Bron	Toelichting
Pyrolyse	0,46	kg CO ₂ /kg	LCA van verwerker: 'Bringing Circular Economy to Tyres', Ecomatters B.V. 2018	Samenvoeging van utilities and production en electricity (excluding biogenic)
Pyrolyse	0,375	kg CB/kg rubber	LCA van verwerker: 'Bringing Circular Economy to Tyres', Ecomatters B.V. 2018	Kg carbon black vrijgekomen bij de verwerking van 1 kg rubber
Virgin Carbon Black	1,83	kg CO ₂ /kg	EcoInvent v3.6	Carbon black {GLO} production Cut-off, U
Stookolie	0,468	kg CO ₂ /kg	EcoInvent v3.6	Heavy fuel oil {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U
Synthetische virgin rubber	2,783	kg CO ₂ /kg	EcoInvent v3.6	Synthetic rubber {GLO} market for Cut-off, U
Natuurlijk virgin rubber	2,066	kg CO ₂ /kg	EcoInvent v3.6	Seal, natural rubber based {GLO} market for Cut-off, U
Energie Verbranding	550	kWh/ton	https://www.epa.gov/smm-/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw	Elektriciteit opgewekt bij de verbranding van 1 ton rubbergranulaat
Energie-opwekking	0,350	Kg CO ₂ /kWh	EcoInvent v3.6	Electricity, for reuse in municipal waste incineration only {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration APOS, U
Energie-opwekking	0,39	kg CO ₂ /kWh	https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-3/assessment-1	
Benzine	0,787508	kg CO ₂ /kg	EcoInvent v3.6	Petrol, unleaded {RoW} market for Cut-off, U
Kolen voor cementoven	0,436	kg CO ₂ /kg	EcoInvent v3.6	Hard coal {RoW} market for Cut-off, U

Bijlage 2 Vóórkomen en criteria van zorgstoffen bij pyrolyse van autobanden

Op basis van notitie in opdracht van Rijkswaterstaat: M. Broekman, september 2020; geactualiseerd in 2023.

B2.1 Samenstelling banden

Het rubber van (vracht)autobanden bestaat doorgaans uit een mengsel van 2 of 3 copolymeren, meestal natuurrubber (NR) oftewel polyisopreen en synthetisch rubber, zoals styreen-butadieen rubber (SBR), polybutadieen rubber (BR) en in mindere mate isobutyleen-isopreenrubber (IIR) oftewel butyl rubber en halogeenhoudende butylrubber, zoals chloor-isobutyleen-isopreenrubber(CIIR) en broom-isobutyleen-isopreenrubber (BIIR).

De (vracht)autobanden bevatten verder de volgende stoffen¹³ (Kumar Singh et al., 2018; anoniem XX, 2019; Groot en Oomen, 2016):

- vulstoffen zoals roet en silica die de banden tevens de kenmerkende zwarte kleur geven;
- antidegradanten om de banden langer stabiel te houden tegen invloeden zoals zonnestraling, zuurstof, ozon en extreme temperaturen;
- oliën en harsen die tijdens het productieproces worden toegevoegd om het gietproces van de rubbermaterialen te vergemakkelijken, waarbij ze ook als weekmakers dienen voor het bereiken van de juiste vormgeving;
- zwavel, zinkoxide en benzothiazolen voor de vulkanisatie van de rubber copolymeren om de elasticiteit te verbeteren en sterkte en hardheid aan de banden te bieden;
- versterkende materialen, zoals staal, rayon en nylon om ondersteuning en stevigheid te bieden aan de band;
- stoffen die tijdens het productieproces worden gevormd;
- stoffen die tijdens het gebruik als verontreiniging in de banden zijn terechtgekomen of gevormd.

Het ingangsmateriaal voor het pyrolyseproces is een granulaat van de afgedankte rubber (vracht)autobanden waarvan de versterkende materialen grotendeels zijn afgescheiden. De samenstelling van het rubbergranulaat is mede van invloed op de chemische samenstelling van de geproduceerde pyrolyseolie.

In wetenschappelijke publicaties is grote overeenkomst in de samenstelling van de elementen en de materialen van autobanden (MVT- middle vehicle tyres) en vrachtwagenbanden (HVT- heavy vehicle tyres). In Tabel B1 is een overzicht van de samenstelling van auto- en vrachtautobanden te zien. De tabel bevat tevens in de linker kolom de samenstelling van banden van (gemotoriseerde) tweewielers.

¹³ Het RIVM heeft naar aanleiding van een gezondheidsonderzoek in het najaar van 2016 volgende schadelijke stofgroepen zijn in SBR-rubbergranulaat aangetroffen zoals: PAK, fenolen (4-tert-octylfenol, bisphenol A), ftalaten (di-2-ethylhexylftalaaat), benzothiazolen en metalen (zink en koper) (5).

Tabel B1 Element en materialen analyse van verschillende banden.

Components	LVT	MVT	HVT
<i>Element</i>			
Carbon	84.2	89.48	89.5
Hydrogen	7.9	7.61	7.50
Nitrogen	1.0	0.27	0.25
Sulphur	1.4	1.88	2.09
Oxygen	5.5	0.76	0.66
Moisture	1.80	1.53	1.60
Volatiles	64.50	56.72	68.43
Fixed Carbon	26.30	26.43	24.30
Ash	7.4	15.32	5.67
<i>Component</i>			
Natural Rubber	48	14	27
Synthetic rubber	10	27	14
Carbon Black	11	28	28
Steel	14-18	14-25	14-25
Fabric, Fillers, Accelerators etc.	12-16	16-17	16-17
Calorific value (kg/kJ)	33,200	36,774	34,743

LVT= light vehicle tyre, MVT= middle vehicle tyre, HVT= Heavy vehicle tyre
 BRON: R. Kumar Singh et al. J. of Anal. and Appl. Pyrolysis 135 (2018) 379–389.

Tabel B1 toont ook een verschil in de samenstelling van auto- en vrachtautobanden. Het aandeel natuurrubber in vrachtautobanden is groter dan die in autobanden. Als we uitgaan van het rubbergranulaat als fractie, waaruit het staal en overige niet-rubbermaterialen, zoals textiel, zijn afgescheiden, komt het aandeel natuurrubber in vrachtautobanden in orde grootte een factor 2 hoger uit dan die in autobanden. In het rapport van XX [niet openbare bron] wordt dit ook gesteld (Anoniem XX, 2019). In dit rapport is toegelicht dat er verschillende soorten synthetisch rubber zijn die modificaties zijn van twee hoofdcategorieën, te weten SBR en BR. Hierbij zijn IIR, CIIR en BIIR aanzienlijk minder dominant in vergelijking met SBR en BR. Dit is grotendeels te verklaren door de toepassing van halogeen rubbers (zoals CIIR en BIIR) in *innerline* binnenbanden. Deze rubbers hebben een zeer gunstige eigenschap voor de lucht/gas-permeabiliteit om ontsnapping van lucht of gassen zoveel mogelijk te beperken. De verschillende soorten NR zijn gemodificeerde vormen van natuurlijke rubbers. Het genoemde rapport geeft aan dat SBR vooral in autobanden als synthetisch rubber voorkomt, terwijl dit rubbertype niet in vrachtautobanden voorkomt. Dit verschil in rubbersoorten zou effect kunnen hebben op de hoeveelheid aromatische koolwaterstoffen fractie van de geproduceerde pyrolyseolie. Overige synthetische rubbersoorten, zoals BR, CIIR, BIIR, komen in dezelfde massapercentages voor in zowel auto- als vrachtautobanden.

B2.2 Pyrolyse

Pyrolyse is te omschrijven als een chemisch omzetting of ontleding van organische componenten door verhitting bij afwezigheid van (voldoende) in de lucht aanwezige vrije zuurstof. In de basis vinden er tijdens de pyrolyse degradatiereacties plaats van de copolymeren, waaruit het

rubber bestaat zoals kraken (verbreken van koolstofverbindingen), eliminatie en dehydrogenering (onttrekking van waterstof). Nieuwe stoffen kunnen tijdens de pyrolyse uit de ontledingsproducten ontstaan door substitutie en additie. Hieruit vormen zich drie fracties:

- Gassen zoals: waterstof (H₂), waterstofsulfide (H₂S), methaan (CH₄), ethaan (C₂H₆), propaan (C₃H₈), butaan (C₄H₁₀), ammoniak (NH₃) en relatief kleine hoeveelheden koolmonoxide (CO) en kooldioxide (CO₂). Bij halogeenhoudende rubbers ontstaan ook waterstofchloride (HCl) en waterstofbromide (HBr).
- Een vloeibare fractie, ofwel pyrolyseolie. De olie bestaat grotendeels uit verzadigde en onverzadigde lineaire (rechtketenig en vertakt) en cyclische alifatische koolwaterstoffen (alkanen en alkenen), monocyclische aromatische koolwaterstoffen (benzeen en alkylbenzenen) en polycyclische aromatische koolwaterstoffen -PAK's- (zoals naftaleen en benzo(a)pyreen). De alifatische koolwaterstoffen worden ook wel paraffinen (alkanen), olefinen (alkenen) en naftenen (cyclische koolwaterstoffen) genoemd.
- Een viskeuze tot vaste stoffractie. Hiervoor zijn verschillende namen in gebruik zoals teer, bitumen, asfalt, *char* en *carbon black*. Deze fractie bevat hoofdzakelijk de elementen koolstof en waterstof die aanwezig zijn in organische verbindingen met een kookpunt vanaf ruwweg 350°C en hoger. De vaste stoffractie kan hoge PAK-gehalten bevatten en verder lage gehalten tot enkele massaprocenten aan organische verbindingen met elementen zoals stikstof, zwavel, halogenen (chloor en broom) zuurstof en fosfor. Tevens zijn lage gehalten aan metalen en hun verbindingen afkomstig van additieven in de banden en restanten van afgescheiden metalen onderdelen in de banden te verwachten.

De producten van het pyrolyseproces zijn afhankelijk van:

- de samenstelling van de banden;
- de deeltjesgrootte van het rubbergranulaat;
- de snelheid van de verhitting in de oven;
- de eindtemperatuur van de oven variërend in een bandbreedte van 300 tot 900°C; en:
- de pyrolysetijd.

Bij XX is het pyrolyseproces geoptimaliseerd om een hoge opbrengst rCB te krijgen. De kwaliteit van de pyrolyseolie die uit condensatie van de hete procesgassen ontstaat, wordt door XX constant bewaakt. XX stuurt voor zover mogelijk het pyrolyseproces op minimale gehalten van onder andere zwevende stoffen en water in de pyrolyseolie.

De productsamenstelling van het pyrolyseproces van XX is volgens opgave van XX uitgedrukt in massaprocenten; 10-15 procent gas, circa 40 procent rCB en ongeveer 45 procent pyrolyseolie (anoniem YY,). Het XX-rapport concludeert dat de chemische samenstelling van de pyrolyseolie in belangrijke mate bepaald wordt door de procesparameters (zoals temperatuur en verblijftijd) en nauwelijks door de rubbersamenstelling van de (vracht)autobanden (anoniem, 2019). Enkele wetenschappelijke publicaties over de pyrolyse van afgedankte autobanden onderschrijven, zoals eerder is aangegeven, deze conclusie (Williams, 2013; Sathiskumar & Karthikeyan, 2019).

B2.3 Samenstelling pyrolyseolie

XX heeft in de jaren vanaf 2015 de chemische samenstelling van de geproduceerde pyrolyseolie laten onderzoeken door verschillende laboratoria. De gehalten bepaald van:

- totaal zwavel(verbindingen);
- organisch-halogeenvbindingen en polychloorbifenylen volgens daartoe wettelijk voorgeschreven analysemethoden of hiermee vergelijkbaar;
- chloordibenzodioxinen en totaalchlor;
- benzeen, ethylbenzeen, toluen en xylenen (BTEX);
- polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's);
- totaal van organische en anorganische zuren (zuurgetal).

In Tabel B2 is een overzicht gegeven van de meetresultaten (ranges) van de geanalyseerde pyrolyseolie van XX op bovengenoemde stoffen.

Tabel B2 Gemeten gehalten van gevaarlijke stoffen in XX pyrolyseolie.

Gevaarlijke stoffen	Bandbreedte van gehalten	Wettelijke grenswaarde / specificatie
totaal zwavel (%m/m)	0,7 tot 1,2	≤ 3,5 ^h (Marpol;ISO8217)
organisch-halogeenvbindingen (mg/kg)ⁱ	6 tot 45	≤ 50 (BOHB)
totaal-chloor (mg/kg)	<10 tot 240	n.b.
PCB congenerev (mg/kg)^j	< 0,2	≤ 0,5 (BOHB)
polychloordibenzodioxinen^d (ng/kg)	6,5 en 12	15.000 ^g (POP)
benzeen^a (mg/kg)	5.000 tot 25.000	< 1000 ^e (REACH)
benzeen^b (mg/kg)	3000 tot 16.000	< 1000 ^e (REACH)
BTEX (mg/kg)	100.000	n.b.
som 16 epa-PAK (mg/kg)	5300 en 23.000	≤10 (REACH) ^f
benzo(a)pyreen (mg/kg)	54 en 200	≤ 1 (REACH) ^f ; ≤100 (LAP3) ^k
zuurgetal (mg KOH/g)	3,6	≤2,5 ^c (Marpol;ISO8217)

- Betreft benzeengehalte in de olie van gepyrolyseerde autobanden.
 - Betreft benzeengehalte in de olie van gepyrolyseerde vrachtwagenbanden.
 - Betreft niet wettelijke bovengrenswaarde in scheepsbrandstoffen van ISO 8217.
 - Betreft 1,2,3,4,6,7,8,-HeptaCDD met 6,5 ng/kg en octaCDD met 12 ng/kg.
 - Betreft grenswaarde lid 3 van invoer nr. 5 beperking benzeen, Bijlage XVII REACH (17,18).
 - Betreffen grenswaarden voor de som van PAK en benzo(a)pyreen voor proces oliën voor de productie van rubber. Zie Bijlage G voor de details van entry 50 van Bijlage XVII REACH.
 - De grenswaarde uit Bijlage IV van de POP verordening wordt berekend met hulp van toxische equivalentiefactoren (TEF's), zie Bijlage IV voetnoot nr.2 van POP
 - Geldt voor zeeschepen buiten het SECA-gebied. Vanaf 2020 wordt de zwavelnorm aangescherpt naar 0,5 %m/m. Binnen het SECA-gebied geldt een zwavelnorm van 0,1 %m/m.
 - Organisch-halogeenvbindingen gehalte bepaald volgens wettelijk voorgeschreven analysemethode in de *Regeling bepalingmethoden organisch-halogeenvbindingen gehalte van brandstoffen* of hiermee vergelijkbaar (bv EN 14077).
 - Gehalte aan de afzonderlijke polychloorbifenyl congenerev 28, 52, 101, 118, 138, 153 en 180 bepaald met wettelijk voorgeschreven analysemethoden volgens NEN-EN 12766 deel1 en 2 of hiermee vergelijkbaar.
 - Benzo(a)pyreen is een zeer zorgwekkende stof die bij overschrijding van de specifieke concentratiegrenswaarde in afvalstoffen verplicht tot een risicoanalyse als een nuttige toepassing van een materiaal met die stof wordt beoogd of een beoordeling bijproduct of einde-afvalstof wordt uitgevoerd.
- n.b.= niet beschikbaar.

De aangetoonde stoffen in de pyrolyseolie van XX, zoals benzeen, PAK, benzo(a)pyreen en polychloordibenzodioxinen, zijn zeer zorgwekkende stoffen (ZZS).

Vanwege de mogelijkheid dat de pyrolyseolie van (vracht)autobanden op grond van de wetenschappelijke literatuur ook ZZS, zoals isopreen (2-methyl-1,3-butadieen) en indeen, kan bevatten, is op verzoek van RWS door XX additioneel de gehalten gerapporteerd van indeen en isopreen van alle door GSA geanalyseerde pyrolyse oliemonsters. De gehalten zijn in alle monsters kleiner dan 50 mg/kg.

De volgende paragraaf geeft een beoordeling van de gevonden chemische samenstelling van de pyrolyseolie aan de hand van artikel 6 lid c en d van de Kra.

B2.4 Criteria voor producten en risico's mens en milieu

Voor lid c is aan de hand van de toepasselijke productregelgeving gekeken of de pyrolyseolie voldoet aan de beschikbare wettelijke grenswaarden, bepalingen, eisen of specificaties in onder andere regulation 14 en 18 van Annex VI (ofwel de voorschriften 14 en 18 van Bijlage VI) van Marpol, het Besluit Organisch-Halogeengehalte Brandstoffen, de technische norm ISO 8217-2017 en de REACH regelgeving.

Voor lid d zijn de effecten op de kwaliteit van het milieu en de menselijke gezondheid van de mens door het gebruik van de pyrolyseolie als blendcomponent in de stookolie voor de zeescheepvaart beoordeeld op basis van de aanwezige wetenschappelijke kennis.

B2.4.1 Marpol Annex VI

(met doorwerking in Europese richtlijn EU/2016/802 betreffende zwavelgehalte in brandstoffen en nationale regelgeving, waaronder de Wet inzake luchtverontreiniging en het besluit brandstoffen luchtverontreiniging)

De *International Maritime Organization* (IMO) heeft in *Annex VI* van het *Marpol verdrag* eisen opgenomen over de kwaliteit van de bunkerolie. Deze eisen zijn van toepassing op het eindproduct 'brandstofolie' die door schepen worden gebruikt.

In Tabel B3 is een samenvatting gegeven van de eisen zoals ze in Marpol Annex VI in *regulation 14* en *18* over de kwaliteit van de scheepsbrandstoffen zijn bepaald. In de Tabel B3 staan de grenswaarden voor het zwavelgehalte en eisen over de aard van stoffen die wel of niet in de brandstof aanwezig mogen zijn.

Tabel B3 Samenvattend overzicht van de eisen aan de kwaliteit van scheepsbrandstoffen in Marpol Annex VI Bron: www.wetten.nl Marpol Annex VI regulation 14 en 18 of versie vertaald in Nederlands, MARPOL Bijlage VI voorschrift 14 en 18.

component	reikwijdte	grenswaarde in massaprocent	ingangsdatum
Zwavelgehalte volgens regulation 14 annex VI	Wereldwijd	≤ 3,5 %	1 juli 2012
		≤ 0,5 %	1 januari 2020
	In ECA ^a	≤ 0,10 %	1 januari 2015
	In havens liggend aan de kade	≤ 0,10 %	1 januari 2010
Kwaliteitseisen Scheepsbrandstof volgens regulation 18 annex VI^b	<ul style="list-style-type: none"> - afkomstig van aardolieraffinage. Uitzondering zijn kleine hoeveelheden additieven, ter verbetering van de specifieke brandstofeigenschappen en andere methoden dan raffinage van aardolie - vrij van anorganische zuren - vrij van toevoegingen of chemische (afval)stoffen die de veiligheid schip of werking machines in gevaar brengen, schade kan toebrengen aan personeel of een extra bijdrage kan leveren aan luchtverontreiniging 		

a) Sulfur Emission Control Area, vaargebied waarbinnen alleen zeeschepen die op laagzwavelige scheepsbrandstof varen zijn toegestaan.

Additief versus blendcomponent

In opdracht van XX heeft adviesbureau YY (afgekort met YY) een onderzoek uitgevoerd naar de productstatus van de pyrolyseolie uit afgedankte (vracht)autobanden. In het rapport over dit onderzoek is toegelicht dat de pyrolyseolie als vervangend product van lichte oliën kan worden bijgemengd aan residuale mariene brandstoffen (stookolie) met het doel ze op specificatie te brengen. Daarbij wordt de pyrolyseolie als een additief beschouwd, omdat het in kleine hoeveelheden zal worden bijgemengd aan de residuale scheepsbrandstof (Anoniem YY, 2018a). YY heeft in een memo toegelicht dat niet precies kan worden aangegeven welke componenten door de pyrolyseolie worden vervangen, aangezien de pyrolyseolie als één van de componenten in de blend wordt gebruikt. Het gehalte en aandeel van elk van de componenten is per blend verschillend aan de hand van de benodigde eigenschappen, aldus de uitleg in de memo (Anoniem YY, 2018b). De documenten geven aan dat er een afnemer van de pyrolyseolie is. De afnemer mengt diverse componenten voor de productie van een maritieme residuale brandstof. Hieraan wordt de pyrolyseolie toegevoegd als additief om de brandstof op specificatie te brengen.

Op basis van de beschikbare informatie is niet bekend wat de hoeveelheden van de pyrolyseolie zijn die (mogen) worden bijgemengd om daarvan stookolie te kunnen maken. Er zijn ook geen voorbeelden gegeven van lichte oliën die door de pyrolyseolie kunnen worden vervangen. Tevens is er geen informatie wat men met "op specificatie brengen" van de stookolie precies bedoelt.

Het RIVM-rapport over de ketenanalyse van brandstoffen en brandstofadditieven geeft een definitie van meng(blend)componenten en additieven in brandstoffen (12). Het verschil wordt bepaald door i) de functie en ii) de toegevoegde hoeveelheid. De blendcomponenten worden in hoeveelheden van 5 tot 15 volumepercenten (mogelijk meer) toegevoegd om specifiek de brandbaarheid van de brandstof te verbeteren, zoals vloeibaarheid, viscositeit en dichtheid. De additieven worden in aanzienlijk kleinere hoeveelheden vanaf 0,0001 tot orde grootte 0,1 – 1,0 massaprocenten toegevoegd om specifieke eigenschappen in de brandstof en bescherming van de brandstofsysteem inclusief de scheepsmotor te bereiken of juist ongewenste eigenschappen te verminderen. Denk bijvoorbeeld aan; corrosieremmers, antivriesmiddelen, smeermiddelen, detergenten, kleur- en markeerstoffen, katalysatoren, reinigingadditieven, emulsiebrekers, anti-schuimmiddelen, anti-statische middelen, biociden et cetera.

In een studie van CE delft is toegelicht wat onder "op specificatie brengen" wordt verstaan bij het produceren van stookolie (16). De praktijk is dat men aardoliedestillaten als blendcomponenten gebruikt voor het op specificatie brengen van de residuale olie tot een stookolie. Daarbij zijn met name de viscositeit (vloeibaarheid), de dichtheid en de gewenste eindkwaliteit van de stookolie (specificaties van residuale scheepsbrandstoffen van ISO 8217) van belang. Vanwege de geconstateerde onduidelijkheid over de functie en de hoeveelheid van de pyrolyseolie voor de beoogde toepassing, kan de olie niet zonder meer als een additief worden beschouwd. Dit betekent dat de pyrolyseolie vanwege overeenkomsten met aardoliedestillaten eerder als een *blendcomponent* moet worden gezien.

Zwavelgehalte

Marpol Annex VI *regulation* 14 bepaalt dat het zwavelgehalte in de brandstof van zeeschepen die buiten het SECA¹⁴-gebied varen niet hoger mag zijn dan 3,5 massaprocent. Vanaf 2020 komt er een aanscherping van de zwavelnorm van 3,5 naar 0,5 massaprocent. Zeeschepen met zogeheten scrubbers¹⁵ mogen echter blijven varen op stookolie met een hoger zwavelgehalte. Schepen die in het SECA-gebied van het Kanaal, de Noordzee en de Baltische zee varen, mogen uitsluitend met een laagzwavelige brandstof varen die aan de grenswaarde van maximaal 0,1 massaprocent voldoet.

Het zwavelgehalte van de pyrolyseolie van XX ligt in een range van 0,7 tot 1,2 massaprocent (zie Tabel 2). Ondanks aanscherping van het zwavelgehalte naar 0,5 massaprocent in 2020 kan de pyrolyseolie wat betreft het zwavelgehalte als blendcomponent gebruikt worden. Dit kan echter alleen onder de voorwaarde dat de residuale olie waaraan de pyrolyseolie wordt bijgemengd - eventueel aangevuld met één of meer andere blendcomponenten - na menging de grenswaarde van 0,5 massaprocent niet overschrijdt. Vanwege de vaststelling dat niet bekend is in welke hoeveelheid de pyrolyseolie als additief of als blendcomponent wordt bijgemengd, is ter illustratie een worstcase-berekening gemaakt van het zwavelgehalte in een stookolie. We gaan

¹⁴ Dit vaargebied heet het SECA en staat voor sulfur emission control area.

¹⁵ Scrubbers zijn installaties die de verbrandingsproducten van de zwavel (met name zwaveldioxide) uit de rookgassen van de scheepsmotor wegvangen. Hierdoor is het toegestaan dat schepen varen op stookolie met een hoger zwavelgehalte.

uit van de zwavelgrenswaarde van een 0,5 massaprocent. Als we aannemen dat de stookolie 15 volume procenten pyrolyseolie bevat, met een dichtheid van 1kg/l en een zwavelgehalte van 1,2 massaprocent, betekent dit dat de residuale olie inclusief één of meerdere andere blendcomponenten in de stookolie na menging niet meer dan 0,37 massaprocent zwavel mag bijdragen in het eindproduct. Voor schepen die aan boord zijn voorzien van een rookgasreiniging (scrubber), vormt bijmenging van de pyrolyseolie in de stookolie op grond van het zwavelgehalte geen beletsel om te voldoen aan de Marpol Annex VI-regelgeving.

Stookolie uit aardolieraffinage

Pyrolyseolie is geen koolwaterstof verkregen uit aardolieraffinage en het deel dat uit natuurrubber is verkregen is ook niet te herleiden tot aardolie. De pyrolyseolie moet volgens *regulation 18.3.1.1*. daarom als 'additief' worden aangemerkt waarvan kleine hoeveelheden aan de stookolie mogen worden toegevoegd. Wat onder additief precies wordt verstaan en tot welke hoeveelheden nog sprake is van een additief maakt Marpol Annex VI niet duidelijk. De definitie van een brandstofadditief is nauwkeurig toegelicht door *The Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers*. Deze definitie is ook door het RIVM overgenomen in het rapport over de ketenanalyse brandstoffen en brandstofadditieven (Bakker en Theodori, 2015; EU, 2006)). Uit het voorgaande en de tekst over additief versus blendcomponent moet de pyrolyseolie voor de functie en de hoeveelheid als een blendcomponent worden gezien, met het gevolg dat dit in eerste instantie in strijd lijkt te zijn met *regulation 18.3.1.1*. van Marpol Annex VI.

In lid 18.3.2 is echter een mogelijkheid geboden om een stookolie te maken door methoden anders dan de raffinage van aardolie. In Bijlage D is nader uitgewerkt hoe dit kan worden begrepen, welke begripsomschrijvingen Marpol hanteert en welke ontbreken.

We kunnen concluderen dat, los van *regulation 4* van Marpol Annex VI, andere type brandstoffen toegestaan zijn zolang ze: voldoen aan de zwavelnorm volgens *regulation 18.3.2.1*, de NOx-emissiegrenswaarde volgens *regulation 18.3.2.2*. en vrij zijn van anorganische zuren, de veiligheid van schepen en hun machinerie en ook de veiligheid van het personeel waarborgen en niet bijdragen aan extra luchtverontreiniging volgens *regulation 18.3.2.3*. Men moet uitgaan van de algemene begripsomschrijvingen zoals die van *olie*, *ruwe olie*, *oliehoudend mengsel* en *brandstofolie* in *regulation 1.1 tot en met 1.4* en aanhangsel I 'lijst van Oliën' van Marpol Annex I en *brandstofolie* in *regulation 2.9* van Marpol Annex VI en dat is olie op basis van aardolie met inbegrip van gas (bv LNG), destillaten en residuale brandstoffen.

Onder *regulation 18.3.2* van Marpol Annex VI zou het dan gaan om olie gebruikt als brandstof;

- i) die gewonnen wordt uit aard-/minerale olie die op een andere wijze wordt verkregen dan via raffinage van aardolie. Dan zou het kunnen gaan om producten als aardgascondensaat, teerzand en wellicht ook afvalolie; of:
- ii) die met andere productiemethoden dan raffinage van aardolie is geproduceerd. Raffinage is een vrij breed te interpreteren begrip, zodat het niet eenvoudig is om het onderscheid te kunnen maken.

Anorganische zuren

De stookolie moet volgens *regulation 18.3.1.2 en 18.3.2.3* van Marpol Annex VI vrij zijn van anorganische zuren. De pyrolyseolie van XX bevat op basis van twee onderzochte monsters 3,6mg KOH/g en 11,1mg KOH/g aan zuren. Volgens het eerder gebruikte rekenvoorbeeld komt, uitgaande van de meetwaarde 3,6mg KOH/g, het gehalte in de stookolie uit op afgerond 0,5 mg KOH/g. Daarbij is aangenomen dat de residuale olie en andere blendcomponenten geen anorganische zuren bevatten. Op grond van een kwalitatieve beoordeling voldoet de pyrolyseolie strikt genomen niet aan deze voorwaarde van *regulation 18*. Alleen als XX kan aantonen dat het gehalte anorganische zuren niet boven de aantoonbaarheidsgrens van de analysemethode (ASTM D664-2018) uitkomt, voldoet de pyrolyseolie aan *regulation 18*. Eenzelfde redenering geldt voor de meetwaarde van 11,1mg KOH/g.

Schadelijke toevoegingen

Bovenop de voorwaarde dat de stookolie moet voldoen aan de zwavelnorm en de NO_x-emissiegrenswaarde, moet de stookolie tevens vrij zijn van schadelijke toevoegingen die een risico vormen voor i) de veiligheid van de werknemers, ii) het in bedrijf houden van de scheepsmotor en iii) extra uitstoot van schadelijke stoffen naar de lucht. Deze bepaling van *regulation 18.3.1.3 en 18.3.2.3* is niet concreet uitgewerkt in een lijst met verboden stoffen en normstellende grenswaarden. In B2.3 is een beeld gegeven van de chemische samenstelling van de pyrolyseolie en welke schadelijke stoffen daarin voorkomen. Hierbij is de samenstelling niet uitputtend bekend. Er komen hoge gehalten voor van de stofgroepen zoals PAK, waaronder benzo(a)pyreen en BTEX, waaronder benzeen. Benzo(a)pyreen en benzeen zijn in het kader van de Europese regelgeving tevens als zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) geclassificeerd. Het is Nederlands beleid om ZZS zoveel als mogelijk uit de leefomgeving te weren. Ruwe aardolie waaruit de stookolie wordt gemaakt, bevat overigens 'van nature' PAK en alkylbenzenen. Bijmenging van organische vloeistoffen anders dan uit de aardolieraffinage kunnen echter leiden tot aanzienlijk hogere gehalten van de genoemde schadelijke stoffen.

Verder zijn organohalogeenvormingen aan te treffen die niet 'van nature' voorkomen in ruwe aardolie waaruit stookolie wordt gemaakt. De aanwezigheid van specifiek organochloorverbindingen is een risico op de vorming en de uitstoot van zoutzuur en chloordioxinen en -furanen in de rookgassen. Enkele van de organochloorverbindingen, zoals trichlooretheen, zijn tevens ZZS. Dat organohalogeenvormingen in stookolie kunnen voorkomen, is onlangs in een verschenen RIVM-rapport over een onderzoek naar de chemische samenstelling van stookolie van vijftig zeeschepen geconstateerd (Broekman, 2018). De pyrolyseolie zou volgens bovengenoemde uitleg strikt genomen niet in de stookolie mogen voorkomen, omdat de stookolie in dat geval niet vrij is van toegevoegde schadelijke stoffen die gevaar opleveren voor de arbeidsveiligheid, de scheepsmotor en of de extra uitstoot van schadelijke stoffen in de rookgassen, aldus *regulation 18*. In analogie met de anorganische zuren is vanwege het ontbreken van een stoffenlijst en corresponderende bovengrenswaarden in Marpol Annex VI niet duidelijk wanneer er sprake is van aan- of afwezigheid van toegevoegde schadelijke stoffen. Hierbij beperken we ons op stookolie vreemde stoffen. De stookolie bevat echter van zichzelf ook al de nodige

schadelijke stoffen (PAK's, alkylbenzenen). Wanneer er in dat geval sprake is van toegevoegde schadelijke stoffen maakt Marpol eveneens niet duidelijk.

Samenvattend oordeel

De pyrolyseolie is geen product uit de aardolieraffinage. Dit betekent volgens de tekst van Marpol Annex VI *regulation* 18.3.1.1. dat slechts kleine hoeveelheden hiervan als additief in de stookolie zou mogen worden toegevoegd. Vanwege de beoogde en te verwachten functie van de pyrolyseolie is het geen additief, maar een blendcomponent die in 5-15 of mogelijk nog meer volumeprocenten in een stookolie kan worden bijgemengd. Bij deze hoeveelheden lijkt de toepassing van pyrolyseolie als blendcomponent in strijd te zijn met *regulation* 18.3.1.1. van Marpol Annex VI. De bepaling in *regulation* 18.3.2 geeft geen ruimte om pyrolyseolie als blendcomponent toe te passen. Deze bepaling betreft de productie van een brandstofolie die gewonnen wordt uit aard-/minerale olie (bijvoorbeeld aardgascondensaat, teerzand en afvalolie) die op een andere wijze wordt verkregen dan via raffinage van aardolie of volgens andere productiemethoden dan de raffinage van aardolie. Daarbij is van belang dat de brandstofolie te allen tijde aard-/minerale olie als grondstof heeft of meer algemeen fossiele grondstoffen. Hierbij laat de definitie van brandstofolie in *regulation* 2.9 van Bijlage VI toe dat met inbegrip van destillaten en residuale brandstoffen ook gassen toegestaan zijn. Een bekend voorbeeld is LNG.

Op grond van het zwavelgehalte in een concentratiegebied van 0,7 tot 1,2 massaprocent kan de pyrolyseolie van XX als blendcomponent worden gebruikt. Dit ondanks de aanscherping vanaf 2020 van de zwavelnorm van 3,5 naar 0,5 massaprocent in stookolie volgens Marpol Annex VI. De zeeschepen die zijn voorzien van een scrubber mogen op stookolie met hogere zwavelgehalten varen en vormt het bijmengen van de pyrolyseolie geen beletsel.

Op grond van de toevoegingen van zuren, waarvan XX niet heeft aangetoond dat de olie vrij is van anorganische zuren, schadelijke stoffen zoals organohalogeenvverbindingen en in enkele gevallen ook ZZS, is het gebruik van pyrolyseolie als blendcomponent volgens Marpol Annex VI niet toegestaan. Ze kunnen bij blootstelling een risico vormen voor het personeel, de scheepsmotor en de leefomgeving door extra luchtemissies. De Annex bevat echter geen bovengrenswaarden voor de aan- of afwezigheid van de schadelijke stoffen, zodat niet duidelijk is tot welk gehalte Marpol Annex VI spreekt van het vrij zijn van deze toevoegingen in de stookolie. Als richtlijn kan de aantoonbaarheidsgrens van een gevalideerde analysemethode als grenswaarde dienen. Alles overziend, mag de pyrolyseolie strikt genomen niet worden toegepast als blendcomponent in de stookolie.

B2.4.2 Besluit Organisch-Halogeengehalte Brandstoffen (Bohb)

In het Bohb zijn wettelijke grenswaarden gesteld aan het somgehalte organohalogeenvverbindingen van 50 mg/kg en het gehalte polychloorbifenylen (PCB) van 0,5 mg/kg per PCB-congeneer. Deze grenswaarden zijn van toepassing op het eindproduct 'brandstoffen', maar ook op de componenten waarmee de brandstof is geproduceerd. Het totaal organisch-halogeengehalte in de pyrolyseolie van XX is bepaald volgens de wettelijk voorgeschreven analysemethode (of hiermee vergelijkbaar) en bedraagt gemiddeld 23 mg/kg, met een

bandbreedte van 1 tot 45 mg/kg. Dit is lager dan de wettelijke grenswaarde van het organisch-halogeene gehalte van 50 mg/kg van het Bohb en voldoet daarmee aan de gestelde eis. De bandbreedte is echter wel groot, waarbij het maximum net onder de grenswaarde ligt. Dit is kritisch, omdat het ingangsmateriaal een onbekende hoeveelheid chloor- en broomhoudende rubbermaterialen kan bevatten, waarbij het pyrolyseproces niet nauwkeurig op het organisch-halogeengehalte kan worden gestuurd.

Het gehalte van de PCB congenere is eenmalig in de pyrolyseolie chemisch geanalyseerd. Daarbij zijn geen PCB-congenere gekwantificeerd boven de bepaalbaarheidsgrens van 0,2 mg/kg. De wettelijke grenswaarde van 0,5 mg/kg per PCB-congeneer is daarmee niet overschreden. Hoewel geen overschrijding van de PCB is vastgesteld, is in het geanalyseerde monster van de pyrolyseolie wel een aantoonbaar organisch-halogeene gehalte van 6 mg/kg gekwantificeerd. Dit betekent dat er niet geïdentificeerde organohalogeene verbindingen in de pyrolyseolie aanwezig waren. Deze stoffen worden niet in stookolie verwacht.

Samenvattend oordeel

De pyrolyseolie van XX voldoet aan de wettelijke grenswaarden van het Bohb. De gevonden bandbreedte van het organisch-halogeene gehalte met een maximum van 45 mg/kg is echter groot.

Zekerheid over het voldoen aan deze wettelijke grenswaarden is mogelijk door elke levering van een nieuwe partij pyrolyseolie tevens te voorzien van een analysecertificaat met gerapporteerde meetwaarden van het organisch-halogeene gehalte en het gehalte PCB-congenere.

B2.4.3 REACH

Verordening (EG) nr. 1907/2006 (REACH) regelt in de Europese Unie de verplichtingen voor bedrijven die stoffen produceren, importeren, gebruiken, verwerken en verhandelen.

Het begrip 'stof' is behalve op individuele chemische stoffen ook van toepassing op vele honderden stoffen met een complexe samenstelling, zoals producten verkregen uit aardolieraffinage of pyrolyse. Ze worden aangeduid als 'stoffen van onbekende of wisselende samenstelling, complexe reactieproducten en biologische stoffen' (in het Engels afgekort als UVCB).

Door het registreren van de stoffen en het opstellen van veiligheidsinformatiebladen (safety data sheets – SDS) wordt in de keten van de productie, levering en het gebruik informatie gecommuniceerd over onder andere de gevaren en risico's, de benodigde risico beperkende maatregelen en de condities voor gebruik van de stoffen.

Indien stoffen als 'zeer zorgwekkende stoffen' (vertaald in het Engels *substances of very high concern* -SVHC) worden beschouwd, conform artikel 57 van REACH, kunnen beperkingen worden opgelegd via het proces van autorisatie of restrictie. Bepaalde gevaarlijke stoffen zijn niet onder REACH gereguleerd maar onder Verordening (EG) 850/2004 (POP-verordening).

De zeer zorgwekkende stoffen worden op de kandidaatslijst van REACH geplaatst. Na prioritering verschijnen de SVHC's met hun autorisatieplicht in Bijlage XIV van de REACH-verordening. Stoffen waarvoor beperkingen gelden, zijn opgenomen in Bijlage XVII van de

REACH-verordening. Op de website van het RIVM worden deze en andere lijsten van zorgwekkende stoffen afhankelijk van de verschillende wettelijke kaders gebundeld tot de Nederlandse ZZS-lijst en tweemaal in het jaar geactualiseerd (<https://rvszoekstelsysteem.rivm.nl/ZZSlijst/Index>).

De door XX geproduceerde pyrolyseolie van (vracht)autobanden bevat benzeengehalten in een concentratiegebied van 3.000 tot 25.000 mg/kg. Dit komt overeen met 0,3 tot 2,5 massaprocent. Benzeen staat op de lijst van beperkingen onder vermelding nr. 5 in Bijlage XVII van REACH.

In lid 3 van de beperking staat dat benzeen niet op de markt mag worden gebracht of worden gebruikt als stof, als bestanddeel van andere stoffen, of in mengsels, in concentraties gelijk aan, of meer dan 0,1 massaprocent. Hierop gelden in lid 4a tot en met 4c uitzonderingen die echter niet gelden voor de pyrolyseolie.

In lid 4a is onder andere bepaald dat de beperking niet geldt voor motorbrandstoffen vallend onder de Europese richtlijn 98/70/EG. Stookolie voor de zeescheepvaart is van deze richtlijn uitgesloten, zodat de vrijstelling van de beperking volgens lid 4a niet van toepassing is.

In lid 4b is de beperking vrijgesteld bij het gebruik in industriële processen. De stookinstallaties op schepen, voertuigen en vliegtuigen zijn uitgesloten van de richtlijn 2010/75/EU inzake industriële emissies (hoofdstuk III art.28 lid h). Oftewel het verbranden van stookolie met daarin de XX-pyrolyseolie aan boord van een zeeschip is geen industrieel proces. De vrijstelling van de beperking in lid 4b is daarom niet van toepassing. Tenslotte heeft de vrijstelling van de beperking in lid 4c betrekking op het gebruik van aardgas dat benzeen bevat, zodat ook deze vrijstelling uitgesloten is in deze casus.

Tolueen staat net als benzeen op de REACH-restrictielijst van Bijlage XVII bij vermelding nr.48. De beperking van tolueen heeft geen betrekking op het beoogde gebruik van pyrolyseolie van XX.

De som van enkele PAK-componenten en benzo(a)pyreen afzonderlijk staan eveneens op de restrictielijst in Bijlage XVII van REACH. De beperkingen van de PAK en benzo(a)pyreen hebben, net als tolueen, geen betrekking op de pyrolyseolie die XX op de markt brengt om het in stookolie toe te passen ([Lijst van beperkingen - ECHA \(europa.eu\)](#)).

Samenvattend oordeel

De pyrolyseolie van XX mag niet als blendcomponent in stookolie voor de zeescheepvaart worden gebruikt vanwege te hoge benzeengehalten vanaf de grenswaarde van 0,1 massaprocent. Dit is bepaald op grond van de beperking in het gebruik van benzeen volgens invoer nr.5 van Bijlage XVII van de REACH-verordening.

Indien XX in haar pyrolyseproces technische mogelijkheden ziet om het benzeengehalte onder de 0,1 massaprocent te brengen, vervalt de beperking om de pyrolyseolie als blendcomponent voor stookolie op de markt te brengen.

B2.4.4 ISO 8217-2017

De technische productspecificaties van mariene residuale brandstoffen, zoals stookolie, staan in ISO 8217-2017. Dit is geen wettelijke norm, maar een in de sector van bunkerleveranciers en ontvangers van scheepsbrandstoffen geaccepteerde technische productnorm.

Op basis van een eenmalig genomen monster pyrolyseolie blijkt het zuurgetal met 3,6 mg KOH/g hoger te zijn dan de grenswaarde van 2,5 mg KOH/g in de stookolie. Ondanks dat een bovengrenswaarde van het zuurgetal wordt gegeven, moet de brandstof vrij zijn van anorganische zuren. Een brandstof waarin een sterk zuur aanwezig is, zelfs op een laag niveau onder de rapportagegrens van de ASTM D664-testmethode¹⁶, voldoet niet aan de ISO 8217-2017. Dit omdat er een correlatie bestaat tussen de aanwezigheid van een sterk zuur en de corrosieve activiteit van een brandstof. Deze toelichting staat in Bijlage E van de ISO 8217-2017. Als we mogen uitgaan dat de pyrolyseolie van XX als blendcomponent tot 15 volumeprocent wordt bijgemengd in een stookolie levert dit op basis van een berekening een zuurgetal van circa 0,5 mg KOH/g. Dit is een factor 10 hoger dan de bepalingsgrens van het zuurgetal volgens ASTM 664. Hierbij is de aanname dat de residuale olie en eventueel andere bijgemengde blendcomponenten waaruit de stookolie wordt gemaakt vrij zijn van anorganische zuren. De stookolie dient volgens ISO 8217-2017 vrij te zijn van anorganische zuren. Dit sluit ook aan op de tekst over de beoordeling van de pyrolyseolie volgens Marpol Annex VI.

Samenvattend oordeel

De pyrolyseolie is niet zonder meer geschikt als blendcomponent in stookolie op grond van het zuurgetal van 3,6 mg KOH/g. De stookolie met daarin tot circa 15 volumeprocenten van deze pyrolyseolie is niet vrij van anorganische zuren. De aanbeveling is om bij elke nieuwe levering van de pyrolyseolie het zuurgetal en tevens de aanwezigheid van sterke zuren te bepalen.

B2.5. Beoordeling risico's voor mens en milieu (artikel 6 lid d van de Kra)

We constateren dat de chemische samenstelling van de pyrolyseolie gevaarlijke en zeer zorgwekkende stoffen bevat. Gevaarlijke stoffen, zoals zwavelverbindingen, polycyclische aromatische koolwaterstoffen en organisch-halogeenvverbindingen waaronder chloorhoudende verbindingen, zullen bij verbranding in de scheepsmotor (extra) uitstoot van zwaveldioxide, ultrafijnstof, zoutzuur, chloorhoudende dioxinen en –furanen veroorzaken. Zoutzuur is een sterk zuur dat bij het ontstaan tijdens de verbranding in de scheepsmotor tevens schadelijk is voor de motor.

Polycyclische aromatische koolwaterstoffen zijn evenals de afzonderlijke PAK-componenten, zoals benzo(a)pyreen en naftaleen ZZS. Daarbij verwachten we dat de olie ook indeen en isopreen en mogelijk nog andere ZZS bevat. Een aantal van de genoemde stoffen is 'van nature' in verschillende gehalten aanwezig in ruwe aardolie waaruit de stookolie wordt gemaakt. In te hoge gehalten kunnen ze echter door bijmenging van ongeschikte organische vloeistoffen extra schadelijk en gevaarlijk zijn. Voor ZZS geldt bovendien dat het Europees en Nederlands beleid is om deze stoffen zoveel als mogelijk is uit de leefomgeving te weren.

¹⁶ Het meetgebied van de bepaling van het zuurgetal in scheepsbrandstoffen is volgens ASTM 664 is 0,05 tot 1,0 mg KOH/g bij lage gehalten van anorganische zuren. Bij hogere gehalten dient volgens dit analysevoorschrift minder analysemonster te worden ingewogen. Er kan tot een gehalte van 260 mgKOH/g op het zuurgetal worden geanalyseerd.

De pyrolyseolie bevat hoge gehalten aan BETX tot ordegrrootte 10 massaprocenten. Hiervan is benzeen, eveneens een ZZS, met gehalten tussen 0,3 en 2,5 massaprocent, een carcinogene stof en daarmee de meest gevaarlijke stof. Eerder is al geconstateerd dat de REACH-regelgeving vanwege te hoge benzeengehalten in de pyrolyseolie een beperking oplegt om de olie op de markt te brengen als blendcomponent voor de productie van stookolie voor de zeescheepvaart. Deze beperking is bedoeld om de mens en het milieu tegen een te hoog risico op schadelijke effecten te beschermen door de benzeenblootstelling in verschillende fasen van de levenscyclus van de pyrolyseolie. Te noemen zijn de productie, de opslag, het transport, de levering en de bijmenging van de pyrolyseolie tot een stookolie en de bunkering van deze stookolie in een brandstoftank aan boord van een zeeschip. Vervolgens kan benzeenblootstelling ontstaan tijdens het stoken voor de voortstuwing van een zeeschip. Normaliter zal in de laatste fase bij de verbranding in de scheepsmotor het aanwezige benzeen grotendeels worden omgezet in kooldioxide en water. Naarmate de verbrandingscondities afwijken van een optimale verbranding kunnen diverse andere schadelijke stoffen worden gevormd en in de leefomgeving vrijkomen. Het is daarbij ook mogelijk dat benzeen niet verbrandt en in de rookgassen vrijkomt.

Het RIVM-rapport over het onderzoek van de chemische samenstelling van stookolie levert bewijs dat in de stookolie van enkele zeeschepen te hoge gehalten van PAK, naftaleen, indeen en benzo(a)pyreen zijn aangetoond (Anoniem YY, 2018a). Verder bleek in vrijwel alle stookoliemonsters één of meerdere schadelijke stoffen te zijn aangetroffen die daarin niet thuishoren. Benzeen is echter niet aangetoond in deze stookoliemonsters. Aantoonbare toevoegingen van schadelijke stoffen in de stookolie door bijmenging van de pyrolyseolie van XX tot 15 volumepercenten zal naar verwachting een extra uitstoot van deze stoffen en nieuw gevormde schadelijke stoffen in de rookgassen tot gevolg hebben.

Het RIVM heeft in een eerder uitgevoerde studie verslag gedaan over een literatuuronderzoek naar de milieurisico's van de uitstoot van rookgassen van de zeescheepvaart (7). Hierin is onder andere geconcludeerd dat er extra uitstoot van schadelijke stoffen mogelijk is door het gebruik van alternatieve blendcomponenten. De risico's voor het milieu konden echter niet kwantitatief worden beoordeeld vanwege het ontbreken van kennis hierover in de wetenschappelijke literatuur. In die studie zijn tevens de REACH-registraties van blendcomponenten beoordeeld. Hieruit blijkt dat in de aanwezige chemische veiligheidsrapporten *chemical safety reports (CSR)* de blootstellingsscenario's, voor zover ze beschreven staan, niet voldoende volledig zijn. Zo worden de verbrandingsproducten, die tijdens het gebruik worden gevormd, vaak niet meegenomen. Hierdoor ontbreekt informatie over de te verwachten uitstoot van schadelijke stoffen naar de leefomgeving en daarmee het blootstellingsrisico op schadelijke effecten voor de mens en het milieu. De beoordeling van de REACH-registraties van blendcomponenten enerzijds en het ontbreken van kennis in de wetenschappelijke literatuur over de risico's van schadelijke effecten op de mens en het milieu door de (extra) uitstoot van de zeescheepvaart anderzijds gaf daarmee een consistent beeld.

Samenvattend oordeel

De beoogde toepassing om pyrolyseolie van XX als blendcomponent in stookolie te gebruiken voor de zeescheepvaart kan tijdens het gebruik extra schadelijke effecten veroorzaken voor de mens en de leefomgeving. De pyrolyseolie bevat diverse schadelijke stoffen die de stookolie extra verontreinigen. De schadelijke effecten zijn nauwelijks goed te kwantificeren door het ontbreken van kennis hierover. In kwalitatief opzicht is het risico op (extra) schadelijke effecten niet uit te sluiten. Te denken is aan extra uitstoot van PAK, zoutzuur en chloordioxinen en -furanen.

De beperking om pyrolyseolie in stookolie toe te passen is vanwege te hoge gehalten aan benzeen volgens invoer nr.5 van Bijlage XVII van de REACH-verordening in de vorige paragraaf toegelicht. Dit betekent dat de mens en het milieu tegen het risico op benzeenblootstelling moet worden beschermd tijdens alle fasen van de keten vanaf de productie van de pyrolyseolie tot en met het gebruik als stookolie in een zeeschip voor de voortstuwing.

De conclusie is daarom dat het gebruik van de pyrolyseolie van XX vanwege de aanwezigheid van te hoge gehalten van schadelijke stoffen na bijmenging tot 15 volumepercenten in een stookolie voor de zeescheepvaart over het geheel genomen tot ongunstige effecten kan leiden voor mens en milieu.

B2.6 Referentielijst

1. Eilhann E. Kwon, Haakrho Yi and Marco J. Castaldi, 2012
Utilizing Carbon Dioxide as a Reaction Medium to Mitigate Production of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Thermal Decomposition of Styrene Butadiene Rubber.
Environ. Sci. Technol., 46 (2012) 10752–10757.
2. R. Kumar Singh et al., 2018.
Pyrolysis of three different categories of automotive tyre wastes: Product yield analysis and characterization.
Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 135 (2018) 379–389.
3. Sitisaiyidah Saiwari, 2013.
Post-consumer tires back into new tires - *devulcanization and re-utilization of passenger car tires* -
Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands, 2013.
4. XX rapport, 1e versie 2019.
5. Groot G.M., A.G. Oomen, 2016.
Beoordeling gezondheidsrisico's door sporten op kunstgrasvelden met rubbergranulaat RIVM-rapport 2016-0202.
6. Landelijk Afvalbeheerplan versie 3 (LAP 3), deel F Bijlagen, F.3.1 Bijlage 3: Lijst van gebruikte termen, begrippen en definities
7. Broekman M.H., 2016. Milieurisico's van specifieke stoffen in bunkerolie in zeeschepen:
Onderzoek van de literatuur en de REACH-dossiers.
RIVM-rapport 2016-0076, 2016.
8. Anoniem YY, 2018a. Rapport YY, november 2018.
9. Broekman MH., 2018.
Chemische samenstelling van vijftig stookolieolie monsterster 2017-2018. RIVM-briefrapport 2018-0097, 2019.

10. Williams P.T., 2013.
Pyrolysis of waste tyres: A review.
Waste Management, 33 (2013) 1714-1728.
11. Sathiskumar C., Karthikeyan S., 2019.
Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products- a review.
Sustainable Materials and Technologies, 22 (2019) 1-6.
12. Bakker J. en Theodori D., 2015.
Ketenanalyse brandstoffen en brandstofadditieven.
RIVM-briefrapport 2015-0063, 2015.
13. SGS, 2019. Thermal cracking oil evaluation of substance sameness of an organic UVCB – a reach compliancy evaluation.
Rapport van SGS belgium nv, projectnr.180315, 1 feb. 2019.
14. WUR, 2018. De productie van autobanden zonder milieubelastende stoffen -een literatuurstudie naar de vervanging van zink, kobalt en minerale oliën.
Wageningen Food & Biobased Research rapportnr. 1885, dec 2018
15. Anoniem YY, 2018b. Memo adviesbureau YY, november 2018
16. Buck d A. e.a., 2011.
Blends in Beeld – Een analyse van de bunkerolieketen -
CE Delft rapportpublicatienummer 11.3382.35, mei 2011.

Websites

17. Annex XVII to REACH. <https://echa.europa.eu/substances-restricted-under-reach/-/dislist/details/0b0236e1807e1eec>
18. EU, 2006. VERORDENING (EG) Nr. 1907/2006 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1907-20190702&from=nl>
19. <https://www.atc-europe.org/>

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

november 2023

De zorg voor morgen
begint vandaag