

mLCA VERWERKINGSALTERNATIEVEN BANDEN

IN OPDRACHT VAN RIJKSWATERSTAAT WATER, VERKEER &
LEEFOMGEVING (WVL)

EINDRAPPORT, 5 JANUARI 2022



Foto van J. Magnusson



Rijkswaterstaat

SGS | **SEARCH**

PROJECT

mLCA VERWERKINGSALTERNATIEVEN AUTOBANDEN

Doel	Vergelijken van verschillende verwerkingsalternatieven voor personenwagenbanden
Opdrachtgever Contact	Rijkswaterstaat Water, Verkeer & Leefomgeving (WVL) Marco Kraakman - marco.kraakman@rws.nl
Uitgevoerd door Contact	SGS Search Consultancy, Martijn van Hövell m.m.v. Ulbert Hofstra van SGS Intron (marktanalyse) Martijn.vanHovell@sgs.com
Geverifieerd door Contact	(Intern) SGS Search Consultancy, Harry van Ewijk Harry.vanEwijk@sgs.com
Datum Status	5 januari 2021 Eindrapport
Aantal pagina's	45 (zonder bijlage)



Inhoud

1. INTRODUCTIE	4
1.1. Algemeen	4
1.2. Leeswijzer	4
1.3. Doel mLCA	4
1.4. Scope bepaling	4
2. MARKTANALYSE	6
2.1. Samenstelling banden	6
2.2. Marktomvang	7
2.3. Verwerkingsmethodes	7
2.4. Conclusie	11
3. LEVENSCYCLUSINVENTARISATIE	12
3.1. Granulaat ambient	13
3.2. Cryogeen granulaat	19
3.3. Devulkanisatie	24
3.4. Pyrolyse	29
4. MILIEUEFFECTBEOORDELING	34
4.1. Resultaten (gekaracteriseerd)	34
4.2. Resultaten (gewogen)	35
4.3. Zwaartepuntanalyse	36
4.4. Gevoeligheidsanalyses	39
5. CONCLUSIE	43
6. REFERENTIES	44
BIJLAGE A: RESULTATEN (GEKARAKTERISEERD)	46
BIJLAGE B: PRODUCTKAARTEN	48

1. INTRODUCTIE

1.1. Algemeen

Dit rapport beschrijft de milieubeoordeling van meerdere initiatieven en innovaties voor de verwerking van banden door middel van een multicyclus-Levenscyclusanalyse (mLCA).

In het kader van het project Hoogwaardige recycling werd de mLCA methodiek ontwikkeld. Het doel van een mLCA is om onderscheid te maken tussen meer en minder hoogwaardige recycling vanuit een milieuperspectief. In een mLCA wordt de milieu-impact ten gevolge van energie- en materiaalgebruik in recycleprocessen en de milieuwinst door vermeden productie van primaire grondstoffen en materialen door het gebruik van recyclaat, over drie levenscycli beoordeeld.

Er zijn in de markt meerdere initiatieven en innovaties voor de verwerking van banden. In het Landelijk Afvalbeheerplan (LAP) is het voornemen opgenomen om de minimumstandaard voor banden expliciet te gaan sturen op recycling. Inzicht in de hoogwaardigheid van de verschillende technieken voor het verwerken van banden is daarvoor van belang.

Rijkswaterstaat - Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS-WVL) heeft SGS Search gevraagd om allereerst de volgende vragen te beantwoorden:

- Welke vormen van verwerking zijn er momenteel mogelijk voor de banden?
- Voor welk type band is de verwerkingsmethode geschikt (autoband, vrachtwagenband e.d.)?
- Is de vorm al geïntroduceerd op de Nederlandse markt of alleen nog daarbuiten?
- Zo niet, in welke stap van de ontwikkelingsfase is de vorm van verwerking?
- Wat is nu en op de langere termijn de potentie van de verwerkingsvorm in tonnen/jaar of percentage te verwerken banden en wat is hier de bepalende factor (omvang markt voor recyclaat, technisch niet voor alle banden geschikt, etc.).

1.2. Leeswijzer

Een marktanalyse heeft geleid tot een eerste inventarisatie voor scope bepaling en een overzicht van de stand van zaken van de huidige vormen van verwerking van banden. De resultaten van deze analyse, die tussen november 2020 en februari 2021 plaatsvond, zijn gepresenteerd in hoofdstuk 2. Marktanalyse, alsmede de selectie voor uitwerking in de mLCA. De relevante verwerkingstechnieken zijn vervolgens uitgewerkt in hoofdstuk 3, levenscyclusinventarisatie. Resultaten van de daaruit volgende mLCA zijn opgenomen in hoofdstuk 4. Tevens worden in hoofdstuk 4 de resultaten geanalyseerd doormiddel van een zwaartepunt- en gevoeligheidsanalyse. In hoofdstuk 5 zijn de belangrijkste bevindingen samengevat.

1.3. Doel mLCA

Met behulp van de, in het kader van het project Hoogwaardige recycling ontwikkelde, mLCA methodiek zijn verschillende (voorgenomen) wijzen van verwerking van banden met elkaar vergeleken. Het resultaat van deze studie moet dienen voor de milieuhygiënische onderbouwing van de toekomstige minimumstandaard voor banden in het Circulair Materialenplan (CMP). De mLCA is uitgevoerd volgens LAP Bijlage F9.

1.4. Scope bepaling

In de mLCA is er uitgegaan van personenwagenbanden voor de te verwerken stroom, onder meer omdat dit de grootste stroom betreft. Daarnaast laten de resultaten van de inventarisatie zien dat personenwagenbanden een complexere samenstelling hebben met meer synthetisch rubber dan vrachtwagenbanden en daardoor moeilijker te recyclen zijn. Personenwagen- en vrachtwagenbanden combineren zou daarom een vertekend beeld kunnen geven.

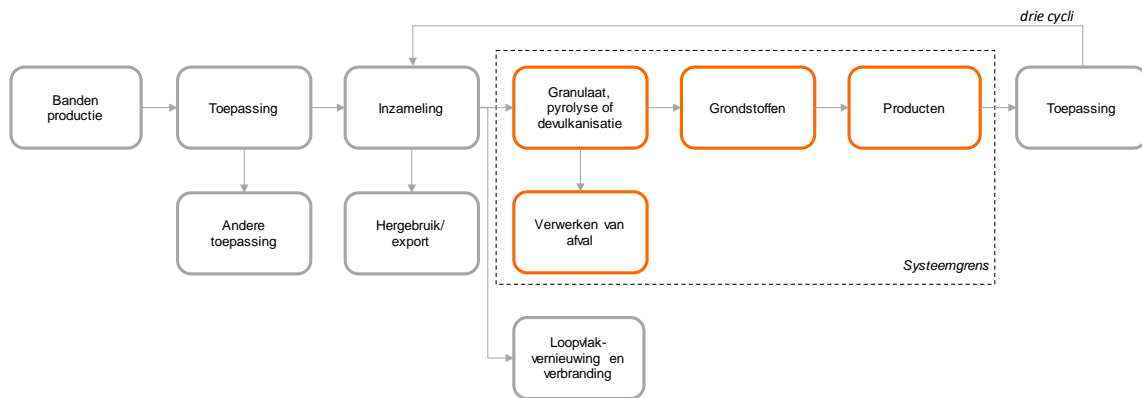
De verwerking van vrachtwagenbanden is daarom uitsluitend kwalitatief beoordeeld (waar relevant). Ook is er voor gekozen om binnenbanden buiten de scope te laten gezien het beperkte gebruik hiervan binnen de EU.



De functionele eenheid in de mLCA is de verwerking van 1 ton ingezamelde afgedankte personenwagenbanden. De mLCA methodiek volgend worden hierbij de uit verwerking verkregen materialen beschouwd en indien relevant worden ook de tweede en derde recyclingcyclus beoordeeld.

Het systeem, ofwel de start van deze levenscyclus analyse, begint bij reeds ingezamelde banden. Er wordt enkel uitgegaan van banden die ingezameld of teruggenomen worden door bandenleveranciers en/of garages. Banden die na gebruik voor auto's een andere toepassing gehad hebben en daarna ingezameld worden, zijn uitgesloten. Ook is er geen rekening gehouden met export van gebruikte banden in de massabalans.

Figuur 1 laat een schematisch overzicht zien van de levenscyclus van banden en waar de systeemgrenzen liggen voor de mLCA. De in het figuur vermelde recyclemethodes en de reden voor deze selectie zijn toegelicht in de marktanalyse.



Figuur 1 Schematisch overzicht van het systeem

2. MARKTANALYSE

2.1. Samenstelling banden

Banden verschillen in gewicht en samenstelling. Dit is mede afhankelijk van het type band, waarbij voor deze studie onderscheid gemaakt wordt tussen de volgende twee groepen:

- personenwagenbanden (voor voertuigen met een ledig gewicht minder dan 3500 kg waaronder bijvoorbeeld ook aanhangwagens en caravans) en
- overige autobanden (zoals voor vrachtwagens, bussen en agrarische voertuigen).

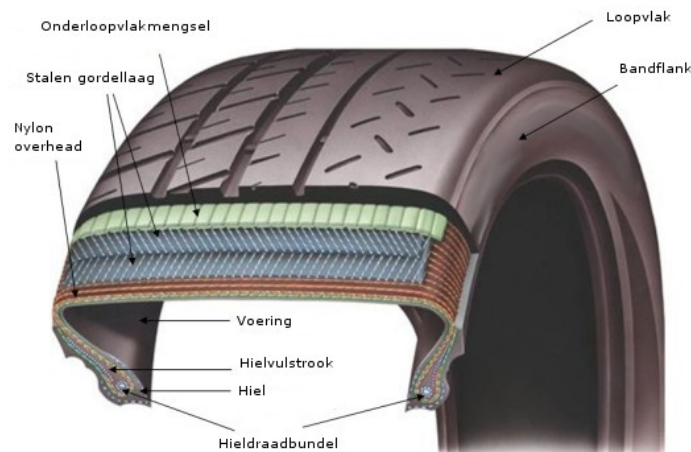
Binnenbanden worden, in tegenstelling tot andere werelddelen, in de Europese Unie nauwelijks gebruikt. Uitzonderingen zijn grondverzetmachines en bedrijven die in banden op oudere auto's met corrosie op de velg binnenbanden monteren om de lucht ondanks de roestige velgen vast te houden. Door de beperkte omvang van deze markt, worden binnenbanden buiten beschouwing gelaten.

Het gewicht van een band hangt met name af van de diameter. Een personenwagenband weegt tussen de 6,5 kg (13 inch) en 9 kg (15 inch), met uitschieters tot 15 kg (voor 20 inch). Banden van vrachtwagens zijn veel zwaarder dan die voor personenauto's. Het gewicht van een vrachtwagenband bedraagt 30 kg tot 80 kg, waarbij veelvoorkomende 17 inch maat circa 35 kg weegt en 22,5 inch ongeveer 60 kg. Zogenaamde extra load-banden (XL) zijn zwaarder dan de standaardbanden (SL).

Ook de samenstelling van de banden verschilt. Personenwagenbanden bestaan voor ongeveer 30% uit synthetisch (SBR) rubber en 30% natuurrubber. Ongeveer een kwart van de autoband bestaat uit de vulstof carbon black ('roet') dat de band steviger en slijtvast maakt. Vrachtwagenbanden bestaan voor 40% uit natuurrubber en bevatten minder additieven maar meer staal en textiel dan personenwagenbanden. Onderstaand zijn de verschillen in samenstelling en gewicht samengevat.

	Personenwagenbanden	Vrachtwagenbanden
Gewicht/stuk	8 kg (6,5-15 kg)	35-60 kg (30-80 kg)
Natuurrubber	30%	40%
SBR	30%	onbekend %
Carbon black	22%	onbekend %
Additieven	6%	minder dan personenwagen
Staal	10%	meer dan personenwagen
Textiel	3%	meer dan personenwagen

Naast de verschillende samenstelling zijn personenwagenbanden vaak complexer dan vrachtwagenbanden, mede omdat deze uit meer verschillende lagen bestaan. De complexe samenstelling is vaak noodzakelijk om te voldoen aan de hoge eisen voor veiligheid en prestatie die gesteld worden aan personenwagenbanden. Figuur 2 laat de opbouw en verschillende lagen van een personenwagenband zien.



Figuur 2 Bandconstructie [1]

2.2. Marktomvang

Om inzicht te krijgen in de stand van zaken in de verwerking van autobanden, is er onderzocht hoeveel autobanden er zijn verwerkt in de afgelopen jaren. In Tabel 1 zijn de totale hoeveelheden autobanden opgenomen die tussen 2009 en 2018 werden verwerkt in Nederland, met globale onderverdeling naar hergebruik, recyclen en (andere) vormen van nuttige toepassing. Storten en verbranden vindt niet of nauwelijks plaats volgens deze gegevens.

Tabel 1 Bandenverwerking 2009 - 2018 (in kiloton¹) [2]

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Voorbereiden voor hergebruik	18	21	23	28	32	27	28	29	33	33
Recyclen	63	64	60	56	56	66	68	71	66	74
Ander nuttige toepassing										
Energieterugwinning	18	16	16	11	9	4	3	3	5	2
Opvulmateriaal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Overige vormen van NT										
Verwijdering										
Verbranden	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Storten	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lozen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totaal	98	102	99	95	96	97	99	103	104	108

In Nederland worden meer banden verwerkt dan er worden ingenomen. De verwerking is 110.000 ton/jaar en de inname is 70.000 ton per jaar.

Tabel 2 Verdeling ingezamelde personenwagenbanden over verwerkingsroutes 2018 (in stuks) [3]

Verwerkingsroute	RecyBEM	RecyBEM %	ARN	ARN %	Totaal	Totaal %
Materiaal hergebruik ²	5.986.137	64,5 %	586.869	74,0 %	6.573.006	65,2 %
Tweede gebruik band	2.790.251	30,1 %	206.676	26,0 %	2.996.927	29,7 %
Loopvlakvernieuwing	162.440	1,8 %			162.440	1,6 %
Alternatief hergebruik	204.210	2,2 %			204.210	2,0 %
Thermisch hergebruik	139.234	1,5 %			139.234	1,4 %
Totaal	9,282.272		793.545		10.075.817	

In Tabel 2 is zichtbaar dat van de ingenomen personenwagenbanden (10 miljoen stuks per jaar) circa 30% wordt geëxporteerd naar plaatsen op de wereld waar de eisen die worden gesteld aan personenwagenbanden minder hoog zijn. Uitgaande van 8 kg per band³ betreft het totaal aan personenwagenbanden ongeveer 80.000 ton, waarvan dus circa 24.000 ton wordt geëxporteerd. Gezien de hogere getallen in Tabel 1 gaan we ervan uit dat het verschil de overige autobanden betreft: ongeveer 38.000 ton.

2.3. Verwerkingsmethodes

Vervolgens is er in een eerste inventarisatie gekeken naar de vormen van verwerking die momenteel mogelijk zijn voor de banden. Omdat de focus van de mLCA gericht is op hoogwaardige recycling is er gekeken naar de recyclingmethodes, wat betekent dat hergebruik buiten beschouwing is gelaten. Tijdens de inventarisatie kwamen de volgende methodes naar voren, welke in dit onderdeel verder beschreven worden:

- Mechanische recycling
- Cryogene verwerking
- Devulkanisatie (nog niet op industriële schaal voor personenwagenbanden)
- Pyrolyse (nog niet op industriële schaal)
- Loopvlakvernieuwing (voorbereiding voor hergebruik)

Daarnaast is er ook het verbranden van banden met energierterugwinning of inzet als brandstof. Dit is niet opgenomen in deze studie omdat dit voor banden in Nederland niet voorkomt.

¹ De getallen zijn afgerond (en totalen dus niet per se gelijk zijn aan de som van afgeronde datapunten).

² De term 'hergebruik' is overgenomen uit de bron van deze data en geïnterpreteerd als recyclen. Bij 'thermisch hergebruik' wordt inzet als brandstof verondersteld.

³ Inschatting SGS op basis van 6,5 kg (13 inch) en 9 kg (15 inch), met uitschieters tot 15 kg (voor 20 inch).



Mechanische recycling

Het shredderen van banden tot rubbergranulaat en scheiden van rubber, staal en textiel is de hoofdverwerking in Nederland. Het granulaat dat output is van dit proces wordt in dit rapport vermeld als 'ambient granulaat', omdat deze term veelal door producten van granulaat gebruikt wordt voor granulaat dat niet gekoeld wordt tijdens het verwerken. Het rubbergranulaat kan gebruikt worden als grondstof voor producten. Daarnaast is het rubber granulaat dat afkomstig is uit dit proces ook de input voor andere recycleprocessen zoals cryogeen granuleren, devulkanisatie en pyrolyse.

Voor het granulaat dat niet verder bewerkt wordt is instrooirubber op kunstgrasvelden de belangrijkste toepassing. Daarnaast kan het granulaat verlijmd en geperst worden tot koe-matrassen, stalmatten, veiligheidstegels op speelplaatsen en retentiematten/panelen voor groene daken. De toepassing als onderlaagconstructie voor demping in kunstgrassportvelden is op dit moment 15% en groeit.

Een andere toepassing van het rubbergranulaat is het verwerken in asfalt. Er zijn twee processen te onderscheiden, te weten: het droge proces (rubbergranulaat wordt direct toevoegd aan het asfalt mengsel) en het natte proces (eerst voormengen op hoge temperatuur met bitumen). Het laatste lijkt wereldwijd het meest toegepast. Dit kan technisch goed, maar is in Nederland tot op heden enkel toegepast in regionale wegen en fietspaden. In onder andere de Verenigde Staten, Spanje en Zweden is de laatste jaren meer rubbergranulaat toegepast in asfaltwegen, waarmee veel ervaring opgedaan is. In Spanje bijvoorbeeld, is circa 1600 km aan wegen aangelegd met asfaltrubber, zowel regionale- als snelwegen [4]. Er is veel aandacht voor asfaltrubber en wordt veel onderzoek gedaan naar de eigenschappen en optimalisatie van asfaltrubber, zoals bijvoorbeeld in het recent gepubliceerde proefschrift van Haopeng Wang [5].

Voor de toepassing van rubbergranulaat als instrooirubber voor kunstgrasvelden is discussie over de veiligheid en emissies van substanties (bijv. zink) en het granulaat zelf. Binnenkort verschijnt er een advies van ECHA over de verspreiding van microplastics (waaronder bandengranulaat dat als instrooi materiaal op kunstgrasvelden gebruikt wordt) [6]. Op dit advies wordt in deze studie niet verder ingegaan. Tevens worden de emissies van substanties uit het granulaat alsmede de emissies van het granulaat zelf, niet beoordeeld in deze studie.

Instrooi materiaal uit oude kunstgrasvelden wordt verwerkt door GBN in een recent geplaatste installatie. De ervaring na 100 velden met SBR is dat meer dan 99% kan worden teruggewonnen door wassen en zeven. Het materiaal heeft eigenschappen vergelijkbaar met die van nieuw granulaat en vindt onder andere afzet in de aanleg van nieuw kunstgrasvelden. Bij onvoldoende marktvraag kan het instrooi materiaal ook gebruikt worden voor andere secundaire toepassingen.

Cryogene verwerking

Het granulaat dat verkregen wordt in het bovenstaand beschreven mechanische recycleproces kan verder verkleind worden tot poeder (korrelgrootte < 1 mm). Dit gebeurt door het materiaal te koelen tot het glaspoint met bijvoorbeeld vloeibaar stikstof. Vervolgens kan het materiaal zeer fijn gemalen worden. In Nederland is Kargro Recycling in Nederweert een producent van cryogeen granulaat. Momenteel wordt cryogeen granulaat nog voornamelijk geproduceerd van vrachtwagenbanden.

Cryogeen granulaat wordt toegepast in andere producten dan het grovere ambient granulaat. Het gladde oppervlak van cryogeen granulaat zorgt ervoor dat het niet makkelijk te verlijmen is tot bijvoorbeeld tegels. Daarnaast zijn de kosten voor cryogeen granulaat hoger en zijn toepassingen als instrooi materiaal en tegels vaak niet rendabel. Cryogeen granulaat kan in kleine hoeveelheden (3-5%) toegepast worden in nieuwe banden en in technische producten zoals 'backings' van matten. Fijn materiaal maakt nu 1 tot 3% uit in bepaalde onderdelen / lagen van banden. Continental, Goodyear en Bridgestone willen dit als eerste goedkeuren. Andere fabrikanten zoals Michelin en Pirelli minder snel.

Devulkanisatie

Devulkanisatie maakt het rubber uit oude banden weer geschikt om er nieuwe banden van te maken door zwavelverbindingen in het materiaal te verbreken. Hierbij dient onderscheid gemaakt te worden tussen devulkanisatie en reclaiming, waarbij in de laatste ook de rubber polymeren gedeeltelijk afgebroken worden, waardoor de kwaliteit minder is. Reclaiming van rubber uit banden is een bewezen techniek voor binnenbanden en vrachtwagenbanden (waar meer natuurrubber en geen silica inzit). Dit wordt dan ook gedaan en is een goed lopende activiteit bij Rubber Resources B.V. (ELGI groep) in Maastricht. Dit betreft binnenbanden die worden geïmporteerd van buiten de EU en uit Oost-Europa en loopvlakken van vrachtwagenbanden.

Tot op heden zijn er geen voorbeelden van het devulkaniseren van personenwagenbanden op industriële schaal. De verschillende (pilot) installaties voor devulkanisatie van banden, onder andere van Rerun en Tyromer, richten zich tot op heden uitsluitend op het verwerken van vrachtwagenbanden. Devulkanisatie van personenwagenbanden is onderzocht door de Universiteit Twente in een succesvol promotieonderzoek van Sitisaiyidah Saiwari [7]. In een vervolg op deze studie werkt Hans van Hoek in een promotieonderzoek aan de praktische toepasbaarheid en het verder door ontwikkelen van deze technologie.

Pyrolyse

Pyrolyse is het verhitten van granulaat uit banden, waar het staal en textiel al uit verwijderd is, in de afwezigheid van zuurstof. Het resultaat is carbon black en pyrolyseolie die chemisch kan worden gerecycled. Het is tijdelijk toegestaan om deze olie te verbranden mits wordt voldaan aan het einde-afval criterium. Het in de pyrolyseolie aanwezige benzeen kan een probleem vormen in bepaalde toepassingen, maar kan eruit gehaald worden en apart vermarkt.

Black Bear Carbon startte met een pilot installatie die in 2016 afgebrand en nog niet weer opgestart is. Met een nieuwe fabriek op Chemelot Industrial Park hoopt Black Bear Carbon vanaf 2022 de productie weer te hervatten. De geplande installatie zal carbon black, pyrolyseolie en gas produceren, waarbij de laatste gebruikt zal worden voor de productie van elektriciteit en warmte.

Het Rotterdamse Plant One, het bedrijf dat ook achter de Ioniga PET-recycling voor Coca-Cola zit, is recent in een consortium met onder andere Reedijk Used Tyres en Carbon One begonnen met een pyrolyse pilot. De output van het pyrolyseproces is zwavelvrije olie (scheepsbrandstof), gas (verwarmen van bedrijfsprocessen) en carbon black.

Verda lijkt ver te zijn met vergunningen voor de bouw van een pyrolyse-installatie voor banden in Delfzijl. Deze installatie zet ook in op het winnen van carbon black (vermoedelijk, wordt beschreven als gerecycled chemisch product) en brandstoffen welke onderverdeeld kunnen worden in een lichte en zware fracties [8].

Black Cycle is een Horizon 2020 project waar onder andere Michelin bij betrokken is. Binnen dit project wordt een op pyrolyse gebaseerde techniek ontwikkeld. Op dit moment is er nog weinig bekend over dit project.

Vooralsnog is pyrolyse van banden, ondanks initiatieven die al lang lopen en van redelijke omvang zijn, niet veel verder dan pilot installaties (de producten zijn nog niet op de markt gebracht). Verder is het de vraag hoe hoog de kwaliteit is van het geproduceerde carbon black. Het is overigens niet uitgesloten dat carbon black van voldoende kwaliteit uit personenwagenbanden gewonnen kan worden voor toepassingen in nieuwe banden [9].

Loopvlakvernieuwing

Ondanks dat uit een eerste inventarisatie blijkt dat loopvlakvernieuwing naar verwachting het beste scoort vanuit milieuoogpunt, gebeurt dit voor personenwagenbanden nauwelijks (naar schatting 1% à 3%). Enerzijds door de kosten, het vernieuwen van het loopvlak is mogelijk duurder dan de productie van een nieuwe band in bijvoorbeeld China. Anderzijds zijn nieuwe banden er nu ook niet op ontworpen om vernieuwd te worden.

Voor vrachtwagenbanden is loopvlakvernieuwing wel veel toegepast. Dit komt onder andere doordat vrachtwagenbanden steviger zijn en daarom langer gebruikt kunnen worden. Daarnaast zijn vrachtwagenbanden duurder, wat het vernieuwen van loopvlakken concurrerend maakt.



Op ca. 7 locaties in Nederland worden vooral vrachtautobanden en andere zware banden voorzien van een nieuw loopvlak. Ze vinden veelal een toepassing in trailers. Goodyear heeft in Tilburg een vliegtuigbandenfabriek voor loopvlakvernieuwing.

In de loop van 2021 start er een loopvlakvernieuwing initiatief van Tyromer, dat in Noord-Amerika 2 fabrieken heeft (Retread Tires in US en Canada).

Verbranding met energierterugwinning

Een klein gedeelte van de in Nederland ingezamelde banden wordt verbrand met energierterugwinning. Inzet van banden als brandstof in cementovens vindt met name in Duitsland plaats. Ook worden banden toegevoegd aan vlamboogovens bij staalproductie als koolstofbron.

Gecombineerde vormen van verwerking

In deze mLCA zijn geen combinaties van verwerkingstechnieken onderzocht, terwijl dit wel mogelijk zou kunnen zijn. De producten die na mechanische recycling in de tweede of derde cyclus niet weer in een zelfde toepassing gebruikt worden zijn mogelijk nog geschikt voor bijvoorbeeld pyrolyse. Aangezien pyrolyse nog niet op praktijkschaal beschikbaar is gebeurt dit nog niet. Tevens is onbekend of het materiaal door bijvoorbeeld vervuiling nog geschikt is voor een dergelijk proces.

Daarbij is de levensduur van secundaire producten zoals tegels, loopmatten en retentiepanelen (voor groene daken) erg lang (25 tot 100 jaar) en worden deze producten nog nauwelijks aangeboden voor recycling. Het is daarom moeilijk om een inschatting te maken van een toekomstige verwerking. De recyclingsector ziet de mechanische toepassingen als een goed eerste alternatief en verwacht dat de verwerking van secundaire producten een hybride vorm zal krijgen. Bij voldoende kwaliteit is dan nogmaals mechanisch verwerken een optie en anders chemisch recyclen het alternatief.

2.4. Conclusie marktanalyse

Op basis van bovenstaande analyse is het overzicht in Tabel 3 gemaakt, waarin per methode vermeld is hoe ver deze techniek is voor zowel personenwagen- als vrachtwagenbanden. De voornaamste verschillen worden gevonden in loopvlakvernieuwing en devulkanisatie, waarvoor vrachtwagenbanden in beide gevallen beter geschikt zijn.

Tabel 3 Verwerkingsproces autobanden, toepassing product daaruit en score 'potentie / goed mogelijk'

Verwerkingsproces	LCA	Toepassing product	Personenwagen	Vrachtwagen
Loopvlakvernieuwing	-	Beperkt voor personenwagenbanden Gangbaar voor vrachtwagenbanden	-	++
1. Mechanische recycling - rubbergranulaat	1a. 1b.	- instrooirubber op kunstgrasveld - tegels en stalmatten	++	++
- rubbergranulaat	1c.	- in asfaltrubber	+	+
2. Cryogene verwerking - rubbergranulaat	2	- in autoband (enkele %) - backings (onderzijde) van matten	-/+	+
3. Devulkanisatie - rubber	3	- grondstof (o.a. autobanden)	-/+	+
4. Pyrolyse - carbon black - pyrolyseolie	4a. 4b.	- grondstof (o.a. autobanden) - grondstof/ brandstof	-/+	-/+
Verbranden	-	Niet beoordeeld	-	-

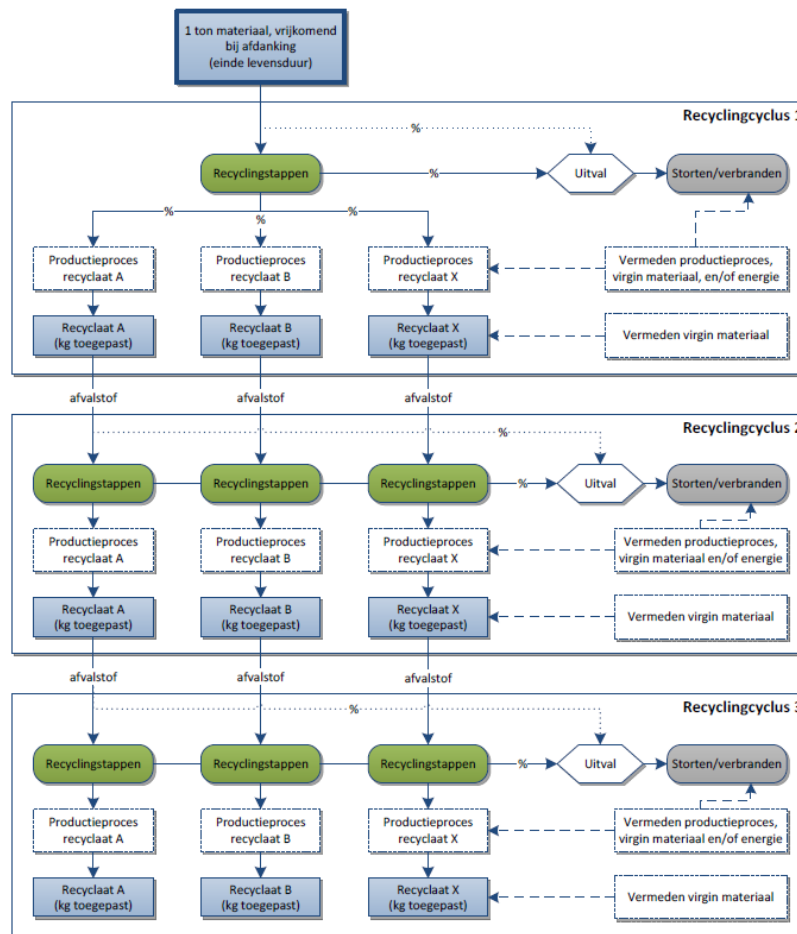
Op basis van de bovenstaande informatie is er voor gekozen om de in Tabel 4 gepresenteerde verwerkingsalternatieven voor personenwagenbanden als onderwerp van de mLCA te gebruiken. In de tabel is samengevat welke initiatieven er zijn en welke producten gemaakt worden door welke bedrijven.

Tabel 4 Overzicht van initiatieven voor uitwerking in de mLCA en mogelijkheden voor dataverzameling

Proces	Toepassing	Praktijkvoorbeelden en mogelijkheden voor dataverzameling
Granuleren (ambient)	1a. Instrooirubber	Verschillende bedrijven produceren granulaat. Dit kan vaak direct toegepast worden als instrooi materiaal.
	1b. Geperst product	Tegels en stalmatten worden o.a.. door Granuflex gemaakt (Granuband). Daarnaast ook zijn er ook de Cow-house (stalmatten) en Ceyes retentiepanelen.
	1c. Asfaltrubber	Als toevoeging in gemodificeerde bitumen (Genan), maar ook fijn granulaat dat in de asfalt-molen toegevoegd wordt. Geen praktijkvoorbeelden.
Granuleren (cryogeen)	2a. Autobanden 2b. Technische producten	Veel toegepast, in Nederland door Kargro Recycling in Nederweert.
Devulkanisatie	3. Autobanden	Universiteit Twente op lab-schaal, onderzoek naar doorontwikkeling op pilot-schaal. Nu in handen van het MOOIER consortium.
		Granuband/ Rerun in Amsterdam en Tyromer pilot-plant in Arnhem, nog niet operationeel, voorlopig alleen vrachtwagenbanden.
		Rubber Resources B.V. (ELGI groep) in Maastricht, momenteel voornamelijk binnenbanden en vrachtwagenbanden.
Pyrolyse	4a. Carbon black 4b. Brandstof	Black Bear Carbon (toen in samenwerking met Kargro) pilot-schaal installatie in Nederweert, door brand gestopt. Doorstart op het Chemelot Industrial Park
		PyroOne, initiatief van Plant One (bekend van Ioniqa). Start met pilot in Rotterdam, nog niet operationeel.
		Black Cycle, met o.a. Michelin (horizon 2020), combinatie van pyrolyse en devulkanisatie.

3. LEVENSCYCLUSINVENTARISATIE

De vier op basis van de marktanalyse geselecteerde verwerkingsmethodes worden geanalyseerd in de multicyclus LCA (mLCA) volgens de LAP Annex F9. De mLCA geeft de levenscyclus van een materiaal over drie opeenvolgende toepassingen zoals weergegeven in Figuur 3. Voor de verschillende toepassingen wordt geen rekening gehouden met levensduur van deze producten.



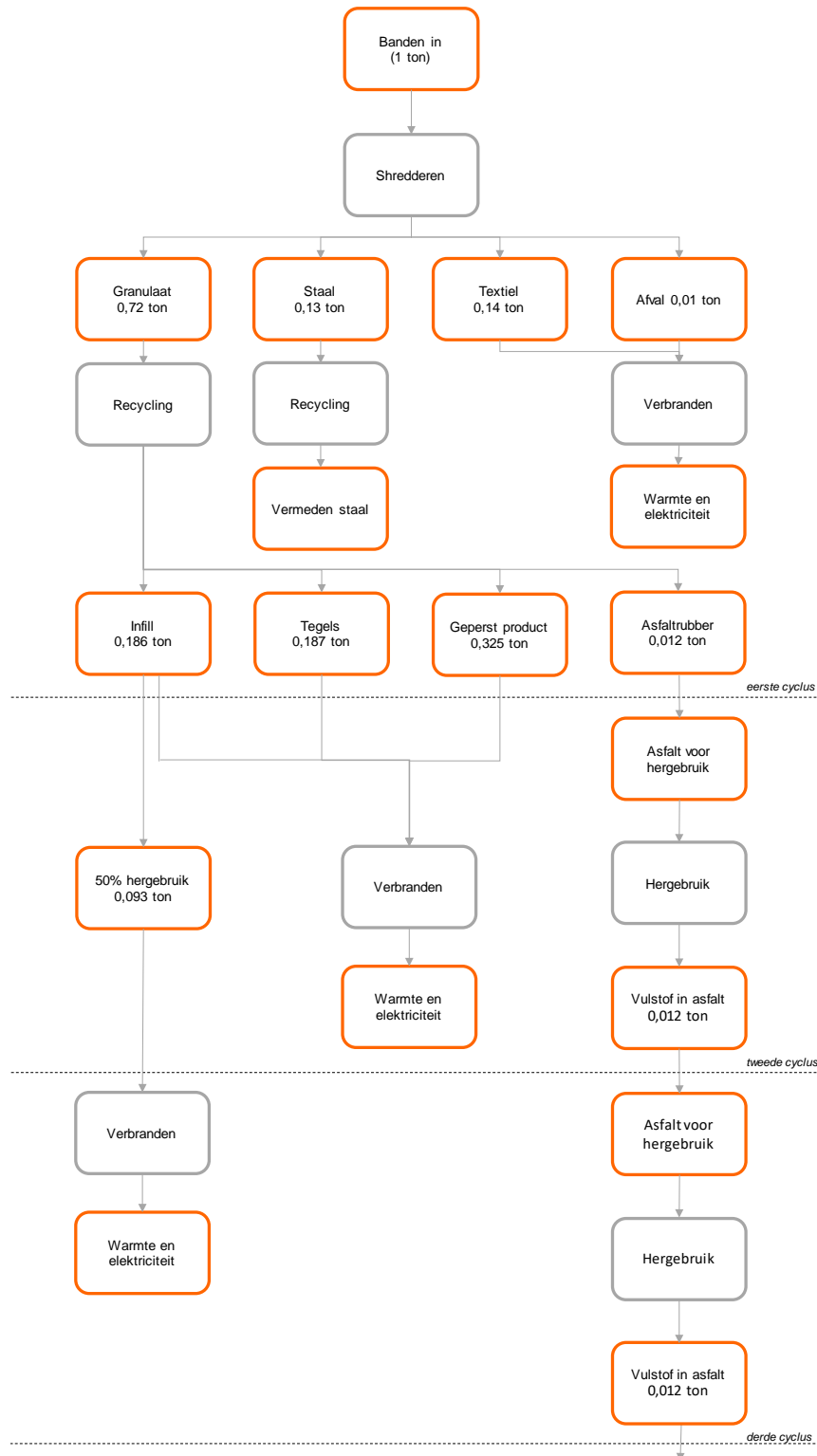
Figuur 3 (Figuur 9 uit LAP Bijlage F9) met weergave van modellering van meer cycli op hoofdlijnen

De LCA is uitgevoerd in overeenstemming met Appendix F.9 van LAP3 "Appendix 9; LCA's uitvoeren i.r.t. de LAP " [10]. Overige uitgangspunten zijn:

- Ecoinvent 3.6, system model recycled content [11], is gebruikt voor de inventarisatie van deze mLCA. De karakterisatie en weging zijn volgens ReCiPe 2016 [12]. De mLCA-resultaten worden altijd uitgedrukt in ReCiPe 2016-punten.
- Voor de basisscenario's worden lange-termijnemissies (> 100 jaar) uitgesloten in de inventarisatie.
- Alle scenario's zijn doorgerekend voor 1 ton materiaal (banden) dat ter verwerking wordt aangeboden.
- Transportafstanden en -middelen zijn gebaseerd op gemiddelden, tenzij meer specifieke informatie kan worden verantwoord.
- Vermeden energieproductie als gevolg van opgewekte energie in een afvalverbrandingsinstallatie is gebaseerd op een calorische onderwaarde (LHV) van het betreffende materiaal en een rendement van 16% elektrisch en 19% thermisch [13], gemodelleerd met de volgende processen:
 - Vermeden elektriciteit: Elektriciteit, hoogspanning {NL} | productiemix | Cut-off, U;
 - Vermeden warmte: Warmte, stads- of industrieel, aardgas {Europa zonder Zwitserland} | warmteproductie, aardgas, in industriële oven > 100kW | Cut-off, U

3.1. Granulaat ambient

Figuur 4 laat de levenscyclus van rubbergranulaat zien, aannames en onderbouwing voor dit scenario worden beschreven in dit onderdeel. De samenstelling van de banden is bepalend voor de output van het shredderproces. Deze samenstelling kan echter variëren. Er is hier uitgegaan van de massabalans zoals verkregen via Ffact [14], zie ook paragraaf 3.1.1.



Figuur 4 Levenscyclus rubbergranulaat (ambient)

3.1.1. Procesdata

Het granuleren van banden is een volledig mechanisch proces. De inventarisatie van procesgegevens is daardoor beperkt tot het elektriciteitsverbruik. Deze data zijn afkomstig van vier grote bandenrecyclers, te weten: Estado (DE), RRO, Genan (DE) en Granuband, welke samen verantwoordelijk zijn voor het merendeel van de rubbergranulaatproductie in Nederland. Kapitaalgoederen voor het shredderproces zijn buiten beschouwing gelaten. Ook de slijtage van messen in een dergelijke installatie is niet opgenomen. Aangenomen is dat de milieu-impact ten gevolgen van kapitaalgoederen en het vervanging van onderdelen minimaal is.

Het proces bestaat uit het verschillende stappen waarin de banden steeds fijner vermalen worden. Tussen deze stappen door wordt, afhankelijk van de gradering die bereikt is, ook staal en textiel verwijderd door middel van respectievelijk mageneten en trilzeven. Het totale energieverbruik voor alle stappen in het proces is 260 kWh per ton verwerkte banden. Dit elektriciteitsverbruik is gemodelleerd met een marktgemiddelde elektriciteitsmix voor Nederland uit ecoinvent.

Het proces heeft, zoals ook opgenomen in Tabel 6, vier uitgaande stromen: granulaat, textiel, staal en afval. Het staal en granulaat worden ingezet voor nieuwe toepassingen.

Aangenomen is dat het afval geen functie heeft en verbrand wordt. Dit is gemodelleerd met het proces voor het verbranden van rubber. Naast het afval wordt ook het textiel verbrand, momenteel lijken hier geen nuttige toepassingen voor te zijn. Het textiel in banden bestaat doorgaans uit nylon, polyester en/of rayon. In welke verhouding deze materialen toegepast worden is niet te achterhalen en kan verschillen per type band. Daarnaast zijn er in ecoinvent geen specifieke verbrandingsprocessen voor deze materialen. Het verbranden van textiel is daarom gemodelleerd met een generiek proces voor gemixte kunststoffen, rekening houdend met vermeden energieproductie.

Het staal zal als staalschroot ingezameld worden en verwerkt tot nieuw staal. Dit is gemodelleerd volgens bijlage A2.6 van het World Steel LCI methodology report uit 2017 [15] met processen uit ecoinvent. Per ton verwerkte autobanden komt 130 kg staalschroot beschikbaar voor recycling.

Voor de toepassingen van rubbergranulaat is uitgegaan van de data zoals opgenomen in Tabel 5. De hoeveelheden zijn weergegeven per ton verwerkte banden. De invloed van deze verdeling is onderdeel van de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4.

Tabel 5 Toepassingen van verschillende graderingen rubbergranulaat

Outputs granuleerproces	instroommateriaal	Tegels	Producten (geperst)	Asfaltrubber
Granulaat 0-1 mm (super fijn)	-	-	28 kg	12 kg
Granulaat 1-2 mm (fijn)	186 kg	62 kg	62 kg	-
Granulaat 2-4 mm (middel)	-	125 kg	125 kg	-
Granulaat 4-8 mm (grof)	-	-	110 kg	-
Totaal	186 kg	187 kg	325 kg	12 kg

Voor de bovenstaande producten van rubbergranulaat zijn nog bewerkingen nodig. Er is veel gelijkenis in de processen voor de productie van tegels van granulaat en de overige geperste producten als retentiematten, stalmatten en demplagen in kunstgrasvelden. Daarom zijn voor het opwerken van beide productgroepen dezelfde aannames gebruikt. De data waarop deze aannames gebaseerd zijn, zijn verkregen via FFact / Ecotest banden [14]. Voor het granulaat dat ingezet wordt als instroommateriaal zijn geen extra processen gerekend, dit materiaal kan direct ingezet worden. In Tabel 6 is weergegeven welke processen gebruikt zijn om de verschillende bewerkingen te modeleren.

Tabel 6 Verwerkingsprocessen Granulaat (ambient)

Proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Granuleren, per ton banden	260 kWh	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	Uitsluitend elektriciteitsverbruik [14]. (Kapitaalgoederen buiten beschouwing.)
Geperste producten, per ton product	0,1 ton	Polyurethane, flexible foam {RER} market for polyurethane, flexible foam Cut-off, U	Polyurethaan binder, 10% van gewicht eindproduct. Generiek proces voor de

Proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
	110 kWh	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	productie van polyurethaan. Alleen voor tegels en geperst product. Markt mix voor elektriciteit in Nederland. 0,11 kWh per kg eindproduct. Alleen voor tegels en geperst product.
Asfalt rubber, per ton product	0,045 ton	Chemical, organic {GLO} market for Cut-off, U	Vesteneramer, additief van Polyoctenamer, voor rubbergranulaat dat in asfalt wordt toegepast. Toevoeging van dit additief is 4,5%.
Verbranding textiel, per ton product	1 ton	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van gemengde kunststoffen.
Verbranding rubber, per ton product	1 ton	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van rubber.
Verbranden tegels en geperst materiaal, per ton product	0,9 ton	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, U	Gecombineerd proces voor het verbranden van rubber PU mengsel in geperste producten en tegels.
	0,1 ton	Waste polyurethane {RoW} treatment of, municipal incineration Cut-off, U	

3.1.2. Vermeden producten

Vervolgens wordt er voor de uitgaande producten vermeden producten gerekend. In Tabel 7 is per uitgaande stroom vermeld wat als vermeden product gerekend is, hoe dit gemodelleerd is en wat de achtergronden zijn van deze keuzes.

Tabel 7 Vermeden producten Granulaat (ambient)

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Instroommateriaal, per ton geleverd materiaal	-0,35 ton	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U	Wanneer er geen (gerecycled SBR) toegepast wordt, zijn de alternatieven EPDM of TPE waaraan calciumcarbonaat toegevoegd wordt. 65% is gemodelleerd als calciumcarbonaat en de overige materialen zijn allen gemodelleerd als synthetisch rubber [16].
	-0,65 ton	Limestone, crushed, washed {CH} production Cut-off, U	
Tegels, per ton geleverd materiaal	-1 ton	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U	Vervangt één op één rubber [14].
Geperste producten, per ton geleverd materiaal	-0,6 ton	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U	Vervangt gedeeltelijk rubber, maar ook andere polymeren. Hier zijn verschillende mogelijkheden. Het scenario zoals aangeleverd door Ffact is hier gehanteerd [14]. De invloed van deze vermeden producten is beschreven in paragraaf 4.4.
	-0,1 ton	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RER} production Cut-off, U	
	-0,2 ton	Polyethylene, high density, granulate {RER} production Cut-off, U	
Asfaltrubber, per ton geleverd materiaal	-0,1 ton	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, U	Rubbergranulaat toegepast in gemodificeerde bitumen voor asfalt. Op basis van gegevens van Genan [16] heeft een bitumen met 10% rubbergranulaat uit banden vergelijkbare eigenschappen als een 4% SBS gemodificeerde bitumen. Aangenomen is dat het aandeel rubbergranulaat dat geen SBS vervangt wel bindende eigenschappen heeft en daarmee bitumen vermindert.
	-0,4 ton	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U	
	-0,6 ton	Bitumen adhesive compound, hot {RER} production Cut-off, U	
Asfaltrubber, per ton geleverd materiaal,	-1 ton	Bitumen adhesive compound, hot {RER} production Cut-off, U	Op basis van de PCR Asfalt [17] is aangenomen dat de modificatie met rubbergranulaat bij recyclen van asfalt

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
tweede en derde cyclus			geen meerwaarde meer heeft en daarmee niet opnieuw SBS vervangt. Daarbij wordt wel verondersteld dat het rubber nog wel bindende eigenschappen heeft en daarmee bitumen uitspaart.
Vermeden staal, per ton geleverd materiaal	-0,174 ton -0,946 ton 0,174 ton 0,946 ton	Steel, unalloyed {RER} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, unalloyed {RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RER} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	Gemodelleerd volgens bijlage A2.6 van het World Steel LCI methodology report uit 2017 [5] met processen uit ecoinvent. Legeringselementen en coating (zinc, koper, tin) zijn buitenbeschouwing gelaten.
Verbrandings-energie, per MJ LHV.	-1 MJ	16% - Electricity, high voltage {NL} production mix Cut-off, U 19% - Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U	Voor het textiel is gerekend met een verbrandingswaarde van gemixte plastics 30,8 MJ /kg en van rubber (en rubber producten) 27,2 MJ/ kg beide obv. gegevens uit ecoinvent proces voor verbranding van het betreffende materiaal. Rendement is AVI in Nederland is 19% elektrisch en 20% warmte [13].

3.1.3. Massabalans

Tabel 8 laat de massabalans zien van de eerste cyclus van het mechanische (ambient) granuleerproces. De verdeling van outputs is overgenomen uit data van Ffact [14].

Tabel 8 Massabalans eerste cyclus Granulaat (ambient)

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	1 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 6.	Systeem begint na inzameling.
Verbranden textiel	0,14 ton		Verbranden textiel. Zie processen Tabel 6.	14% textiel
Verbranden rubberafval	0,01 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 6.	1% afval (rubber is aangenomen)
Rubber voor tegels	0,19 ton		Geperste producten, per ton product. Zie processen Tabel 6.	PU 10% en elektriciteit voor geperst product en tegels.
Rubber voor geperst product	0,33 ton		Geperste producten, per ton product. Zie processen Tabel 6.	PU 10% en elektriciteit voor geperst product en tegels.
Rubber voor asfalt	0,01 ton		Asfalt rubber, per ton product. Zie processen Tabel 6.	Vestamer voor asfalt toepassing, 4,5%.
Rubber voor instrooi materiaal		0,19 ton	Instrooi materiaal, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 7.	Rubber toegepast als instrooi materiaal.
Rubber toegepast in tegels		0,19 ton	Tegels, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 7.	Aangenomen dat alleen het rubbergranulaat materiaal vervangt, de PU is hier buiten beschouwing gelaten.
Rubber toegepast in geperst product		0,33 ton	Geperst product, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 7.	Aangenomen dat alleen het rubbergranulaat materiaal vervangt, de PU is hier buiten beschouwing gelaten.
Rubber toegepast in asfalt		0,01 ton	Asfaltrubber, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 7.	Aangenomen dat alleen het rubbergranulaat materiaal vervangt, het additief is hier buiten beschouwing gelaten.
Staal		0,13 ton	Staal, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 7.	-



Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Textiel		0,14 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie processen Tabel 6.	Samenstelling van het textiel is niet bekend, gemodelleerd met een generiek proces voor gemixte plastics. LHV is 30,78 MJ/kg.
Afval		0,01 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie processen Tabel 6.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.

In de tweede cyclus worden de producten uit de eerste cyclus opnieuw ingezameld en wanneer mogelijk en haalbaar, opnieuw gerecycled. Aangezien het hier betrekkelijk nieuwe producten betreft die een lange levensduur kunnen hebben zijn er geen of weinig praktijkvoorbeelden van inzameling of recycling.

Instrooi materiaal kan opnieuw toegepast worden als instrooi materiaal. GBN, bijvoorbeeld, maakt gebruikt instrooi materiaal geschikt voor hergebruik door het te wassen en zeven. Het bedrijf Ceyes gebruikt instrooi materiaal van bandengranulaat voor de productie retentiematten. De omvang van deze opties is afhankelijk van de markt vraag.

Een gedeelte van het instrooi materiaal zal echter verhard tijdens de gebruiksfase door weersinvloeden, dit heeft invloed op de speltechnische eigenschappen waardoor het niet altijd geschikt is voor toepassing als instrooi materiaal [18]. Volgens opgave van GBN is het gedeelte dat niet hergebruikt kan worden erg klein. Voor de berekeningen wordt aangenomen is dat enkel het instrooi materiaal uit de onderste lagen van het veld hergebruikt kan worden. Op basis hiervan wordt 50% recycling van instrooi materiaal gerekend in de tweede cyclus.

Voor de andere producten van granulaat zijn nog geen praktijkvoorbeelden omdat er nog weinig van deze producten afgedankt worden. Infrastructuur voor inzameling moet nog vorm krijgen en duidelijk moet worden in welke mate dergelijke producten gerecycled zullen worden. Geperste producten kunnen worden vermalen, opnieuw verlijmd en geperst. Er is in het basisscenario echter uitgegaan van een conservatief scenario waarbij het materiaal verloren gaat omdat het niet te beoordelen is of deze materialen gescheiden ingezameld zullen worden en of de kwaliteit van het materiaal voldoende is voor recycling. Omdat het niet uit te sluiten is dat deze producten gerecycled zullen worden is de invloed van deze aanname is opgenomen in de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4.

Rubber dat toegepast wordt in bitumen (als modificatie) voor toepassing in asfalt, wordt met het asfalt gerecycled en opnieuw gebruikt in wegen of funderingen voor wegen. In de rekenregels voor asfalt LCA's [17], is beschreven dat het onbekend is of de modificatie in bitumen meerwaarde heeft in hergebruikt asfalt. Onderzoek naar de meerwaarde van rubbermodificatie in gerecycled asfalt loopt nog [5]. Aangenomen is dat het rubber in de tweede cyclus enkel nog dient als bindmiddel en daarmee bitumen uitspaart. Hierbij wordt conform dezelfde PCR rekening gehouden met 10% verlies in de gebruiksfase en 4% verlies door degradatie.

Tabel 9 de massabalans zien van de tweede cyclus van het mechanische (ambient) granuleerproces.

Tabel 9 Massabalans tweede cyclus Granulaat (ambient)

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Rubber in instrooi materiaal	0,095 ton		Verbranden rubber 50%, per ton product. Zie processen Tabel 6.	Verbranding van materiaal doorgegeven uit vorige cyclus. Systeem begint na inzameling.
Rubber in instrooi materiaal	0,095 ton		Recyclen 50%, geen milieulast gerekend voor het wassen en zeven.	Granulaat wordt soms gewassen, hiervoor is geen data beschikbaar.
Rubber in tegels	0,19 ton		Verbranden tegels en geperst materiaal, per ton product. Zie processen Tabel 6.	Verbranding van materiaal doorgegeven uit vorige cyclus. Systeem begint na inzameling.
Rubber in geperst product	0,33 ton		Verbranden tegels en geperst materiaal, per ton product. Zie processen Tabel 6.	Verbranding van materiaal doorgegeven uit vorige cyclus. Systeem begint na inzameling.
Rubber in asfalt	0,01 ton		-	Recyclen van asfalt, geen milieulast toegerekend aan dit proces.



Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Rubber voor instrooi materiaal		0,095 ton	Instrooi materiaal, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 7.	Rubber toegepast als instrooi materiaal.
Energie uit tegels en geperst product		1572 MJ	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie processen Tabel 7.	51,2 kg PU in geperste producten en tegels * het LHV van PU (30,7 MJ/ kg).
Energie uit tegels, geperst product en instrooi materiaal		16725 MJ	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie processen Tabel 7.	512 kg rubber uit tegels en geperst product + 95 uit instrooi materiaal = 607 * het LHV van rubber (27,2 MJ/ kg).
Rubber uit gerecycled asfalt		0,009 ton	Vulstof in asfalt, per ton geleverd materiaal. Zie processen Tabel 7.	Het is onbekend of de modificatie in bitumen nog meerwaarde heeft in gerecycled asfalt [17]. Aangenomen dat rubber in asfalt nog wel bindende eigenschappen heeft en daarmee bitumen vervangt in de tweede cyclus.

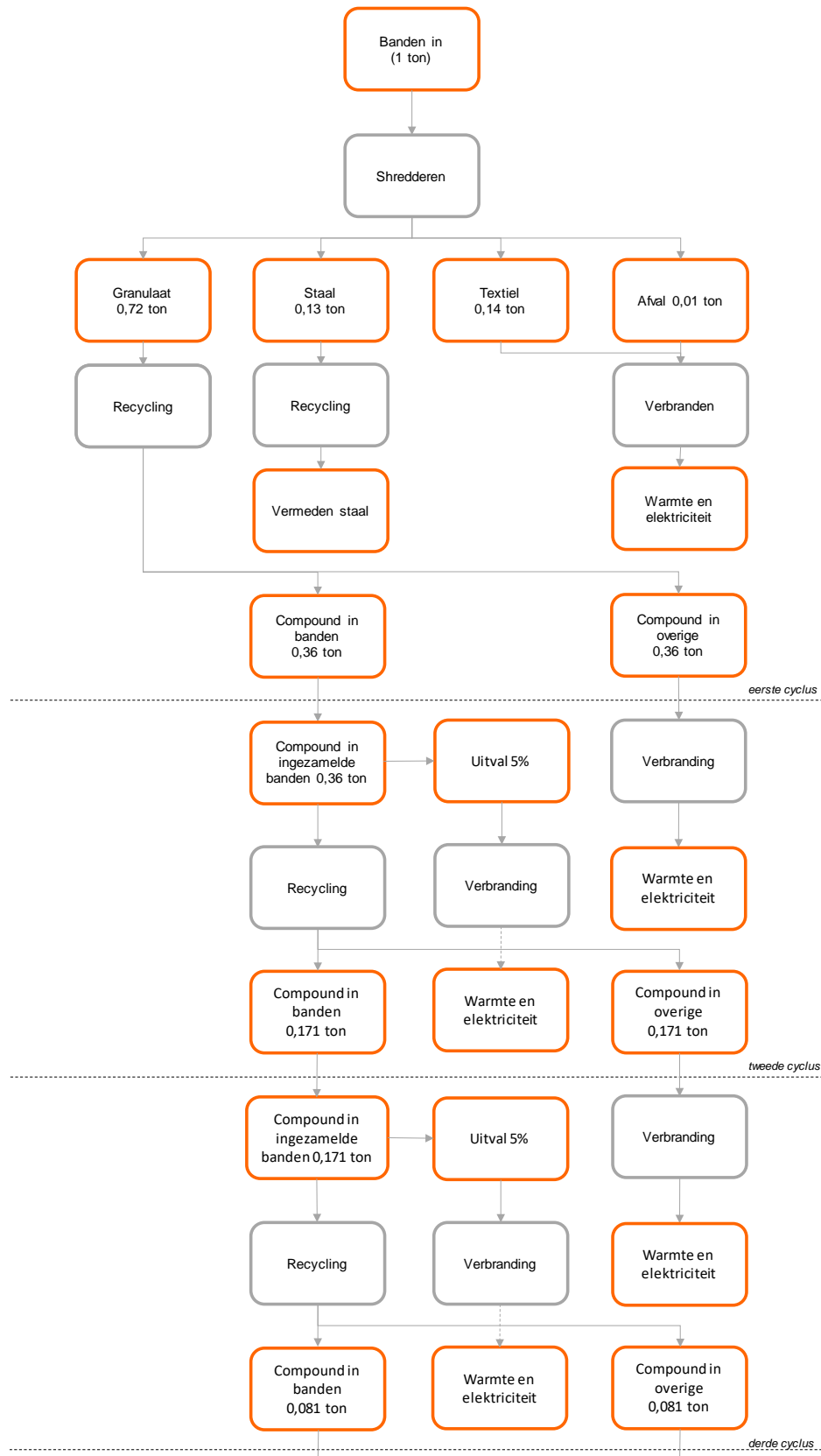
In de derde cyclus is er enkel nog het materiaal dat achterblijft in asfalt en het instrooi materiaal dat gerecycled wordt in de tweede cyclus. Tabel 10 geeft een overzicht van de processen en vermeden producten in de derde cyclus.

Tabel 10 Massabalans derde cyclus Granulaat (ambient)

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Rubber in instrooi materiaal	0,095 ton		Verbranden rubber per ton product. Zie processen Tabel 6.	Verbranding van materiaal doorgegeven uit vorige cyclus. Systeem begint na inzameling.
Rubber in asfalt	0,01 ton		Geen proces	Recyclen van asfalt, geen milieulast toegerekend aan dit proces.
Energie uit instrooi materiaal		2585 MJ	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie processen Tabel 7.	95 kg uit instrooi materiaal * het LHV van rubber (27,2 MJ/ kg).
Rubber uit gerecycled asfalt		0,007 ton	Vulstof in asfalt, per ton geleverd materiaal. Zie processen Tabel 7.	Het is onbekend of de modificatie in bitumen nog meerwaarde heeft in gerecycled asfalt [17]. Aangenomen dat rubber in asfalt nog wel bindende eigenschappen heeft en daarmee bitumen vervangt in de derde cyclus.

3.2. Cryogeen granulaat

Figuur 5 laat de levenscyclus van cryogeen rubbergranulaat zien, aannames en onderbouwing voor dit scenario worden beschreven in dit onderdeel.



Figuur 5 Levenscyclus rubbergranulaat (mechanisch, cryogeen)

3.2.1. Procesdata

De eerste stappen in het proces zijn vergelijkbaar met ambient granulaat. Eerst wordt materiaal grof gemalen tot 'shreds' waar vervolgens het textiel en staal uitgehaald worden. In de volgende stap worden shreds tot onder glaspunt gekoeld, de meest toegepaste methode is met vloeibaar stikstof. Dit zorgt ervoor dat het materiaal gebroken kan worden. Door het granulaat te breken in plaats van snijden of scheuren ontstaat granulaat met een gladder en dichter oppervlak. Tevens kan cryogeen granulaat tot een fijnere korrelgrootte gemalen worden, 80 mesh (180 µm). Daarnaast kan er een meer staal en textiel verwijderd worden uit het kleinere materiaal, wat een geconcentreerdere stroom rubber als resultaat heeft.

Voor het elektriciteitsverbruik voor de eerste granuleerstap is uitgaan van data van ambient granulaat. Dit is aangevuld met data voor het koelen met stikstof en het energieverbruik voor het breken van granulaat tot fijnere graderingen. Dit laatste is overgenomen uit literatuur [19] en werd bevestigd door een producent van cryogeen granulaat [20]. In het onderzoek is uitgegaan van de productie van rubber poeder (<1 mm). In dit proces wordt 1,75 kg stikstof gebruikt voor het koelen van 1 kg rubber (grof) granulaat. Het elektriciteitsverbruik voor het breken van granulaat is overgenomen uit literatuur en is 236 kWh per ton rubbergranulaat [19].

Het cryogeen granulaat kent andere toepassingen dan het ambient granulaat. De fijne gradering maakt de toepassing in compounds mogelijk. Compounds kunnen, al dan niet met toevoeging van additieven, gebruikt worden als vulmiddel in autobanden en 'backings' voor matten.

Op proces-outputs kan meer gestuurd worden, met name de fractie klein materiaal kan aanzienlijk hoger zijn. De fijne poeders worden gebruikt in andere toepassingen dan het ambient granulaat. Het koelen van granulaat zorgt voor aanzienlijk hogere proceskosten, waardoor niet alle toepassingen renderen. Tevens wordt cryogeen granulaat vaker geproduceerd op basis van vrachtwagenbanden, omwille van de samenstelling.

Voor met PU geperste producten is cryogeen granulaat minder geschikt: door het gladde oppervlak is het moeilijk voor materialen om te hechten. Een extra maalstap bij omgevingstemperatuur kan het materiaal ruwer maken, wanneer fijn materiaal gewenst is voor dergelijke toepassingen [21]. Echter, is het onwaarschijnlijk dat dit in praktijk gebeurt, door de hoge kosten van cryogeen granulaat [20].

Er is geen informatie over de verhouding tussen verschillende toepassingen van cryogeen granulaat. De volgende aanname is gedaan: 50% als compound in producten en 50% als vulmiddel in banden. De invloed van deze aannames wordt verder toegelicht in de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4.

De gebruikte processen voor het modelleren van het cryogene recycleproces zijn opgenomen in Tabel 11.

Tabel 11 Verwerkingsprocessen Granulaat (cryogeen)

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Granuleren, per ton banden	260 kWh	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	Uitsluitend elektriciteitsverbruik [14].
Productie rubberpoeder/compound, per ton rubber	1750 kg	Nitrogen, liquid {RER} air separation, cryogenic Cut-off, U	Op basis van [19], 1,75 kg vloeibaar stikstof per kg rubber * 0,72 kg rubber per kg autoband. Elektriciteitsmix in dit proces is aangepast naar Nederlands gemiddelde. Verder wordt de hitte die vrijkomt bij de stikstof productie gebruikt om het granulaat te drogen. Hiervoor worden dus geen extra processen berekend [22].
	236 kWh	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	Markt mix voor elektriciteit in Nederland. 236 kWh per kg rubber [19].
	0,045 ton	Chemical, organic {GLO} market for Cut-off, U	Additief van Polyoctenamer, voor rubbergranulaat dat in asfalt wordt toegepast. Aangenomen dat voor compound in banden een vergelijkbare hoeveelheid gebruikt wordt. Toevoeging ongeveer 4,5% [16].



Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Verbranding textiel, per ton product	1 ton	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van gemengde kunststoffen.
Verbranding additieven, per ton product	1 ton	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van gemengde kunststoffen. Exacte samenstelling van het polymeer is onbekend.
Verbranding rubber, per ton product	1 ton	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van rubber.

3.2.2. Vermeden producten

Voor het cryogene granulaat is uitgegaan van 50% toepassingen als vulmiddel in banden en 50% in technische rubberproducten. Daarnaast zijn er de outputs die in de voorbewerking vrijkomen deze zijn overgenomen uit het ambient granuleerproces. De vermeden producten, referenties en aannames zijn samengevat in Tabel 12.

Tabel 12 vermeden producten Granulaat (cryogeen)

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Compound als vulmiddel in banden, per ton geleverd materiaal	-0,5 kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U Carbon black {GLO} production Cut-off, U	Vervangt gedeeltelijk rubber en carbon black bij de productie van banden. Vermeden product is 50% rubber en 50% carbon black. Hierbij dient vermeld te worden dat in het ecoinvent proces voor synthetisch rubber ook al een gedeelte carbon black opgenomen is.
	-0,5 kg		
Compound in producten, per ton geleverd materiaal	-1 kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U	Vervangt rubber in verschillende toepassingen, o.a. backings in matten.
Vermeden staal, per ton geleverd materiaal	-0,174 ton	Steel, unalloyed {RER} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, unalloyed {RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RER} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	Gemodelleerd volgens bijlage A2.6 van het World Steel LCI methodology report uit 2017 [5] met processen uit ecoinvent. Legeringselementen en coating (zinc, koper, tin) zijn buiten beschouwing gelaten.
	-0,946 ton		
	0,174 ton		
	0,946 ton		
Verbrandings-energie, per MJ LHV.	-1 MJ	16% - Electricity, high voltage {NL} production mix Cut-off, U 19% - Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U	Voor het textiel is een verbrandingswaarde van gemixte plastics is 30,8 MJ/kg en van rubber 27,2 MJ/kg beide obv. gegevens uit ecoinvent proces voor verbranding van het betreffende materiaal. Rendement is AVI in Nederland is 19% elektrisch en 20% warmte [13].

3.2.3. Massabalans

Tabel 13 laat de massabalans zien van de eerste cyclus van het mechanische (cryogeen) granuleerproces.

Tabel 13 Massabalans eerste cyclus Granulaat (cryogeen)

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	1 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 11.	Systeem begint na inzameling
Verbranden textiel	0,14 ton		Verbranden textiel. Zie processen Tabel 11.	-
Verbranden rubberafval	0,01 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber voor banden	0,36 ton		Productie rubberpoeder/compound, per ton rubber. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber voor producten	0,36 ton		Productie rubberpoeder/compound, per ton rubber. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber toegepast in banden		0,36 ton	Compound als vulmiddel in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 12.	Aangenomen dat alleen het rubberpoeder materiaal vervangt, het additief is hier buiten beschouwing gelaten.
Rubber toegepast in producten		0,36 ton	Compound in producten, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 12.	Aangenomen dat alleen het rubberpoeder materiaal vervangt, het additief is hier buiten beschouwing gelaten.
Staal		0,13 ton	Staal, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 12.	-
Textiel		0,14 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV, Zie vermeden producten Tabel 12.	Samenstelling van het textiel is niet bekend, gemodelleerd met een generiek proces voor gemixte plastics. LHV is 30,78 MJ/kg.
Afval		0,01 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 12.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.

In de tweede en derde cyclus wordt enkel het rubber gevolgd. Voor het rubber dat toegepast is in producten, is aangenomen dat dit gemengd of verlijmd is, zoals bijvoorbeeld bij 'backings' van matten. Omdat dit niet eenvoudig gescheiden kan worden, wordt er vanuit gegaan dat dergelijke producten verbrand worden in de eindeleven fase.

Voor het materiaal dat verwerkt wordt in banden is aangenomen dat er 5% verlies optreedt in het granuleerproces door het afscheiden van de textielfractie, waar een gedeelte rubber in achterblijft.

Tabel 14 Massabalans tweede cyclus Granulaat (cryogeen)

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren rubber uit banden	0,36 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 11.	Systeem begint na inzameling
Verwerken uitval granuleren	0,018 ton		Verbranding rubber, per ton product. Zie processen Tabel 11.	5% uitval aangenomen voor granuleer proces.
Verwerken rubber in producten	0,36 ton		Verbranding rubber, per ton product. Zie processen Tabel 11.	-
Verwerken additieven uit rubber in producten	0,016 ton		Verbranding additieven, per ton product. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber voor banden	0,171 ton		Productie rubberpoeder/compound, per ton rubber. Zie processen Tabel 11.	-

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Rubber voor producten	0,171 ton		Productie rubberpoeder/compound, per ton rubber. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber toegepast in banden		0,171 ton	Compound als vulmiddel in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 12.	Aangenomen dat alleen het rubberpoeder materiaal vervangt, het additief is hier buiten beschouwing gelaten.
Rubber toegepast in producten		0,171 ton	Compound in producten, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 12.	Aangenomen dat alleen het rubberpoeder materiaal vervangt, het additief is hier buiten beschouwing gelaten.
Energie uit verbranden uitval		0,018 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 12.	Verbranden uitval granuleer proces. LHV van rubber is 27,2 MJ/kg.
Energie uit rubber en additief in producten		0,36 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 12.	360 kg rubber met een LHV van rubber (27,2 MJ/kg). 16,2 kg additief, dit is een polymeer met onbekende samenstelling, daarom is de verbrandingswaarde van gemengde kunststoffen aangehouden (30,8 MJ/kg).

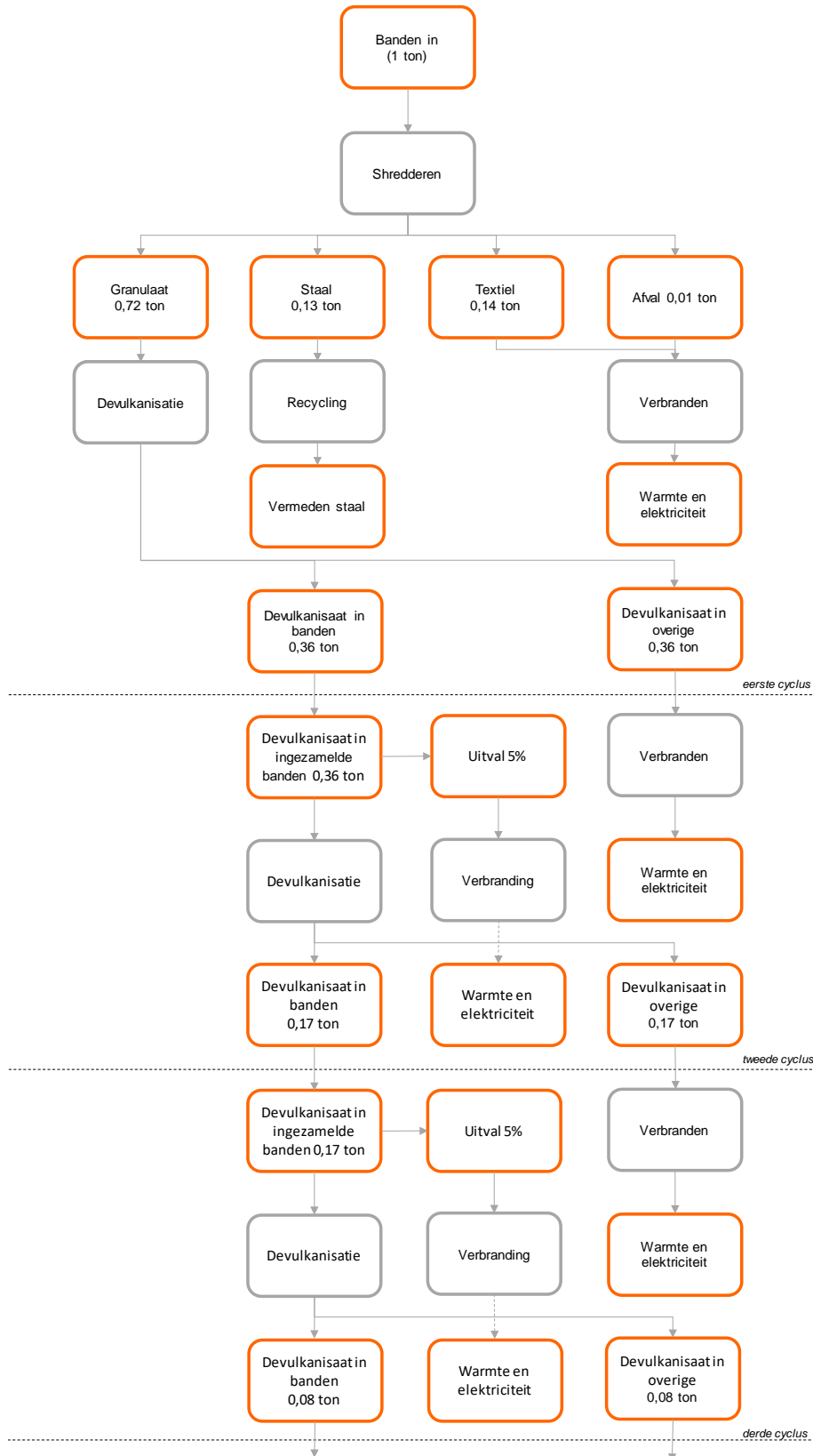
Voor de derde cyclus zijn de zelfde aannames gebruikt als in de tweede cyclus. Een samenvatting is weergegeven in Tabel 15

Tabel 15 Massabalans derde cyclus Granulaat (cryogeen)

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren rubber uit banden	0,171 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 11.	Systeem begint na inzameling
Verwerken uitval granuleren	0,009 ton		Verbranding rubber, per ton product. Zie processen Tabel 11.	5% uitval aangenomen voor granuleer proces.
Verwerken rubber in producten	0,171 ton		Verbranding rubber, per ton product. Zie processen Tabel 11.	-
Verwerken additieven uit rubber in producten	0,008 ton		Verbranding additieven, per ton product. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber voor banden	0,09 ton		Productie rubberpoeder/compound, per ton rubber. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber voor producten	0,09 ton		Productie rubberpoeder/compound, per ton rubber. Zie processen Tabel 11.	-
Rubber toegepast in banden		0,09 ton	Compound als vulmiddel in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 12.	Aangenomen dat alleen het rubberpoeder materiaal vervangt, het additief is hier buiten beschouwing gelaten.
Rubber toegepast in producten		0,09 ton	Compound in producten, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 12.	Aangenomen dat alleen het rubberpoeder materiaal vervangt, het additief is hier buiten beschouwing gelaten.
Energie uit verbranden uitval		0,009 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 12.	Verbranden uitval granuleer proces. LHV van rubber is 27,2 MJ/kg.
Energie uit rubber en additief in producten		0,171 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 12.	171 kg rubber met een LHV van rubber (27,2 MJ/kg). 7,7 kg additief, dit is een polymeer met onbekende samenstelling, daarom is de verbrandingswaarde van gemengde kunststoffen aangehouden (30,8 MJ/kg).

3.3. Devulkaanisatie

Een stroomschema van de levenscycli van gedevulkaaniseerd rubber is weergegeven in Figuur 6. Procesgegevens en vermeden producten worden nader toegelicht in dit onderdeel. Gegevens voor devulkaanisatie zijn gebaseerd op in literatuur beschreven processen op labschaal.



Figuur 6 Levenscyclus devulkaanisatie

3.3.1. Procesdata

Het devulkaniseren start, net als de andere verwerkingsprocessen, met het scheiden van materialen en het granuleren van rubber. Hiervoor zijn dezelfde processen en outputs gebruikt als voor het ambient granulaat, welke gebaseerd zijn op gegevens van FFact [14]. Het granulaat dat vrijkomt uit dit proces is vervolgens de input voor het devulkanisatieproces. Tabel 16 laat zien welke referentieprocessen gebruikt zijn voor het modeleren van deze bewerking en het verwerken van de overige materialen, te weten textiel en rubber afval.

Tabel 16 Voorbewerkingen Devulkanisatie

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Granuleren, per ton banden	260 kWh	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	Uitsluitend elektriciteitsverbruik [14].
Verbranding textiel, per ton product	1 ton	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van gemengde kunststoffen.
Verbranding rubber, per ton product	1 ton	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van rubber.

Het devulkanisatieproces is weergegeven in Tabel 17 en gebaseerd op literatuur waarin processen op labschaal beschreven zijn, aangezien er (nog) geen voorbeelden zijn van devulkanisatie van personenwagenbanden op pilot- of industriële schaal. Voor het LCA model is gebruik gemaakt van onderzoek van Saiwari [23] en Van Hoek [24], die verbeteringen voorstelde voor het door Saiwari ontwikkelde proces. Hierbij dient vermeld te worden dat gegevens niet representatief zijn voor personenwagenbanden met veel silica, omdat dit invloed heeft op de eigenschappen van het rubber en bijgevolg de wijze waarop het gedevulkaniseerd kan worden.

In beide onderzoeken is als input voor het proces gebruik gemaakt van granulaat van Genan in Dorsten met korrelgrootte 1 tot 3,5 mm. Aangenomen is, zoals bovenstaand vermeld, dat het standaard granuleerproces van banden zoals opgenomen in het onderdeel granulaat ambient, representatief is voor deze eerste processtap.

Voor het devulkaniseren wordt een extruder gebruikt met twee co-roterende schroeven. De additieven worden verwarmd en gemengd met rubber granulaat, waarna het materiaal in de extruder in gaat. In de extruder wordt het materiaal gemengd, gekneed en verwarmd tot ongeveer 200°C. Om degradatie door oxidatie te voorkomen wordt er stikstofgas toegevoegd in het proces. Het materiaal dat de extruder verlaat is het devulkanisaat, dat toegepast kan worden in nieuwe rubberproducten.

Tabel 17 Devulkanisatieproces, input per ton granulaat input

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Devulkanisatie hulpstof - 2-2'-dibenzamido-diphenylsulfide (DBD)	39,0 kg	2-2'-dibenzamido-diphenylsulfide (DBD). Zie proceskaart in bijlage A [25].	3,9wt% 2-2'-dibenzamido-diphenylsulfide (DBD) geen data beschikbaar in ecoinvent, productieproces gemodelleerd op basis van gegevens uit literatuur [25].
Procesolie - Treated distillate aromatic extract (TDAE)	20,0 kg	Nafta {RER} market for Cut-off, U	2 wt% geen data beschikbaar in ecoinvent. Naptha gebruikt als proxy.
Stabilizator - Tris(2,4-di-tert-butylphenyl)phosphite (TDTBP)	10,0 kg	Tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite {GLO} market for tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite Cut-off, U	1 wt% één op één verwijzing naar ecoinvent proces.
Purging gas - stikstof	1,0 kg	Nitrogen, liquid {RER} air separation, cryogenic Cut-off, U	Hoeveelheid niet te achterhalen en gebaseerd op aannames. Elektriciteit in dit proces is aangepast naar een gemiddelde energiemix voor Nederland.
Elektriciteit – voor verwarmen en extrusie	380,0 kWh	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	Per kg granulaat: 0,04 kWh voor het mengen, 0,18 kWh voor devulkaniseren en 0,16 kWh voor koelen op basis van memo FFact [26].

3.3.2. Vermeden producten

Ondanks dat het nog een uitdaging lijkt om devulkanisaat van een constante kwaliteit te maken, door onder andere het afstemmen van procesparameters op de grote variatie aan verschillende samenstellingen van banden, is het doel van onderzoek, experimenten en pilots een product te creëren dat toegepast kan worden in de productie van nieuwe autobanden. Hierbij dient vermeld te worden dat devulkanisaat bijgemengd zal worden in primair rubber en daarmee 10-25% primaire grondstoffen vervangt. Zoals bij het cryogeen granulaat wordt aangenomen dat 50% van het recyclelaat toepassing vindt in banden en 50% in andere producten (zoals bijvoorbeeld matten en transportbanden). Voor zowel banden als andere producten wordt uitgegaan van vermeden synthetisch rubber voor het toegepaste devulkanisaat. Tabel 18 geeft een overzicht van de vermeden producten weer, alsmede de wijze waarop deze opgenomen zijn in het LCA model.

Tabel 18 vermeden producten Devulkanisatie

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Gedevulkaniseerd rubber voor toepassing in banden, per ton materiaal	-1 kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U	Vervangt tot 25% rubber in nieuwe autobanden.
Gedevulkaniseerd rubber voor toepassing in andere producten, per ton materiaal	-1 kg	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, U	Vervangt primair rubber, hoeveelheid is afhankelijk van de toepassing.
Vermeden staal, per ton geleverd materiaal	-0,174 ton -0,946 ton 0,174 ton 0,946 ton	Steel, unalloyed {RER} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, unalloyed {RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RER} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	Gemodelleerd volgens bijlage A2.6 van het World Steel LCI methodology report uit 2017 [5] met processen uit ecoinvent. Legeringselementen en coating (zinc, koper, tin) zijn buitenbeschouwing gelaten.
Verbrandings-energie, per MJ LHV.	-1 MJ	16% - Electricity, high voltage {NL} production mix Cut-off, U 19% - Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U	Voor het textiel is een verbrandingswaarde van gemixte plastics is 30,8 MJ/kg en van rubber 27,2 MJ/kg beide obv. gegevens uit ecoinvent proces voor verbranding van het betreffende materiaal. Rendement is AVI in Nederland is 19% elektrisch en 20% warmte [13].

3.3.3. Massabalans

Tabel 19 laat de massabalans zien van de eerste cyclus van het devulkanisatieproces.

Tabel 19 Massabalans eerste cyclus Devulkanisatie

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	1 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 16.	Systeem begint na inzameling
Verbranden textiel	0,14 ton		Verbranden textiel. Zie processen Tabel 16.	-
Verbranden rubberafval	0,01 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 16.	-
Devulkanisatie	0,72 ton		Devulkanisatieproces, per ton granulaat. Zie processen in Tabel 17	-
Devulkanisaat toegepast in banden		0,36 ton	Gedevulkaniseerd rubber voor toepassing in banden, per ton materiaal. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat alleen het devulkanisaat materiaal vervangt, het additieven en hulpstoffen zijn hier buiten beschouwing gelaten.
Devulkanisaat toegepast in overige		0,36 ton	Gedevulkaniseerd rubber voor toepassing in overige producten, per ton materiaal.	Aangenomen dat alleen het devulkanisaat materiaal vervangt, het additieven en hulpstoffen zijn hier buiten beschouwing gelaten.



Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
			Zie vermeden producten Tabel 18.	
Staal		0,13 ton	Staal, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 18.	-
Textiel		0,14 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV, Zie vermeden producten Tabel 18.	Samenstelling van het textiel is niet bekend, gemodelleerd met een generiek proces voor gemixte plastics. LHV is 30,78 MJ/kg.
Afval		0,01 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.

In de tweede cyclus is aangenomen dat het in banden toegepaste rubber weer volledig ingezameld zal worden. Het is echter onzeker of dat er bij inzameling, sorteren of granuleren nog sprake is van uitval doordat materiaal niet voldoet aan kwaliteitseisen. Wel zal ten minste een gedeelte rubber uitvallen in het granuleerproces door het afscheiden van de textielfractie, waar een gedeelte rubber in achterblijft. Aangenomen is dat er daardoor 5% verlies optreedt in de tweede cyclus. In paragraaf 4.4 is de gevoeligheid van het percentage uitval beoordeeld.

Bij devulkanisatie dat in andere producten wordt toegepast kan niet, zoals bij banden, aangenomen worden dat deze gescheiden ingezameld worden en wederom aangeboden worden ter recycling. Een conservatieve aanname is gedaan, waarbij dit materiaal verbrand wordt in een afvalverbrandingsinstallatie.

In Tabel 20 zijn de inputs en outputs van het devulkanisatieproces in de tweede cyclus samengevat.

Tabel 20 Massabalans tweede cyclus Devulkanisatie

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	0,360 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 16.	Andere componenten zijn buiten beschouwing gelaten, alleen het gedevulkaniseerde rubber uit de eerste cyclus wordt gevolgd.
Verbranden uitval	0,018 ton		Verbranden rubber afval. Zie processen Tabel 16.	Aangenomen dat niet al het materiaal gedevulkaniseerd kan worden door o.a. uitval bij het granuleren.
Devulkanisatie van banden	0,342 ton		Devulkanisatieproces, per ton granulaat. Zie processen in Tabel 17	-
Verbranden van overige	0,360 ton		Verbranden rubber afval. Zie processen Tabel 16.	Verbranden van overig materiaal
Rubber toegepast in banden		0,342 ton	Gedevulkaniseerd rubber voor toepassing in banden, per ton materiaal. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat alleen het devulkanisatie materiaal vervangt, het additieven en hulpstoffen zijn hier buiten beschouwing gelaten.
Energie uit verbranding van uitval		0,018 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.
Energie uit verbranding overige		0,360 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.

In de derde cyclus zijn dezelfde aannames gehanteerd als in de tweede cyclus. Het overzicht in Tabel 21 laat de inputs en outputs van het proces in de derde cyclus zien.

Tabel 21 Massabalans derde cyclus Devulkanisatie

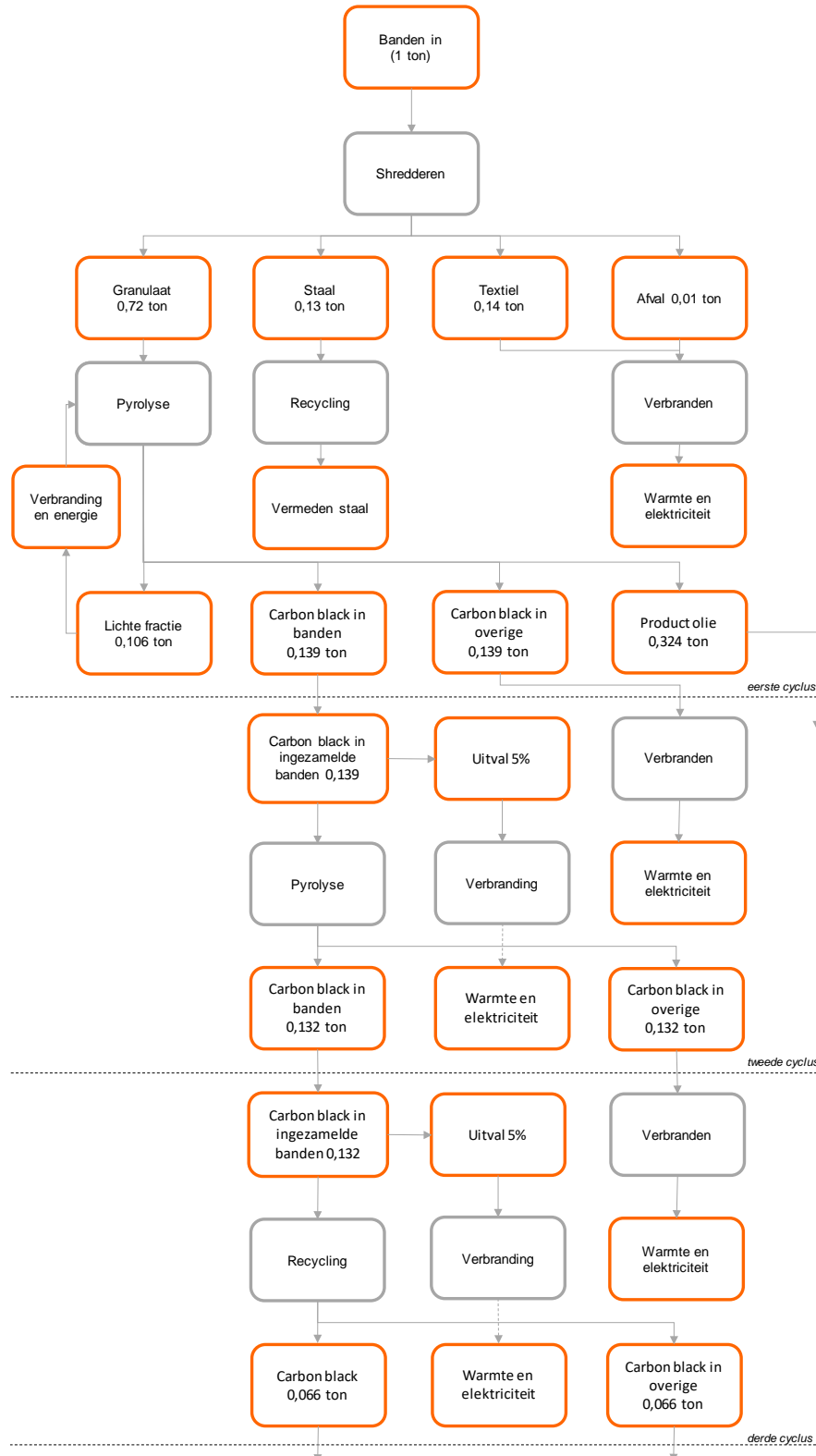
Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	0,171 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 16.	Andere componenten zijn buiten beschouwing gelaten, alleen het gedevulkaniseerde rubber uit de tweede cyclus wordt gevolgd.
Verbranden uitval	0,009 ton		Verbranden rubber afval. Zie processen Tabel 16.	Aangenomen dat niet al het materiaal gedevulkaniseerd kan worden.



Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Devulkanisatie	0,162 ton		Devulkanisatieproces, per ton granulaat. Zie processen in Tabel 17	-
Verbranden van overige	0,171 ton		Verbranden rubber afval. Zie processen Tabel 16.	Verbranden van overig materiaal
Rubber toegepast in banden		0,162 ton	Gedevulkaniseerd rubber voor toepassing in banden, per ton materiaal. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat alleen het devulkanisaat materiaal vervangt, het additieven en hulpstoffen zijn hier buiten beschouwing gelaten.
Energie uit verbranding		0,009 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.
Energie uit verbranding overige		0,171 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 18.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.

3.4. Pyrolyse

In Figuur 7 zijn de outputs van het pyrolyseproces weergegeven en de levenscycli van het geproduceerde carbon black. Bij dit figuur dient vermeld te worden dat in de tweede en derde cyclus alleen het carbon black gevolgd wordt. De productie van pyrolyseolie en -gas zijn in de tweede en derde cyclus buiten beschouwing gelaten. Procesgegevens en vermeden producten worden nader toegelicht in dit onderdeel en zijn gebaseerd op gegevens van een pilotinstallatie.



Figuur 7 Levenscyclus pyrolyse

3.4.1. Procesdata

Procesdata zijn verkregen van Black Bear Carbon (BBC), die eerder succesvol een pilot installatie realiseerde voor pyrolyse van banden en momenteel druk bezig zijn met het opzetten van een verbeterde installatie. BBC liet eerder LCA's uitvoeren [27], welke gebruikt zijn als basis voor de berekeningen in deze mLCA. De gegevens uit deze LCA's zijn gebaseerd op input die voor 90% bestaat uit personenwagenbanden. Voor de verbeterde installatie beoogt BBC om granulaat van vrachtwagenbanden als grondstof te gebruiken.

Vermeld dient te worden dat er nog geen gegevens zijn van operationele processen op industriële schaal en dat de data uit de eerdere BBC LCA wellicht op sommige vlakken een overschatting kan zijn in vergelijking met de installatie die momenteel wordt ontwikkeld

Voor het granuleren van banden en het scheiden van de niet-rubbercomponenten is gebruik gemaakt van de gegevens van FFact [14].

Tabel 22 Voorbewerkingen Pyrolyse

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Granuleren, per ton banden	260 kWh	Electricity, low voltage {NL} market for Cut-off, U	Uitsluitend elektriciteitsverbruik [14].
Verbranding textiel, per ton product	1 ton	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van gemengde kunststoffen.
Verbranding rubber, per ton product	1 ton	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, U	Generiek proces voor het verbranden van rubber.

Het rubbergranulaat wordt elders geproduceerd en per vrachtwagen naar BBC vervoerd. Dit transport is niet opgenomen in de berekening, net als bij de andere processen. Vervolgens wordt dit materiaal in afwezigheid van zuurstof verhit tot hoge temperaturen. Hierdoor breekt het rubber gedeeltelijk af en ontstaan drie fracties, te weten een gas-, vloeibare- en vaste fractie. Vervolgens wordt de vaste fractie (carbon black) gedroogd en vermalen [28]. In het basisscenario van deze LCA wordt aangenomen dat de vloeibare fractie (olie) wordt verkocht als brandstof. Met de gasfractie wordt op locatie elektriciteit opgewekt in een Warmte Krachtkoppeling (WKK), waarbij zowel de elektriciteit als de warmte gebruikt worden in het proces. In Tabel 23 zijn de gegevens voor het pyrolyseproces samengevat.

Tabel 23 Pyrolyseproces, input per ton granulaat input

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
-	-	-	Omwille van vertrouwelijkheid zijn de procesgegevens niet vermeld in dit rapport.

3.4.2. Vermeden producten

Twee van de drie outputs vervangen andere producten bij de beoogde toepassingen. Dit zijn de pyrolyseolie en de carbon black. De pyrolyseolie wordt, conform de aanname in 3.4.1, ingezet als brandstof en vervangt daarmee, gezien de samenstelling, lichte stookolie. Alternatieve toepassingen van de pyrolyseolie zijn opgenomen in de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4. Voor de vaste fractie is aangenomen dat deze één op één carbon black vervangt en 50% hiervan toepassing vindt in banden en 50% in andere materialen zoals folies, coatings of technische rubbers. Het pyrolysegas wordt volledig benut in het proces en vervangt daarom geen producten.

Daarnaast zijn er de materialen die vrijkomen bij de productie van het granulaat. Het complete overzicht is opgenomen in Tabel 24.

Tabel 24 Vermeden producten Pyrolyse

Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Carbon black, per ton geleverd materiaal	1 ton	Carbon black {GLO} production Cut-off, U	Vervangt één op één carbon black.



Product / proces	Hoeveelheid	Referentie	Toelichting
Lichte stookolie, per ton geleverd materiaal	1 ton	Light fuel oil {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U	Vervangt één op één lichte stookolie. Een alternatief scenario met chemische recycling van pyrolyseolie is opgenomen in de gevoeligheidsanalyse is paragraaf 4.4.
Vermeden staal, per ton geleverd materiaal	-0,174 ton -0,946 ton 0,174 ton 0,946 ton	Steel, unalloyed {RER} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, unalloyed {RoW} steel production, converter, unalloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RER} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	Gemodelleerd volgens bijlage A2.6 van het World Steel LCI methodology report uit 2017 [5] met processen uit ecoinvent. Legeringselementen en coating (zinc, koper, tin) zijn buitenbeschouwing gelaten.
Verbrandings-energie, per MJ LHV.	-1 MJ	16% - Electricity, high voltage {NL} production mix Cut-off, U 19% - Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW Cut-off, U	Voor het textiel is een verbrandingswaarde van gemixte plastics is 30,8 MJ /kg en van rubber 27,2 MJ/ kg beide obv. gegevens uit ecoinvent proces voor verbranding van het betreffende materiaal. Rendement is AVI in Nederland is 19% elektrisch en 20% warmte [13].

3.4.3. Massabalans

Tabel 25 laat de massabalans zien van de eerste cyclus van het pyrolyseproces.

Tabel 25 Massabalans eerste cyclus Pyrolyse

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	1 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 22.	Systeem begint na inzameling
Verbranden textiel	0,14 ton		Verbranden textiel. Zie processen Tabel 22.	-
Verbranden rubberafval	0,01 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 22.	-
Pyrolyse	0,72 ton		Pyrolyseproces, per ton granulaat. Zie processen in Tabel 23.	-
Carbon black toegepast in banden		0,139 ton	Carbon black voor toepassing in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 24.	Ondanks dat carbon black in verschillende toepassingen gebruikt kan worden en de kwaliteit hier wellicht nog niet in alle gevallen voldoende voor is, wordt uitgegaan van 50% toepassing in banden. Volgens opgave van BBC is het carbon black dat zij zullen produceren van voldoende kwaliteit voor deze toepassing. Tevens worden in literatuur onderzoek beschreven waarbij succesvol een gedeelte recovered carbon black gebruikt wordt in rubber voor banden [9]. In de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4 zijn alternatieve scenario's opgenomen.
Carbon black toegepast in andere toepassingen		0,139 ton	Carbon black voor toepassing in andere toepassingen, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 24.	Aangenomen dat recovered carbon black voor 50% in andere toepassingen gebruikt wordt en daar ook één op één primair carbon black vervangt..
Lichte stookolie als brandstof		0,324 ton	Lichte stookolie, per ton geleverd materiaal	Lichte stookolie aangenomen, alternatieven zijn opgenomen in de gevoeligheidsanalyse.
Staal		0,13 ton	Staal, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 24.	-
Textiel		0,14 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV, Zie vermeden producten Tabel 24.	Samenstelling van het textiel is niet bekend, gemodelleerd met een

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Energie uit verbranding		0,01 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 24.	generiek proces voor gemixte plastics. LHV is 30,78 MJ/kg. Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.

Tabel 26 laat de massabalans zien van de tweede cyclus van het pyrolyseproces. Net als bij het devulkanisatieproces is aangenomen dat er 5% verlies optreedt in de tweede cyclus, door onder andere het afscheiden van de textiel fractie tijdens het granuleren. In paragraaf 4.4 is de gevoeligheid van deze aanname beoordeeld.

Verder is voor de tweede cyclus aangenomen dat het in banden verwerkte carbon black weer op de zelfde wijze als in de eerste cyclus wordt terug gewonnen. Hierbij wordt enkel het carbon black gevolgd en zijn hetzelfde granuleer- en pyrolyseproces gebruikt als in de eerste cyclus, welke gealloceerd zijn aan het carbon black op basis van massa. Met andere woorden, er is een proces samengesteld voor pyrolyse van 1 kg rubbergranulaat. Dit proces wordt gerekend voor de 720 kg rubbergranulaat dat verwerkt wordt in de eerste cyclus. In de tweede cyclus wordt dit proces enkel gerekend voor de 139 kg carbon black en niet de (ongeveer) 350 kg rubbergranulaat waarin het carbon black verwerkt is. Hiermee wordt de impact van het proces verdeeld over de andere outputs van het proces op basis van massa. Andere allocatie methodes omvatten economische en energie allocatie. De invloed van allocatie is beschreven in paragraaf 4.4.

Voor het carbon black dat in andere producten wordt toegepast, is aangenomen dat deze niet gescheiden ingezameld worden en daardoor niet weer aangeboden worden ter recycling. Een conservatieve aanname is gedaan, waarbij dit materiaal verbrand wordt in een afvalverbrandingsinstallatie.

Tabel 26 Massabalans tweede cyclus Pyrolyse

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	0,139 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 22.	Systeem begint na inzameling
Verbranden uitval	0,007 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 22.	5% uitval, aangenomen dat dit verbrand wordt.
Pyrolyse	0,132 ton		Pyrolyseproces, per ton granulaat. Zie processen in Tabel 23.	-
Verbranden carbon black in overige	0,139 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 22.	Verbranden van carbon black in overige toepassingen
Carbon black toegepast in banden		0,066 ton	Carbon black voor toepassing in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 24.	Ondanks dat carbon black in verschillende toepassingen gebruikt kan worden en de kwaliteit hier wellicht nog niet in alle gevallen voldoende voor is, wordt uitgegaan van 50% toepassing in banden. Volgens opgave van BBC is het carbon black dat zij zullen produceren van voldoende kwaliteit voor deze toepassing. Tevens worden in literatuur onderzoeken beschreven waarbij succesvol een gedeelte recovered carbon black gebruikt wordt in rubber voor banden [9]. In de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4 zijn alternatieve scenario's opgenomen.
Carbon black toegepast in overige		0,066 ton	Carbon black voor toepassing in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 24.	Aangenomen dat recovered carbon black voor 50% in andere toepassingen gebruikt wordt en daar ook één op één primair carbon black vervangt.
Energie uit verbranding afval		0,007 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 24.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Energie uit verbranden carbon black in overige		0,139 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 24.	LHV van rubber is gebruikt voor carbon black 27,19 MJ/kg.

Tabel 27 laat de massabalans zien van de derde cyclus van het pyrolyseproces. Hier zijn dezelfde werkwijze en aannames gevolgd als in de tweede cyclus.

Tabel 27 Massabalans derde cyclus Pyrolyse

Product / proces	In	Uit	Referentie	Toelichting
Granuleren van banden	0,066 ton		Granuleren, per ton banden. Zie processen Tabel 22.	Systeem begint na inzameling
Verbranden uitval	0,003 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 22.	5% uitval, aangenomen dat dit verbrand wordt (geen verschil met tweede cyclus door afronding).
Pyrolyse	0,063 ton		Pyrolyseproces, per ton granulaat. Zie processen in Tabel 23.	-
Verbranden carbon black in overige	0,066 ton		Verbranden rubber. Zie processen Tabel 22.	Verbranden van carbon black in overige toepassingen
Carbon black toegepast in banden		0,031 ton	Carbon black voor toepassing in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 24.	Ondanks dat carbon black in verschillende toepassingen gebruikt kan worden en de kwaliteit hier wellicht nog niet in alle gevallen voldoende voor is, wordt uitgegaan van 50% toepassing in banden. Volgens opgave van BBC is het carbon black dat zij zullen produceren van voldoende kwaliteit voor deze toepassing. Tevens worden in literatuur onderzoeken beschreven waarbij succesvol een gedeelte recovered carbon black gebruikt wordt in rubber voor banden [9]. In de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4 zijn alternatieve scenario's opgenomen.
Carbon black toegepast in overige		0,031 ton	Carbon black voor toepassing in banden, per ton geleverd materiaal. Zie vermeden producten Tabel 24.	Aangenomen dat recovered carbon black voor 50% in andere toepassingen gebruikt wordt en daar ook één op één primair carbon black vervangt.
Energie uit verbranding afval		0,003 ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 24.	Aangenomen dat dit voornamelijk uit rubber bestaat. LHV is 27,19 MJ/kg.
Energie uit verbranden carbon black in overige		0,066ton	Verbrandings-energie, per MJ LHV. Zie vermeden producten Tabel 24.	LHV van rubber is gebruikt voor carbon black 27,19 MJ/kg.

4. MILIEUEFFECTBEOORDELING

4.1. Resultaten (gekaracteriseerd)

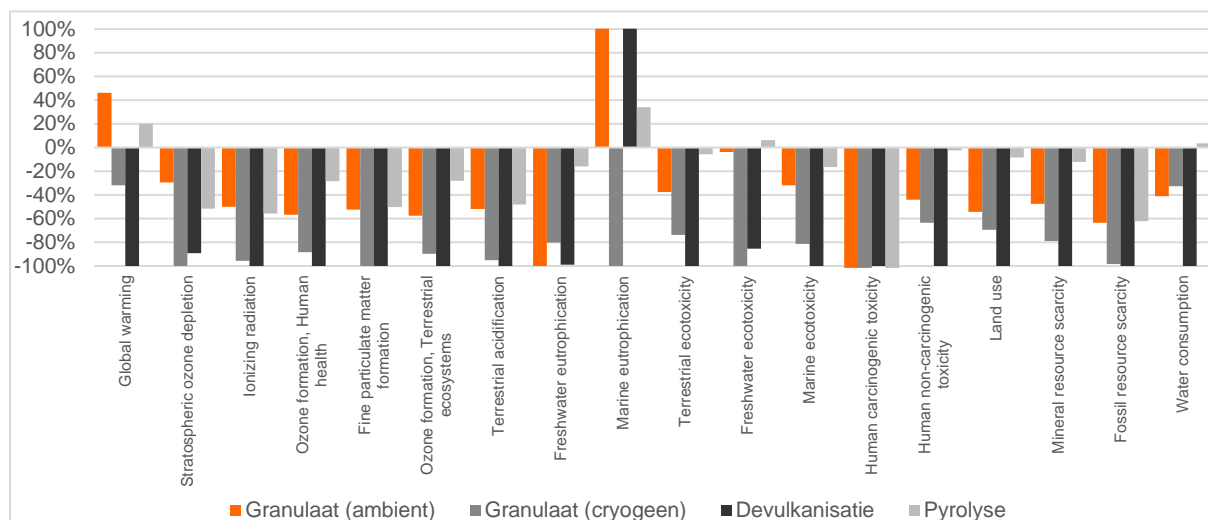
Figuur 8 laat een vergelijking zien tussen de verschillende processen over het totaal van drie cycli en per impact categorie (mid-point scores). Bij deze scores dient vermeld te worden dat er onzekerheden zijn, welke verder uitgewerkt zijn in paragraaf 4.4. Het scenario voor ambient granulaat is gebaseerd op praktijkgegevens. Echter zijn ook hier veel toepassingen relatief nieuw en door de lange levensduur van deze producten is niet voor alle toepassingen praktijkdata beschikbaar over de verwerking in een tweede en derde cyclus. Dit is ingevuld met, conservatieve, aannames. Het scenario voor cryogeen granulaat is gedeeltelijk gebaseerd op praktijkgegevens, maar de exacte toepassingen voor het granulaat konden niet achterhaald worden. Devulkanisatie is gebaseerd op gegevens van processen op labschaal afkomstig uit literatuur en Pyrolyse van een installatie op pilot schaal. Voor beide geldt ook dat de toepassingen van het recyclelaat uit deze processen nog niet nauwkeurig bepaald kunnen worden. Afhankelijk van de toepassing van het materiaal wordt ook bepaald of recycling in een tweede of derde cyclus mogelijk is. Dit laatste heeft veel invloed op de resultaten.

Verder, zijn scores in de meeste gevallen negatief doordat de milieu-impact ten gevolge van energie en materiaal gebruik in het recycleproces kleiner zijn dan impact die vermeden wordt door het inzetten van recyclelaat. In deze vergelijking is het proces met de laagste impact (dus negatieve score) per categorie op -100% gezet en zijn de scores van de andere processen naar rato weergegeven.

In de meeste impactcategorieën is een vergelijkbare volgorde te zien, waarbij devulkanisatie over het algemeen het beste scoort, gevolgd door cryogeen granulaat, pyrolyse en ambient granulaat. Verschillen worden in veel gevallen groter in de tweede en derde cyclus, waarbij het materiaal uit devulkanisatie, cryogeen granulaat en pyrolyse, gedeeltelijk, opnieuw ingezet wordt bij de productie van banden. Aangezien banden op grote schaal ingezameld worden, is hier in de tweede en derde cyclus vermeden productie gerekend. Bij ambient granulaat daarentegen is aangenomen dat tegels en geperste producten niet gerecycled worden omdat onbekend is of en hoe deze producten na gebruik ingezameld worden. De invloed van deze aannames zijn opgenomen in de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4.

De score in de categorie Marine Eutrophication bij het devulkanisatieproces is opvallend hoog (positieve score). Deze score wordt grotendeels veroorzaakt door de productie van de devulkanisatie hulpstof. Ook bij het ambient granulaat is de score in deze categorie hoog. Hier heeft de toevoeging PU een grote bijdrage, welke niet gecompenseerd wordt door de vermeden producten.

De score in de categorie Global warming bij het ambient granuleerproces wordt grotendeels veroorzaakt door het verbranden van rubbertegels en geperste producten in de tweede cyclus. De invloed van de aanname dat deze producten verbrand worden alsmede alternatieve scenario's zijn beschreven in de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 4.4.



Figuur 8 Vergelijking over drie cycli, per impact categorie (mid-points)

4.2. Resultaten (gewogen)

In dit onderdeel worden de gewogen eindscores (ReCiPe end-points) van de vier recyclemethodes besproken. Bij deze resultaten dient vermeld te worden dat er nog onzekerheden zijn die invloed hebben op de resultaten, zoals ook beschreven in de vorige paragraaf. De invloed van deze onzekerheden op de resultaten zijn beschreven in paragraaf 4.4.

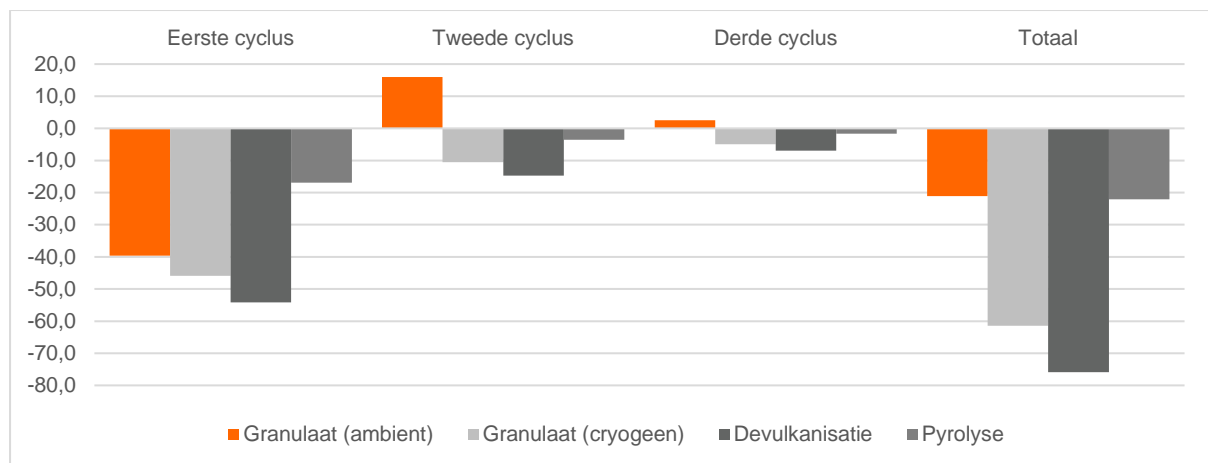
In de ReCiPe eindscore worden de scores uit 18 impact categorieën (mid-points) gewogen tot één score [12]. Wanneer de score negatief is, wordt er meer milieu-impact vermeden door de inzet van gerecycled materiaal dan veroorzaakt ten gevolge van materiaal- en energieverbruik tijdens het recycleproces. De totale gewogen scores over drie cycli zijn per methode weergegeven in Tabel 28 en Figuur 9.

Tabel 28 Vergelijking op basis van gewogen eindscores (ReCiPe end-points)

methode	Eerste cyclus	Tweede cyclus	Derde cyclus	Totaal
Granulaat (ambient)	-39,7	16,0	2,6	-21,1
Granulaat (cryogeen)*	-45,9	-10,6	-4,9	-61,4
Devulkanisatie**	-54,2	-14,7	-7,0	-75,8
Pyrolyse**	-16,9	-3,5	-1,7	-22,1

* Operationele techniek, toepassingen gedeeltelijk gebaseerd op toekomst scenario

** Nog in ontwikkeling, toepassingen gebaseerd op toekomst scenario



Figuur 9 Vergelijking op basis van gewogen eindscores (ReCiPe eindscore)

Op basis van inventarisatie zoals beschreven in onderdeel 3 scoort het devulkanisatieproces het beste. Ondanks de extra bewerkingen en toevoegingen die nodig zijn voor devulkanisatie, vervangt het recycleaat uit dit proces primair rubber. Dit compenseert de impact van het proces ruimschoots.

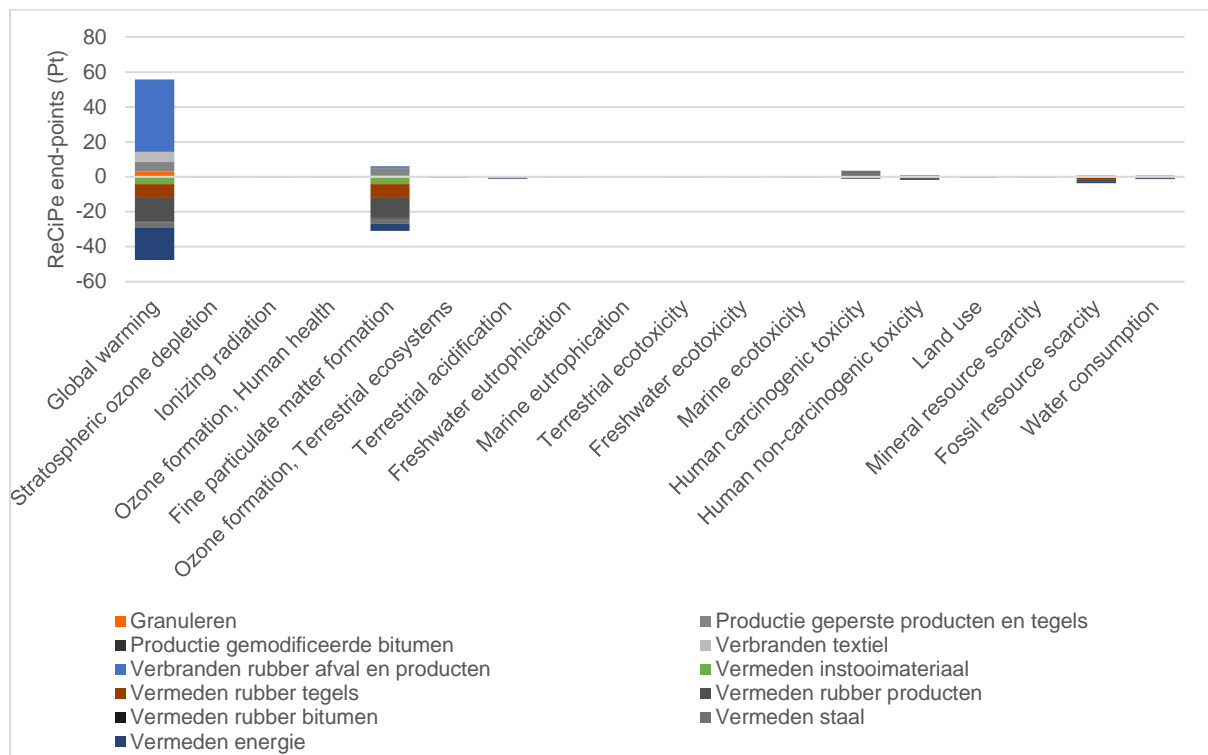
Beide granuleermethodes scoren goed in de eerste cyclus. Voor de producten van ambient granulaat is, gezien de toepassingen, aangenomen dat deze verbrand worden in de tweede cyclus. Daardoor is de score hoger dan voor het cryogeen granulaat, waar nog recycling plaatsvindt in de tweede cyclus. Door het verbranden van een gedeelte van de producten van ambient granulaat is er minder recycling en dus minder vermeden productie in de derde cyclus.

Het pyrolyse proces scoort beter dan ambient granulaat en lager dan cryogeen granulaat en devulkanisatie. Dit komt doordat het recycleaat carbon black en de pyrolyseolie een lagere milieu-impact hebben dan het bij de andere methodes uitgespaarde rubber. Aangenomen is dat het carbon black meerdere malen opnieuw gerecycled kan worden, wat te zien is in de scores van de tweede en derde cyclus. Het verschil ten opzichte van de eerste cyclus komt doordat de pyrolyseolie ingezet wordt als brandstof en daardoor in de tweede en derde cyclus niet gerecycled wordt.

4.3. Zwaartepuntanalyse

In deze analyse worden de bijdrages van de verschillende processen per impactcategorie geanalyseerd. Hiervoor zijn de verschillende processen als totaal over de drie cycli weergegeven. In deze analyse zijn de resultaten al gewogen voor optelling tot de eind-punt score, maar weergegeven per impactcategorie. Door weging van de gekarakteriseerde scores liggen de zwaartepunten op andere categorieën dan in gekarakteriseerde resultaten te zien is.

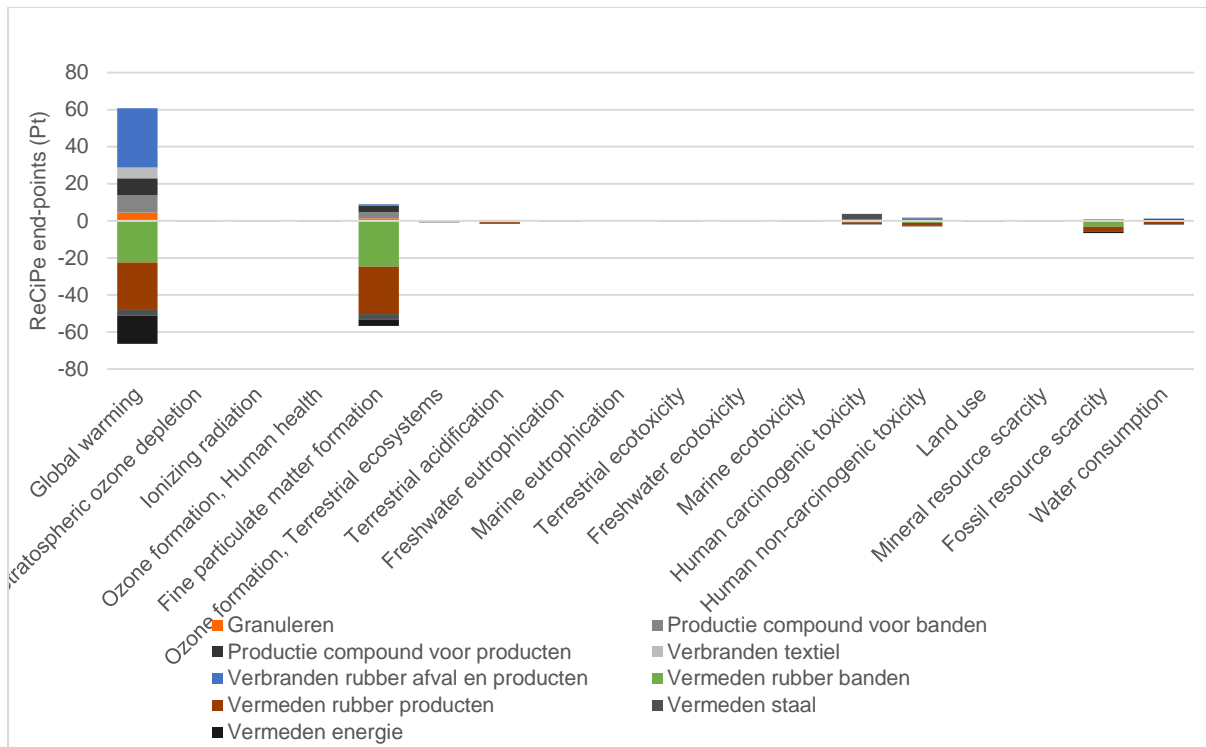
Figuur 10 laat de zwaartepuntanalyse van het granulaat (ambient) zien. De zwaartepunten van dit proces liggen in de categorieën Global warming en Fine particulate matter. Waarbij Global warming de score grotendeels wordt veroorzaakt door het verbranden van materiaal in de tweede cyclus. Anderzijds zorgt de vermeden energie en vermeden rubberproducten als tegels en stalmatten ervoor dat deze score grotendeels gecompenseerd wordt. De vermeden impact in de categorie Fine particulate matter zijn ook voornamelijk afkomstig van de vermeden energie en rubber producten.



Figuur 10 Zwaartepuntanalyse op basis van gewogen score per impactcategorie, granulaat (ambient)

In Figuur 11 zijn de resultaten voor het granulaat (cryogeen) opgenomen. De zwaartepunten zijn vergelijkbaar met het granulaat (ambient). De impact van verbranding is echter lager, omdat er in de tweede cyclus meer gerecycled wordt en minder verbrand. De impact van de bewerkingen zijn daarentegen hoger, wat vooral te zien is in de categorie Global warming. Bij deze bewerkingen is de productie van stikstof dominant, 70% van de totale gewogen impact van het proces. De overige 30% zijn nagenoeg gelijk verdeeld over het elektriciteitsverbruik en de productie van het additief.

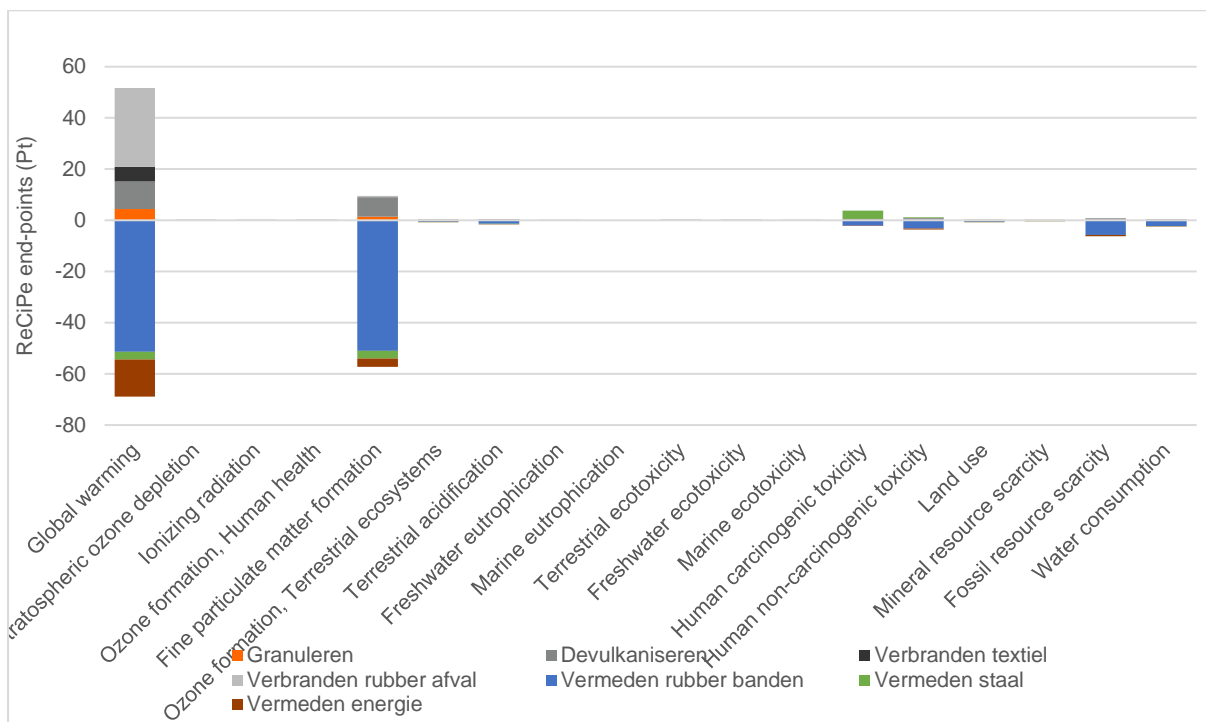
De score in de categorie Fine particulate matter wordt voornamelijk bepaald door het vermeden rubber en in mindere mate de vermeden carbon black- en energieproductie.



Figuur 11 Zwaartepuntanalyse op basis van gewogen score per impactcategorie, granulaat (cryogeen)

In het devulkanisatieproces is de vermeden rubberproductie duidelijk dominant, zoals te zien in Figuur 12. In de drie categorieën met de grootste bijdrage aan de totale gewogen score, te weten Global warming, Fine particulate matter en Fossil resource scarcity, heeft de vermeden rubber productie duidelijk de grootste bijdrage.

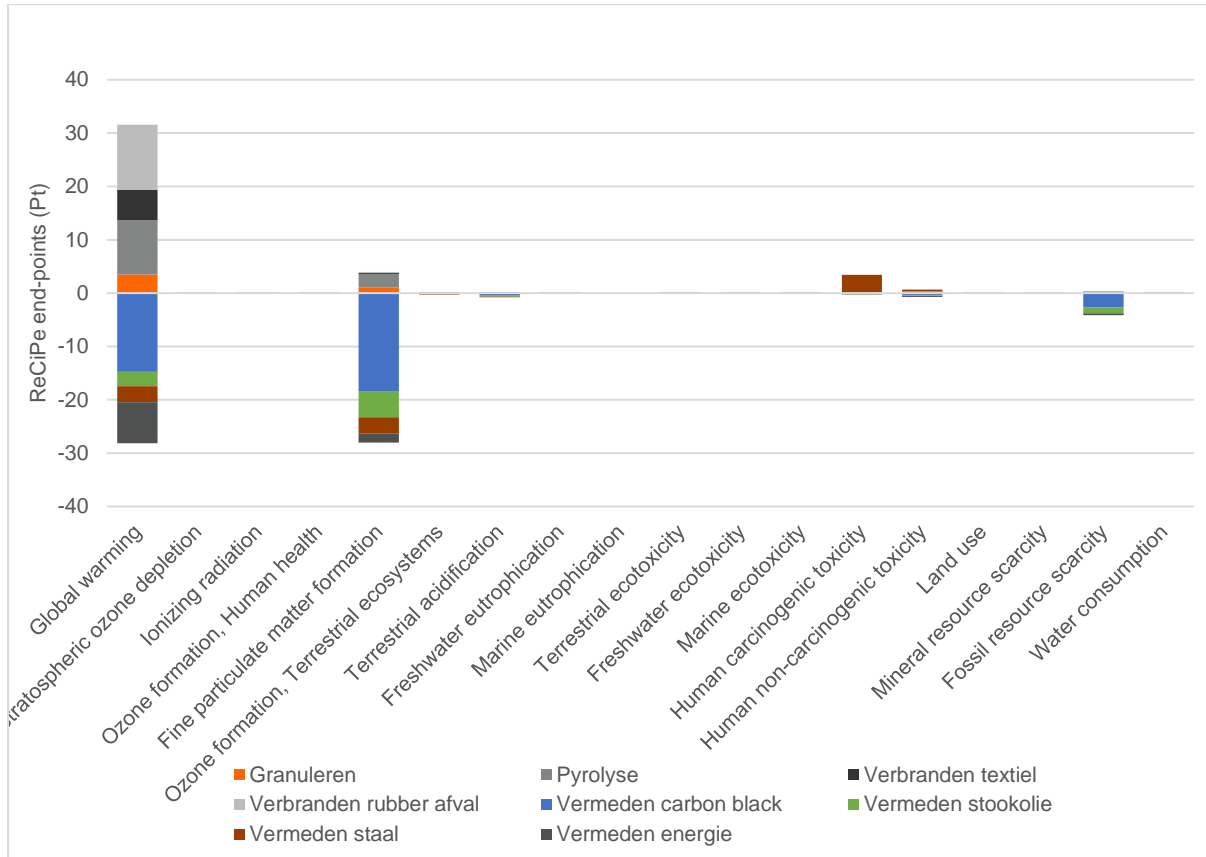
In de categorie Global warming zijn de positieve scores van het devulkanisatieproces en het verbanden van afval duidelijk te zien. In het devulkanisatieproces hebben de productie van het devulkanisatie hulpstof en het elektriciteitsverbruik de grootste bijdrage, beide ongeveer 40% van de totale gewogen score van het devulkanisatieproces.



Figuur 12 Zwaartepuntanalyse op basis van gewogen score per impactcategorie, devulkanisatie

De zwaartepunten van het pyrolyseproces zijn weergegeven in Figuur 13. Het vermijden van carbon black productie is duidelijk zichtbaar in de categorieën Global warming, Fine particulate matter en Fossil resource scarcity.

Verder zijn, door de iets lagere totaal score, hier de processen voor het granuleren en staal beter zichtbaar. De meeste impact wordt echter veroorzaakt door de pyrolyseproces, waarvan 5% van de totale gewogen score door ingekochte elektriciteit wordt veroorzaakt, 50% door elektriciteits- en warmteproductie uit het pyrolysegas en 25% door warmte uit aardgas.



Figuur 13 Zwaartepuntanalyse op basis van gewogen score per impactcategorie, pyrolyse

4.4. Gevoeligheidsanalyses

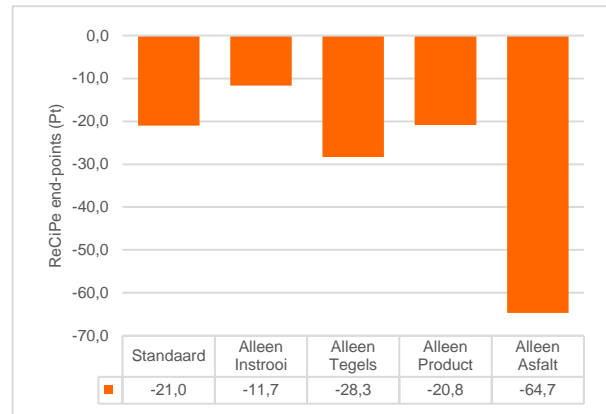
Een aantal van de in deze LCA onderzochte recycle methodes worden nog niet op grote schaal toegepast. Van de reeds bestaande methodes zijn de eerste producten van het recycelaat nog niet in de fase waarin deze worden afgedankt. Tevens zijn er verschillende mogelijkheden voor toepassing van het recycelaat. Om de hoeveelheid verschillende opties te beperken is een verdeling van producten aangenomen. Dit resulteert in de nodige onzekerheden. De invloed van de gemaakte keuzes en onzekerheden wordt in deze paragraaf beoordeeld.

Granulaat (ambient) toepassingen

Ondanks dat er al geruime tijd producten van rubber granulaat (ambient) uit banden gemaakt wordt komen er geregeld producten bij en kan de verdeling over de verschillende toepassingen jaarlijks wijzigen. Vier extra scenario's zijn berekend waarin al het geproduceerde granulaat in één toepassing verwerkt wordt. In Figuur 14 is eerst het scenario zoals beschreven in de inventarisatie opgenomen en vervolgens ter vergelijking de inzet van al het granulaat in individuele toepassingen over drie cycli.

Resultaten zijn gevoelig voor de toepassing, waarbij de geperste producten en tegels beter scoren. Asfalt scoort goed doordat er in de tweede en derde cyclus vermeden bitumen is

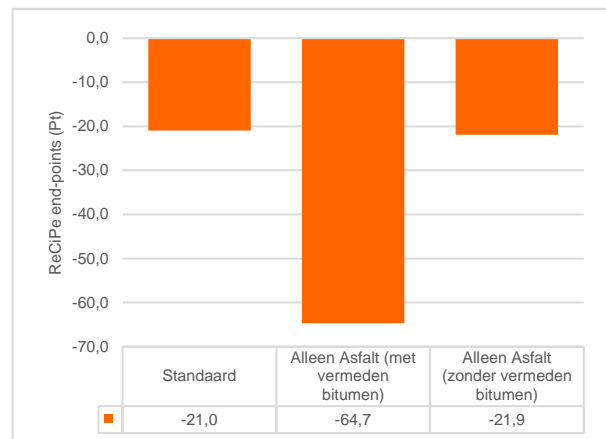
gerekend, de gevoeligheid hiervan wordt verderop in deze paragraaf beschreven. Voor het instrooi materiaal is het beoordelen van vermeden productie moeilijk doordat er verschillende alternatieven zijn. Er is gerekend met de aanname dat 1 kg rubbergranulaat 0,35 kg primair rubber uitspaart als instrooi materiaal. Daarnaast wordt er vanuit gegaan dat in de tweede cyclus 50% van het instrooi materiaal opnieuw gebruikt kan worden in dezelfde toepassing. Zowel een groter aandeel vermeden rubber als bij meer recycling in de tweede cyclus zal leiden tot meer vermeden impact.



Figuur 14 Gevoeligheid, granulaat (ambient), verdeling toepassingen

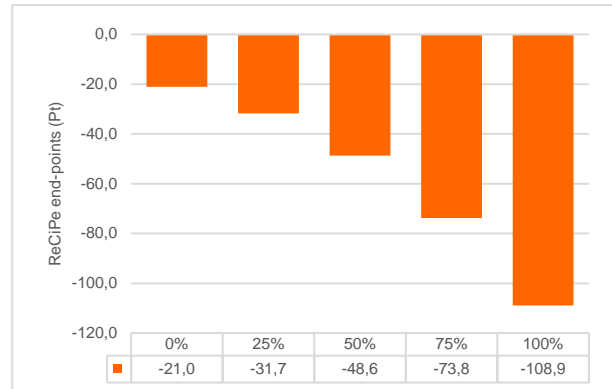
Granulaat (ambient) asfaltrubber

Bij het gebruik van bandengranulaat als modificatie in bitumen voor asfaltwegen is een belangrijke factor hoeveel primair rubber en bitumen er vermeden wordt en wat de waarde van de modificatie is bij het recyclen van asfalt. In het basis scenario is 40% vermeden rubber aangenomen en daarbij dat het overige rubber, dat geen meerwaarde heeft als modificatie, wel bitumen vervangt. In de tweede en derde cyclus is aangenomen dat bandengranulaat in gerecycled asfalt nog steeds bindende eigenschappen heeft en daarmee bitumen uitspaart. In deze gevoeligheidsanalyse is naast het basis scenario, het scenario met alleen asfaltrubber weergegeven. Daarnaast is een scenario berekend waar geen vermeden bitumen gerekend wordt in de drie cycli, om een beeld te geven van de mogelijke bandbreedte. Omdat er geen materiaal verbrand wordt is de score zonder vermeden bitumen lager dan bijvoorbeeld instrooi materiaal en geperste producten, ondanks dat er maar 40% rubber vermeden wordt.



Granulaat (ambient) tweede cyclus

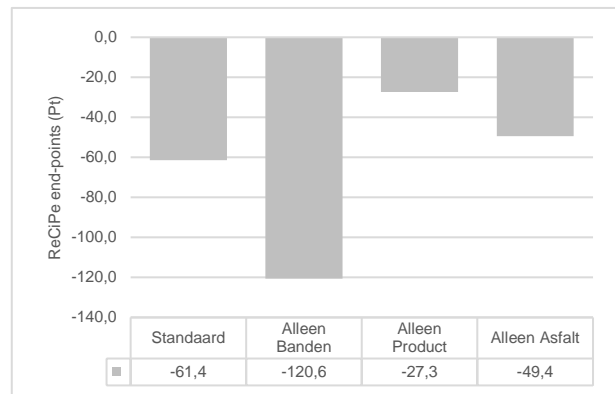
In de berekening voor het granulaat (ambient) is de conservatieve aanname gedaan dat de producten van het recyclaat in de tweede cyclus verbrand worden. Het is mogelijk om deze producten te recyclen, bijvoorbeeld door deze opnieuw te granuleren en verlijmen. In deze gevoeligheidsanalyse is aangenomen dat de tegels en geperste producten in de tweede en derde cyclus gerecycled worden en op een zelfde wijze weer toegepast, zonder rekening te houden met de praktische haalbaarheid hiervan. Verder zijn verschillende percentages voor inzameling en recycling opgenomen. Waarbij 0% het basis scenario is en 100% het scenario waarin alle geperste producten en tegels in de tweede en derde cyclus gerecycled worden. Resultaten zijn gevoelig voor recycling in de tweede en derde cyclus. Bij 100% recycling is de totale gewogen impact ongeveer vijf keer lager.



Figuur 15 Gevoeligheid, granulaat (ambient), recycling tweede en derde cyclus

Granulaat (cryogeen) toepassingen

Voor de toepassingen van granulaat (cryogeen) is een aanname gedaan voor de verdeling van het materiaal over verschillende toepassingen. Hierbij is uitgegaan van 50% toepassing in technische producten waar het rubber vervangt en 50% toepassingen in banden waar het rubber of carbon black vervangt. Daarnaast is toepassing van het materiaal in asfalt mogelijk in de vorm van gemodificeerde bitumen. Omdat het onduidelijk is of dat dit gebruikelijk is met cryogeen granulaat is deze optie niet opgenomen in het hoofdsceario en hier enkel toegevoegd ter indicatie. Zoals te zien in Figuur 16, zijn de resultaten gevoelig voor de verdeling.

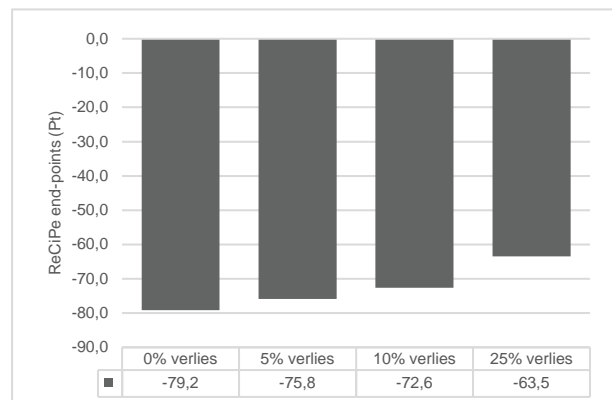


Figuur 16 Gevoeligheid, granulaat (cryogeen), verdeling toepassingen

Ondanks dat de toepassing in banden in de eerste cyclus minder milieuwinst oplevert dan de technische producten, omdat er 50% carbon black en 50% rubber vervangen wordt en de milieulast van carbon black lager is dan die van rubber, is de score voor banden over de drie cycli beter. Dit komt doordat er voor banden aangenomen is dat deze ingezameld worden en volledig gerecycled (met 5% verlies), terwijl voor de rubber producten, aangenomen is dat deze niet of weinig gescheiden ingezameld worden en daarom verbrand in de tweede cyclus. In de berekening met alleen asfalt, waar rubber modificatie in bitumen voor asfalt vervangt, wordt in de tweede en derde cyclus geen vermeden rubber gerekend, maar wel vermeden bitumen.

Devulkanisatie tweede en derde cyclus

Het devulkanisatieproces is erg efficiënt, naar zeggen van experts. Daarom is er van uitgegaan dat output gelijk is aan input. Hoeveel materiaal er weer ter beschikking komt voor recycling in de tweede en derde cyclus is onbekend en zal mede afhankelijk zijn van de toepassing van het devulkanisat. Voor de beoogde toepassing in autobanden, is aangenomen dat het materiaal nagenoeg volledig weer gerecycled wordt. Er is 5% verlies aangenomen voor het granuleren. Verder is geen verlies gerekend. Omdat deze aanname niet onderbouwd of bevestigd kan worden zijn in deze gevoeligheidsanalyse scenario's met verschillende verliespercentages berekend. Dit geldt enkel voor de 50% waarvoor toepassing in

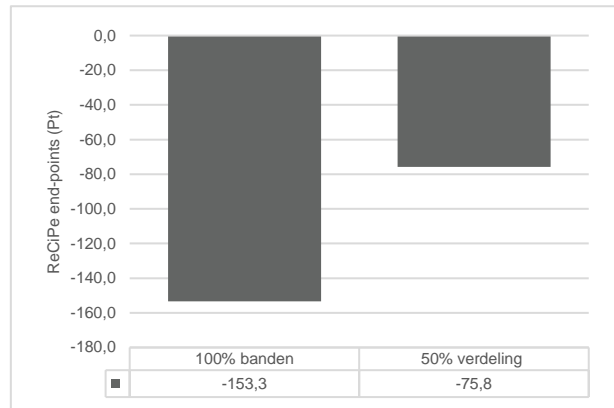


Figuur 17 Gevoeligheid, devulkanisatie verlies tweede en derde cyclus

banden aangenomen is. Variaties in het percentage verlies zijn duidelijk zichtbaar, maar leiden niet tot grote verschillen.

Devulkanisatie verdeling toepassingen

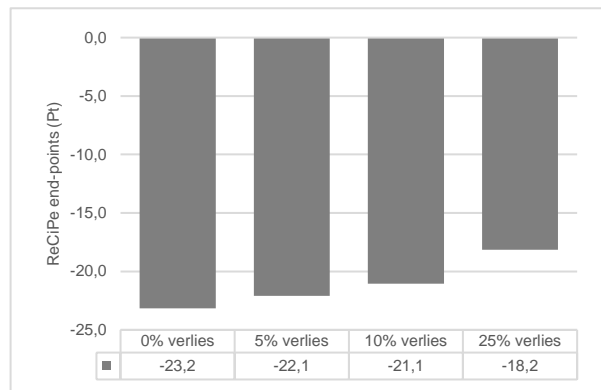
In Figuur 18 is een vergelijking gemaakt tussen toepassing van devulkanisat in banden en andere producten. Bij toepassing in banden wordt er van uitgegaan dat banden weer ingezameld worden en opnieuw gerecycled. In het geval van overige producten is aangenomen dat dit niet gescheiden ingezameld wordt. Zoals te zien in het figuur hebben de aannames over inzameling van materiaal in de tweede en derde cyclus veel invloed op de resultaten.



Figuur 18 Gevoeligheid, devulkanisatie verdeling toepassingen

Pyrolyse tweede en derde cyclus

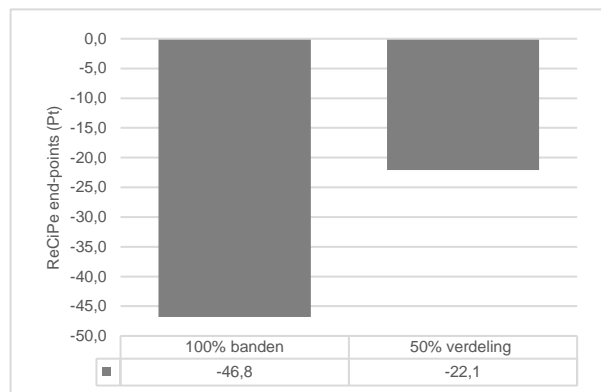
Evenals bij het devulkanisatieproces is hier het doel om het recyclaat weer in te zetten bij de productie van banden. Daarom is aangenomen dat het carbon black in de tweede cyclus grotendeels weer ingezameld wordt en gerecycled. Net als bij het devulkanisatieproces is er alleen uitgegaan van 5% uitval bij het granuleer proces. Om de gevoeligheid van deze aanname te testen zijn scenario's met verschillende verliespercentages berekend en weergegeven in Figuur 19. Meer verlies in de tweede en derde cyclus zorgen voor minder milieuwinst, de verschillen zijn echter klein.



Figuur 19 Gevoeligheid, pyrolyse verlies tweede en derde cyclus

Pyrolyse verdeling toepassingen

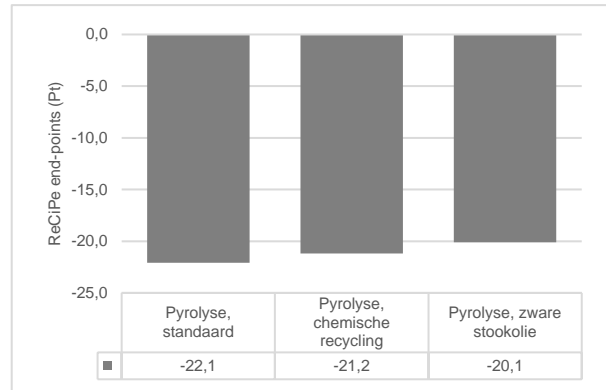
Voor het uit het pyrolyseproces afkomstige carbon black zijn ook verschillende toepassingen mogelijk. In het hoofdscenario wordt uitgegaan van 50% toepassing in banden en 50% toepassing in overige producten. Bij de laatste is aangenomen dat er geen gescheiden inzameling plaatsvindt in de tweede en derde cyclus. Ter vergelijking is een scenario berekend waarbij al het materiaal toegepast wordt in banden, of ander product dat ingezameld wordt en gerecycled. In Figuur 20 is de zien dat de invloed van aannames voor toepassingen en inzameling van materiaal in de tweede en derde cyclus veel invloed heeft op de gewogen eindscores.



Figuur 20 Gevoeligheid, pyrolyse verdeling toepassingen

Pyrolyse toepassing olie

In het hoofdsenario voor pyrolyse is aangenomen dat de pyrolyseolie ingezet zal worden als brandstof. Hiervoor is lichte stookolie als vermeden product gerekend. Andere mogelijkheden zijn zware stookolie of het chemisch recyclen van de pyrolyseolie, waar respectievelijk processen voor 'heavy fuel oil' en 'nafta' gebruikt zijn. De keuze voor nafta als vermeden product voor chemische recycling is als volgt te verklaren. Wanneer en bijvoorbeeld polymeren gemaakt worden van nafta, dienen alle stappen in dat proces opgenomen te worden in de LCA, vervolgens mag dat polymeer dan als vermeden product gerekend worden, waarmee netto enkel nafta uitgespaard wordt. Daarnaast kunnen de uit nafta geproduceerde polymeren weer ingezameld worden en in de tweede en derde cyclus gerecycled, waarbij wederom de productie van nafta vervangen wordt. In dit voorbeeld wordt er vanuit gegaan dat de nafta toepast wordt in de productie van banden, omdat er anders een oneindige hoeveelheid variaties zouden zijn.



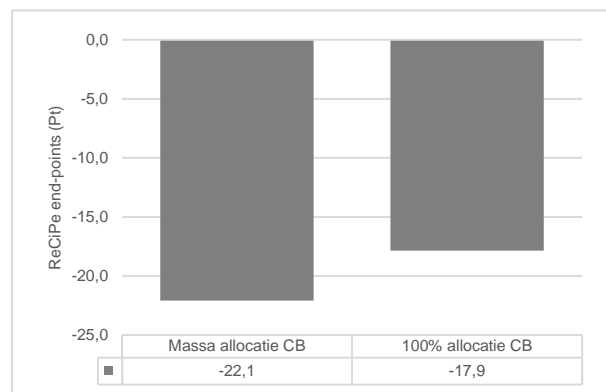
Figuur 21 Gevoeligheid, pyrolyse toepassing olie

Ondanks dat de geproduceerde nafta meerdere malen gerecycled kan worden is het verschil met vermeden lichte stookolie minimaal. De reden is dat de vermeden impact per eenheid lichte stookolie groter is dan die van nafta. Daarnaast wordt voor het recyclen van de producten uit nafta ook het granuleer- en pyrolyseproces gerekend. De milieuwinst is nagenoeg gelijk aan die van lichte stookolie, die alleen in de eerste cyclus berekend wordt.

De zware stookolie is, net als de lichte stookolie, alleen in de eerste cyclus opgenomen. Het verschil met lichte stookolie is klein en daarmee is de invloed van de keuze tussen beide processen beperkt.

Allocatie pyrolyseproces

Het pyrolyseproces heeft drie verschillende outputs. In de eerste cyclus is de impact van het pyrolyse proces berekend voor de hoeveelheid te verwerken rubbergranulaat. In de tweede en derde cyclus wordt enkel nog het carbon black gevolgd. Voor het verwerken is het pyrolyseproces gerekend voor de hoeveelheid carbon black die verwerkt wordt (massa-allocatie). Met de andere componenten zoals het rubber waarin het carbon black verwerkt wordt, is geen rekening gehouden. Figuur 22 laat een scenario zien waar het pyrolyseproces volledig gealloceerd wordt aan het carbon black. Carbon black is grofweg 40% van de output van het proces. In dit scenario wordt daarom 2,5 keer het pyrolyse proces gerekend per eenheid carbon black. Daarmee wordt alle impact van het verwerken van een band met recovered carbon black toegeschreven aan het carbon black. Andere vormen van allocatie (economisch of energie-inhoud) zijn niet onderzocht.



Figuur 22 Gevoeligheid, pyrolyse allocatie pyrolyseproces tweede en derde cyclus

5. CONCLUSIE

Bij banden kan er onderscheid gemaakt worden tussen verschillende soorten banden. De belangrijkste twee groepen zijn personenwagen- en vrachtwagenbanden. Zowel de opbouw als samenstelling van beide type banden zijn zeer verschillend. Vrachtwagenbanden zijn steviger uitgevoerd, bevatten meer staal en minder textiel dan personenwagenbanden. Daarnaast bestaan vrachtwagenbanden voornamelijk uit natuurrubber, in tegenstelling tot autobanden die vaak maar een klein aandeel natuurrubber bevatten en verder bestaan uit verschillende soorten synthetisch rubber. Deze verschillen zorgen ervoor dat personenwagen- en vrachtwagenbanden op andere wijze gerecycled worden en daarom moeilijk te vergelijken zijn. Hierin is een belangrijk verschil dat loopvlakvernieuwing voor vrachtwagenbanden gebruikelijk is, maar dit bij personenwagens niet of nauwelijks gebeurt door onder andere de relatief lage kostprijs van nieuwe banden. Daarnaast is het devulkaniseren van natuurrubber makkelijker dan van synthetisch rubber, waardoor deze methode voor vrachtwagenbanden al toegepast wordt.

Op basis van de marktanalyse zijn het verwerken van personenwagenbanden doormiddel van granuleren bij omgevingstemperatuur (ambient), granuleren bij zeer lage temperatuur (cryogeen), devulkanisatie en pyrolyse geselecteerd als onderwerp voor deze mLCA. Granuleren bij omgevingstemperatuur is momenteel de meest toegepaste methode. Granuleren bij lage temperatuur wordt op kleinere schaal toegepast en momenteel nog veelal met vrachtwagenbanden. Pyrolyse op pilotschaal leek in Nederland redelijk ver te zijn, maar werd door brand stilgelegd. Een van de bedrijven achter dit initiatief maakt een doorstart met een meer geavanceerde installatie. Devulkanisatie van personenwagenbanden is op lab-schaal getest en het is de vraag wanneer de eerste pilotinstallatie gebouwd zal worden. Het devulkaniseren van vrachtwagenbanden en binnenbanden is daarentegen een bewezen techniek die op grote schaal toegepast wordt.

De vier genoemde methodes resulteren allen in milieuwinst, met andere woorden, de milieu-impact ten gevolge van energie en materiaal gebruik in het recycleproces wegen ruimschoots op tegen de impact die vermeden wordt doordat het recyclelaar de productie van primaire materialen vermijdt. Devulkanisatie resulteert in de beste score, dus minste impact, gevolgd door granulaat (cryogeen), pyrolyse en granulaat (ambient). Waarbij verschillen tussen de laatste twee klein zijn. Verder zijn ook verschillen tussen devulkanisatie en beide granuleerprocessen in de eerste cyclus klein. Verschillen in de tweede en derde cyclus worden vooral bepaald door de toepassing van het materiaal in de eerste cyclus. Wanneer het rubber toegepast wordt in producten waarvan onvoldoende duidelijk is of deze ingezameld zullen worden, is er geen recycling gerekend in de tweede cyclus en is er bijgevolg minder vermeden productie dus een minder lage score. Dit heeft met name invloed op de score van ambient granulaat, in een gevoeligheidsanalyse met meer recycling is de impact aanzienlijk lager.

Een gevoeligheidsanalyse laat zien dat verschillende aannames en onzekerheden invloed hebben op de resultaten. Grote verschillen worden veroorzaakt door variatie in de toepassingen van het materiaal uit beide granuleerprocessen, het wel of niet recyclen van rubbertegels en andere geperste producten van (ambient) granulaat in de tweede cyclus, en de vermeden producten die gerekend worden voor rubbergranulaat dat toegepast wordt in asfalt. Er is echter in geen van de gevoeligheidsanalyses een omslagpunt waarbij er door wijzigen in de scenario's sprake is van milieulast in plaats van milieuwinst.

De gebruiksfase is niet meegenomen in de berekeningen. Mogelijke uitloging van substanties uit het rubber dat ingezet wordt als instrooi materiaal als mede de verspreiding van het instrooi materiaal zelf, is niet beoordeeld. Verder is voor het rubber dat opnieuw toegepast wordt in autobanden aangenomen dat deze banden weer in Nederland gerecycled worden. Het echter niet onwaarschijnlijk dat een gedeelte van deze banden na gebruik geëxporteerd worden voor hergebruik in landen waar geen of minder recycling plaats zal vinden.

In deze studie is geen rekening gehouden met de grootte van afzetmarkten voor het recyclelaar. Ondanks de milieuwinst die in theorie behaald kan worden door devulkaniseren en cryogeen granuleren, is niet uitvoerig beoordeeld hoeveel van dit recyclelaar verwerkt kan worden in nieuwe banden of andere rubberproducten. Daarnaast is niet onderzocht wat de verschillen zijn in kosten van de verschillende processen. Wat mogelijk bepalend kan zijn voor de vraag naar recyclelaar van personenwagenbanden en daarmee bepalend zijn voor de kansrijkheid van de verschillende processen.

6. REFERENTIES

- [1] OPONEO.NL, „Hoeveel weegt een band?,” 24 01 2019. [Online]. Available: <https://www.oponeo.nl/blog/wat-is-het-gewicht-van-een-band>.
- [2] Model Verkeer & Vervoer, „Model Verkeer & Vervoer, gegevens aangeleverd door RWS WVL en op basis van verschillende bronnen”.
- [3] RecyBEM, aangeleverd door RecyBEM, gegevens van RecyBEM en ARN.
- [4] Alfonso de León Alonso, L., Saiz Rodríguez, L. & o Pérez Aparicio, R. (2018). 20 years of rubberized asphalt mixtures in Spanish roads. SIGNUS Ecovalor, S.L. Madrid.
- [5] Wang, H. (2021). Crumb rubber modified bitumen: Experimental characterization and modelling.
- [6] „ECHA. (2021). Rubberkorrels en -strooisel op sport- en speelvelden.” [Online]. Available: <https://echa.europa.eu/nl/hot-topics/granules-mulches-on-pitches-playgrounds>.
- [7] Saiwari, S. (2013). Post-consumer tires back into new tires (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 23 May)..
- [8] Tauw. (2019). Bijlage 19: CO2-emissies en Circulaire Economie., te vinden via: <https://commissiemer.nl/projectdocumenten/00006279.pdf>.
- [9] Anjum, A. (2021). Recovered carbon black from waste tire pyrolysis: Characteristics, performance, and valorisation.
- [10] Ministerie IenW, „Landelijk afvalbeheerplan, bijlage 9; Uitvoeren van LCA's i.r.t. het LAP (december 2017),” [Online]. Available: https://lap3.nl/publish/pages/121785/lap3_f9_lca_19_07_2019.pdf.
- [11] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9), 1218-1230.
- [12] Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level., The International Journal of Life Cycle Assessment, 22(2), 138-147.
- [13] Schriftelijke mededeling over bruto rendement in het jaar 2019, door RWS-WVL in 2021.
- [14] FFact / Ecotest banden (2018) Gegevens geïnventariseerd door FFact / Ecotest banden en ter beschikking gesteld voor deze studie.
- [15] World Steel Association. (2017). Life cycle inventory methodology report for steel products. World Steel Association, Brussels.
- [16] Merlin, B. (2020). Life cycle assessment of waste tyre treatments, commissioned by Genan Holding A/S.
- [17] PCR Asfalt, versie 1.0, Product Category Rules voor bitumineuze materialen in verkeersdragers en waterwerken in Nederland, (2020).



- [18] R. & VACO, „RecyBEM & VACO. (2014). Verantwoorde Toepassing van Rubbergranulaat van Autobanden als Infill,” [Online]. Available: <http://sportengemeenten.nl/wp-content/uploads/2016/10/VACO-en-BEM-2014-Verantwoorde-toepassing-rubbergranulaat-vraag-en-antwoord.pdf>.
- [19] Hoyer, S., Kroll, L., & Sykutera, D. (2020). Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres. *Procedia Manufacturing*, 43, 193-200.
- [20] Gesprek met Rob Zootjes van Kargro Recycling (18 juni 2021).
- [21] Wang, Q., Huang, Z., & Liu, Z. (2019, February). Overview of high-value reuse and grinding at sub-zero temperature of scrap rubber tires. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 472, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- [22] Azar, E. T. (1995). U.S. Patent No. 5,385,307. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [23] Saiwari, S., Van Hoek, J. W., Dierkes, W. K., Reuvekamp, L. E., Heideman, G., Blume, A., & Noordermeer, J. W. (2016). Upscaling of a batch de-vulcanization process for ground car tire rubber to a continuous process in a twin screw extruder., *Materials*, 9(9), 724.
- [24] van Hoek, H., Noordermeer, J., Heideman, G., Blume, A., & Dierkes, W. (2021). Best Practice for De-Vulcanization of Waste Passenger Car Tire Rubber Granulate Using 2-2'-dibenzamidodiphenyldisulfide as De-Vulcanization Agent in a Twin-Screw Extruder., *Polymers*, 13(7), 1139.
- [25] Zhun, L., Yufei, S., Whenhao, W. & Ning, Z. (2014). Patent No. CN104402786A . State Intellectual Property Office of the People's Republic of China.
- [26] FFact. (juni 2020) Beschikbare informatie devulkanisatieproces in Ecotest. Memo met oa. energieverbruik van het devulkanisatieproces.
- [27] Ecomatters. (2018). BBC 2.0: Bringing Circular Economy to Tyres. Ecomatters B.V. Utrecht.
- [28] Verberne, A., Jonkmans, J. & Twigg, C. (2014) US Patent No. 9,580,606, United States Patent and Trademark Office.
- [29] Mandal, A., Pan, S., Mukherjee, S., Saha, A. K., Thomas, S., & Sengupta, A. (2014). Variations in specific heat and microstructure in natural rubber filled with different fillers as studied by differential scanning calorimetry., *Journal of Polymer and Biopolymer Physics Chemistry* 2.1 (2014): 25-28.
- [30] NRC, „Wat je van een oude autoband al niet kunt maken,” 10 03 2017. [Online]. Available: <https://www.nrc.nl/nieuws/2017/03/10/wat-je-van-een-oude-autoband-al-niet-kunt-maken-7295191-a1549760>.

BIJLAGE A: RESULTATEN (GEKARAKTERISEERD)

De gekarakteriseerde resultaten per methode zijn beschreven in dit onderdeel. Hier zijn de 18 impactcategorieën apart vermeld in de bijbehorende eenheid.

Tabel 29 Gekarakteriseerde resultaten granulaat (ambient)

Impactcategorie	Unit	Totaal	Eerste cyclus	Tweede cyclus	Derde cyclus
Global warming	kg CO ₂ eq	4,65E+02	-9,31E+02	1,21E+03	1,84E+02
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	-4,15E-04	-6,32E-04	2,60E-04	-4,35E-05
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	-2,25E+01	-1,84E+01	-3,54E+00	-5,18E-01
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	-3,75E+00	-3,01E+00	-6,38E-01	-9,91E-02
Fine particulate matter formation	kg PM 2.5 eq	-2,37E+00	-1,98E+00	-3,46E-01	-4,35E-02
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	-4,14E+00	-3,36E+00	-6,75E-01	-1,04E-01
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	-5,66E+00	-4,57E+00	-9,59E-01	-1,30E-01
Freshwater eutrophication	kg P eq	-6,19E-02	-3,46E-02	-2,43E-02	-3,01E-03
Marine eutrophication	kg N eq	3,40E-02	3,24E-02	1,70E-03	-1,45E-04
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-2,82E+03	-3,46E+03	5,34E+02	1,06E+02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-7,70E-02	-2,98E-01	2,06E-01	1,50E-02
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-2,91E+00	-2,88E+00	-1,79E-02	-1,20E-02
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	4,48E+01	4,60E+01	-1,09E+00	-1,09E-01
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-2,54E+02	-2,28E+02	-2,52E+01	-1,32E+00
Land use	m ² a crop eq	-5,94E+01	-4,51E+01	-1,29E+01	-1,42E+00
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	-5,32E+01	-5,04E+01	-2,86E+00	-2,40E-02
Fossil resource scarcity	kg oil eq	-1,25E+03	-9,04E+02	-3,03E+02	-4,48E+01
Water consumption	m ³	-2,07E+01	-1,83E+01	-2,27E+00	-1,03E-01

Tabel 30 Gekarakteriseerde resultaten granulaat (cryogeen)

Impactcategorie	Unit	Totaal	Eerste cyclus	Tweede cyclus	Derde cyclus
Global warming	kg CO ₂ eq	-3,19E+02	-8,48E+02	3,53E+02	1,76E+02
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	-1,41E-03	-6,74E-04	-4,92E-04	-2,41E-04
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	-4,30E+01	-2,41E+01	-1,28E+01	-6,10E+00
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	-5,83E+00	-3,34E+00	-1,68E+00	-8,08E-01
Fine particulate matter formation	kg PM 2.5 eq	-4,51E+00	-2,67E+00	-1,24E+00	-5,95E-01
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	-6,45E+00	-3,72E+00	-1,84E+00	-8,86E-01
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	-1,04E+01	-6,01E+00	-2,96E+00	-1,42E+00
Freshwater eutrophication	kg P eq	-4,97E-02	-2,22E-02	-1,84E-02	-9,05E-03
Marine eutrophication	kg N eq	-6,53E-03	-3,36E-03	-2,12E-03	-1,04E-03
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-5,53E+03	-3,32E+03	-1,51E+03	-7,08E+02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-1,98E+00	-7,86E-01	-8,04E-01	-3,90E-01
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-7,43E+00	-3,66E+00	-2,54E+00	-1,22E+00
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	3,73E+01	4,64E+01	-6,17E+00	-2,97E+00
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-3,67E+02	-1,82E+02	-1,25E+02	-6,00E+01
Land use	m ² a crop eq	-7,60E+01	-4,10E+01	-2,37E+01	-1,14E+01
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	-8,81E+01	-5,66E+01	-2,14E+01	-1,02E+01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	-1,94E+03	-1,05E+03	-6,01E+02	-2,89E+02
Water consumption	m ³	-1,65E+01	-9,61E+00	-4,68E+00	-2,25E+00

Tabel 31 Gekarakteriseerde resultaten devulkanisatie

Impactcategorie	Unit	Totaal	Eerste cyclus	Tweede cyclus	Derde cyclus
Global warming	kg CO ₂ eq	-1,00E+03	-1,23E+03	1,54E+02	7,32E+01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	-1,25E-03	-5,79E-04	-4,57E-04	-2,17E-04
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	-4,50E+01	-2,54E+01	-1,33E+01	-6,32E+00
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	-6,59E+00	-3,81E+00	-1,89E+00	-8,97E-01
Fine particulate matter formation	kg PM 2.5 eq	-4,51E+00	-2,68E+00	-1,24E+00	-5,90E-01
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	-7,20E+00	-4,18E+00	-2,05E+00	-9,72E-01
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	-1,09E+01	-6,35E+00	-3,11E+00	-1,48E+00
Freshwater eutrophication	kg P eq	-6,12E-02	-2,96E-02	-2,14E-02	-1,01E-02
Marine eutrophication	kg N eq	9,53E-03	6,11E-03	2,32E-03	1,10E-03
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-7,50E+03	-4,46E+03	-2,06E+03	-9,80E+02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-1,69E+00	-5,85E-01	-7,51E-01	-3,57E-01
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-9,14E+00	-4,63E+00	-3,05E+00	-1,45E+00
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,78E+01	4,09E+01	-8,88E+00	-4,22E+00
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-5,79E+02	-3,07E+02	-1,85E+02	-8,77E+01
Land use	m ² a crop eq	-1,10E+02	-6,10E+01	-3,29E+01	-1,56E+01
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	-1,12E+02	-7,05E+01	-2,80E+01	-1,33E+01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	-1,97E+03	-1,08E+03	-6,07E+02	-2,89E+02
Water consumption	m ³	-5,04E+01	-2,96E+01	-1,41E+01	-6,71E+00

Tabel 32 Gekarakteriseerde resultaten pyrolyse

Impactcategorie	Unit	Totaal	Eerste cyclus	Tweede cyclus	Derde cyclus
Global warming	kg CO ₂ eq	2,01E+02	-3,36E+01	1,59E+02	7,57E+01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	-7,26E-04	-4,34E-04	-1,98E-04	-9,41E-05
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	-2,51E+01	-1,74E+01	-5,22E+00	-2,48E+00
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	-1,87E+00	-1,23E+00	-4,30E-01	-2,04E-01
Fine particulate matter formation	kg PM 2.5 eq	-2,27E+00	-1,55E+00	-4,88E-01	-2,32E-01
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	-2,02E+00	-1,36E+00	-4,51E-01	-2,14E-01
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	-5,25E+00	-3,60E+00	-1,12E+00	-5,32E-01
Freshwater eutrophication	kg P eq	-9,91E-03	-3,78E-03	-4,16E-03	-1,98E-03
Marine eutrophication	kg N eq	2,22E-03	2,14E-03	5,02E-05	2,39E-05
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-4,19E+02	-1,95E+02	-1,52E+02	-7,21E+01
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,22E-01	3,98E-01	-1,87E-01	-8,90E-02
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-1,50E+00	-4,92E-01	-6,81E-01	-3,23E-01
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	5,66E+01	5,76E+01	-6,90E-01	-3,28E-01
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-1,34E+01	2,33E+01	-2,49E+01	-1,18E+01
Land use	m ² a crop eq	-9,27E+00	-4,74E+00	-3,07E+00	-1,46E+00
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	-1,37E+01	-1,29E+01	-5,11E-01	-2,43E-01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	-1,23E+03	-8,41E+02	-2,63E+02	-1,25E+02
Water consumption	m ³	1,71E+00	1,56E+00	1,01E-01	4,80E-02

BIJLAGE B: PROCESKAARTEN

Tabel 33 Proceskaart voor 2-2'-dibenzamidodiphenyldisulfide, op basis van [25]

Ecoinvent proces	Hoeveelheid	Eenheid	Beschrijving
Chemical factory, organics {GLO} market for Cut-off, U	4,00E-10	p	Overgenomen uit generieke data voor (organische) chemicaliën uit ecoinvent
Chloronitrobenzene {GLO} market for Cut-off, U	$0,16/0,58 = 0,276$	kg	160 g o-Nitrochlorobenzene / 58% productive rate
Hydrogen sulfide {RoW} market for hydrogen sulfide Cut-off, U	$(0,075*0,66)/0,58 = 0,0853$	kg	75 g Ammonium hydro sulfide 66% hydrogen sulfide / 58% productive rate
Ammonia, liquid {RoW} market for Cut-off, U	$(0,075*0,33)/0,58 = 0,0427$	kg	75 g Ammonium hydro sulfide 33% ammonia / 58% productive rate
Water, deionised {RoW} water production, deionised Cut-off, U	$0,3/0,58 = 0,517$	kg	300 ml water / 58% productive rate
Water, deionised {RoW} water production, deionised Cut-off, U	$0,03/0,58 = 0,0517$	kg	30g 30% sodium hydroxide solution / 58% productive rate
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, U	$0,01/0,58 = 0,0172$	kg	30g 30% sodium hydroxide solution / 58% productive rate
Water, deionised {RoW} water production, deionised Cut-off, U	$0,3/0,58 = 0,517$	kg	300 ml 30% hydrogen peroxide solution / 58% productive rate
Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RoW} market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state Cut-off, U	$0,1/0,58 = 0,172$	kg	300 ml 30% hydrogen peroxide solution / 58% productive rate
Ethylene dichloride {RoW} market for ethylene dichloride Cut-off, U	$1,33/0,97 = 1,37$	kg	1000 ml proxy voor methylene chloride, dichtheid is 1,33 kg/l / 97% productive rate
Potassium carbonate {GLO} market for Cut-off, U	$0,05/0,97 = 0,0515$	kg	50 g Potasium carbonate / 97% productive rate
Benzyl chloride {RoW} market for benzyl chloride Cut-off, U	$0,2/0,97 = 0,206$	kg	20% proxy voor benzoyl chloride / 97% productive rate
Electricity, medium voltage {GLO} market group for Cut-off, U	0,333	kWh	Overgenomen uit generieke data voor (organische) chemicaliën uit ecoinvent
Heat, district or industrial, natural gas {GLO} market group for Cut-off, U	2	MJ	Overgenomen uit generieke data voor (organische) chemicaliën uit ecoinvent



www.sgssearch.com

ABOUT SGS

SGS is the world's leading inspection, verification, testing and certification company and is recognized as the global benchmark for quality and integrity. With more than 85.000 employees, SGS operates a network of over 1.200 offices and laboratories around the world.

SGS Search Consultancy is een onderdeel van SGS Search Ingenieursbureau B.V.

WHEN YOU NEED TO BE SURE