



Klimaatimpact van afvalverwerkroutes in Nederland

CO₂-kentallen voor recyclen en
verbranden voor 13 afvalstromen



Committed to the Environment

Klimaatimpact van afvalverwerkroutes in Nederland

CO₂-kentallen voor recycelen en verbranden voor 13 afvalstromen

Dit rapport is geschreven door:

Marijn Bijleveld, Mart Beeftink, Maarten Bruinsma en Meis Uijttewaai

Delft, CE Delft, december 2020

Publicatienummer: 20.190400.163

Afval / Afvalverwijdering / Afvalinzameling / Afvalverwerking / Materialen / Recycling / Verbranding / Klimaat / Effecten / VT: Afvalstromen / Kentallen

Opdrachtgever: NVRD

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider [Marijn Bijleveld](#) (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, ngo's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
	Begrippenlijst	8
1	Inleiding	9
2	Aanpak	11
	2.1 Afbakening	11
	2.2 Inventarisatie, modellering en impactanalyse: hoe de analyse wordt uitgevoerd	12
	2.3 Elektriciteit	12
	2.4 Methodische achtergronden transport	13
	2.5 Methodische achtergrondgegevens verbranding	13
3	Papier en karton	15
	3.1 Resultaten: klimaatimpact	15
	3.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	16
4	Kunststoffen	18
	4.1 Resultaat	18
	4.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	20
5	Drankenkartons	24
	5.1 Resultaat	24
	5.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	25
6	Metalen verpakkingen	28
	6.1 Resultaat	28
	6.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	30
7	Glas	34
	7.1 Resultaat	34
	7.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	35
8	Steenachtig materiaal	37
	8.1 Resultaat	37
	8.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	38
9	Textiel	40
	9.1 Resultaat	40
	9.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	41



10	Houtafval	45
	10.1 Resultaat	45
	10.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	46
11	Groente-, fruit- en tuinafval (gft)	49
	11.1 Resultaat	49
	11.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	51
12	Grof tuinafval	55
	12.1 Resultaat	55
	12.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	56
13	Frituurvet en olie	58
	13.1 Resultaat	58
	13.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	59
14	Luiers en incontinentiemateriaal	62
	14.1 Resultaat	62
	14.2 Omschrijving en achtergrondgegevens	63
15	Afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA)	67
	15.1 Resultaat - INDICATIEF	68
	15.2 Achtergrondgegevens recycling van AEEA	69
	Bibliografie	72

Samenvatting

Gescheiden inzameling en recycling van huishoudelijk afval levert een potentiële bijdrage aan CO₂-reductie en hiermee aan het Nederlands klimaatbeleid. Beleidsmakers hebben behoefte aan inzicht in de klimaatimpact, ofwel de CO₂-voetafdruk van recycling en verbranding van materiaalstromen, bij het doen van milieuberekeningen. Een bestaande overzichtsstudie dateert uit 2010 (Corsten, et al., 2010). Sindsdien hebben er ontwikkelingen plaatsgevonden en zijn recentere milieugegevens beschikbaar via de Ecoinvent-database en LCA-studies naar verwerkroutes.

Dit rapport betreft een overzichtsstudie naar de klimaatimpact van verbranding en recycling van dertien afvalstromen. De focus ligt hierbij op afvalstromen die vrijkomen bij huishoudens. Het werk is voornamelijk op basis van bestaande analyses. Voor enkele afvalstromen is aanvullend onderzoekwerk verricht.

Het doel van deze studie is om een eerste-orde-benadering te bieden van de klimaatimpact voor recycling en verbranding van materiaalstromen die vrijkomen uit huishoudens. Vervolgens biedt dit inzicht in het effect van verschuiving van verbranding naar recycling van afvalstromen. De resultaten zijn dus indicatief. Ze zijn gebaseerd op gemiddelde gegevens voor afvalverwerking en zullen niet de absolute waarheid weergeven. De daadwerkelijke situatie kan per verwerker en per gemeente en regio verschillen. Specifieke recyclers kunnen een ander milieuprofiel hebben, bijvoorbeeld als de recycler veel eigen groene stroom opwekt, als er meer of minder verlies van materiaal optreedt, of als de verwerker het materiaal opwerkt tot een specifieke kwaliteit eindproduct. De efficiëntie van energieopwekking verschilt per AVI, wat heel bepalend is voor de klimaatimpact van verbranding van materiaal.

De resultaten zijn te gebruiken door beleidsmakers bij centrale en decentrale overheden in het kader van VANG en bij indicatieve berekeningen van verandering in klimaatimpact bij meer of minder recycling. De resultaten geven inzicht in zowel de klimaatimpact van recycling en verbranding (emissies) als de vermeden klimaatimpact (vermeden emissies door de productie van nuttige grondstoffen of energieopwekking).

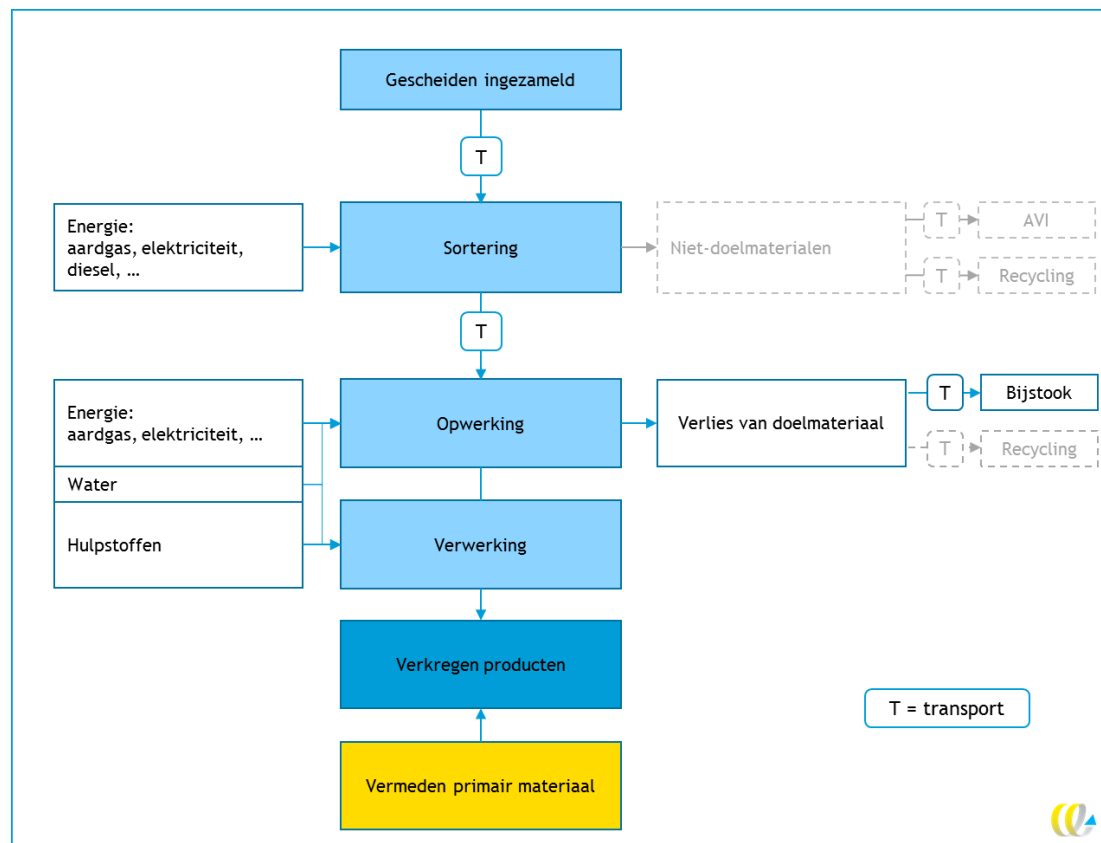
De focus van deze overzichtsstudie ligt op de klimaatimpact. Dit is de naam van het milieueffect dat de emissie van broeikasgassen omvat. CO₂ is het bekendste broeikasgas en daarom wordt de klimaatimpact uitgedrukt in CO₂-equivalenten. Hierin zijn de andere broeikasgassen meegewogen op basis van hoe sterk zij aan klimaatverandering bijdragen. Andere milieueffecten zoals vermesting, fijnstofvorming en biodiversiteitseffecten door landgebruik zijn niet inbegrepen in dit rapport. Verder leidt recycling tot grondstofbehoud en maakt het (meestal) mogelijk om de grondstoffen nog meerdere malen te gebruiken. De klimaatimpact geeft vooral bij materialen van biotische oorsprong – hout, gft, grof tuinafval, frituurvet, papier en karton en drankenkartons – relatief minder gunstige uitkomsten voor recycling dan op bovengenoemde milieueffecten.

Recycling

Figuur 1 toont de afbakening van de recyclingketen: de stappen van afvalopwerking met de inputs (links) en outputs (rechts) die bepalend zijn voor de klimaatimpact is bepaald. Het eindpunt is verkregen recyclaat. Dit recyclaat vermijdt primair materiaal en dat levert een vermeden emissie op, ofwel een klimaatwinst. Deze klimaatwinst is inbegrepen in de

studie om een eerlijke vergelijking met verbranding met energierugwinning te kunnen doen.

Figuur 1 - Procesboom (generiek) die de afbakening van recycling weergeeft



Recycling is in kaart gebracht voor Nederland en voor zover beschikbaar op basis van gegevens van Nederlandse recyclebedrijven zoals energieverbruik, hulpstofgebruik en massabalans (*recycling rate*). Tabel 1 bevat een korte omschrijving van de recyclingroute(s) waarop de resultaten zijn gebaseerd.

Tabel 1 - Korte omschrijving van de in dit rapport gehanteerde recyclingroute per afvalstroom en het verkregen recyclaat

Afvalstroom	Toelichting
Papier en karton	Verwerking in papierrecycling- en papierfabriek tot fluting. Voorafgaand vindt sortering plaats waarbij stoorstoffen worden verwijderd.
Kunststoffen	Recycling via bronscheiding (pmd-systeem), nascheiding en statiegeld. Het hoofdresultaat representeert het gewogen gemiddelde van deze routes, gebaseerd op hoeveelheden kunststof per route in Nederland.
Drankenkartons	Recycling via bronscheiding (pmd-systeem) en verwerker WEPA, ten tijde van de pilot drankenkartonrecycling in het kader van de Raamovereenkomst Verpakkingen.
Metalen verpakkingen	Recycling via bronscheiding (pmd-systeem) en via terugwinning van metalen uit AVI-bodemassen.
Glas	Inzameling via de glasbak en recycling bij Maltha.

Afvalstroom	Toelichting
Steenachtig materiaal	Puin wordt gebroken, waarna het grind vervangt.
Textiel	Inzameling via kledingbakken en mechanische recycling tot (katoen)vezel.
Houtafval	Inzameling via milieustraten; recycling omvat versnippering.
Groente, fruit en tuinafval (gft)	Inzameling via de groene bak; composteren of vergisting met na-compostering.
Grof tuinafval	Inzameling via milieustraten of opgehaald aan huis; recycling omvat versnipperen en composteren.
Frituurvet en olie	Inzameling via inleverpunten; opwerking tot biobrandstof (Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)). Dit is technisch geen recycling, want er wordt een brandstof geproduceerd, maar het is wel de gangbare verwerkroute in Nederland.
Luiers en incontinentie-materiaal	Recycling middels thermische drukhydrolyse; gegevens gebaseerd op pilot-productielocatie van ARN.
Afval elektrische en elektronische apparatuur (AEEA)	Een ruwe inschatting van de impact van recycling via het WEEE-systeem.

Verbranding

Materiaalstromen van huishoudens die niet gescheiden worden ingezameld eindigen in het restafval. Dit restafval wordt opgehaald en naar afvalverbrandingsinstallaties (AVIs) vervoerd. Tijdens de verbranding in een AVI wordt elektriciteit en warmte opgewekt. De netto¹ rendementen die we hanteren in deze studie zijn: 15% elektrisch rendement; 28% thermisch rendement. Dit zijn de meest recente cijfers bij ons bekend, op basis van communicatie met Rijkswaterstaat en zijn ook toegepast in de studie 'Methodiek duurzaam aanbesteden afval voor Rijkswaterstaat' (CE Delft, 2019a).

De hoeveelheid energie die wordt opgewekt is afhankelijk van de verbrandingswaarde (*lower heating value*) van het materiaal. De opgewekte elektriciteit vermijdt de productie van conventionele Nederlandse elektriciteit. De opgewekte warmte vermijdt de productie van warmte opgewekt met aardgas.

Nederland heeft elf AVIs die verschillen in rendement. Bij verbranding in een AVI met hoog rendement zijn er meer vermeden emissies en dus een grotere milieuwinst dan vermeld in dit rapport.

Resultaten

Tabel 2 toont het hoofdresultaat voor verbranding en recycling. Het zijn de nettoresultaten, waar zowel de emissies en de vermeden emissies zijn inbegrepen. De rechterkolom geeft het verschil tussen de nettoresultaten van recycling en verbranding. Een negatief getal betekent een netto klimaatwinst. In die gevallen zijn de vermeden emissies hoger dan de emissies.

¹ Opgewekt en daadwerkelijk nuttig ingezet.

Tabel 2 - Overzicht van de netto resultaten (som van emissies en vermeden emissies) en het verschil met verbranding van het materiaal in een AVI via het restafval

Materialaastroom	Route	Netto* klimaatimpact (kg CO ₂ -eq.)	Verskil met verbranding in AVI
Papier en karton	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	-400	-
	Recycling	-400	0
Kunststoffen	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	1.730	-
	Recycling	-780	-2.510
Drankenkartons	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	360	-
	Recycling - <i>rejects</i> bijgestookt in cementoven	-150	-510
Metalen verpakkingen - staal	Verbranding met energierugwinning (NL AVI) en met terugwinning van metalen uit bodemas	-490	-
	Verbranding met energierugwinning (NL AVI), zonder terugwinning van metalen uit bodemas	30	520
	Recycling	-500	-10
Metalen verpakkingen - aluminium	Verbranding met energierugwinning (NL AVI) en met terugwinning van metalen uit bodemas	-4.750	-
	Verbranding met energierugwinning (NL AVI), zonder terugwinning van metalen uit bodemas	30	4.780
	Recycling	-6.460	-1.710
Glas	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	40	-
	Recycling	-130	-170
Steenachtig materiaal	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	25	-
	Recycling	25	0
Textiel	Verbranding met energierugwinning (NL AVI) - katoen	-330	-
	Recycling - katoen	-2.440	-2.110
	Verbranding met energierugwinning (NL AVI) - polyester	1.410	-
	Recycling - polyester	-1.250	-2.660
Houtafval	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	-360	-
	Recycling	-160	200
Groente, fruit en tuinafval (gft)	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	20	-
	Recycling	-120	-150
Grof tuinafval	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	20	-
	Recycling	-50	-70
Frituurvet en olie	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	-980	-
	Opwerking tot biobrandstof	-3.150	-2.170
Luiers en incontinentie-materiaal	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	280	-
	Recycling	-120	-400
Afval elektrische en elektronische apparatuur (AEEA) - INDICATIEF**	Verbranding met energierugwinning (NL AVI)	500 tot 1.700	-
	Recycling	-2.100 tot 30	-470 tot -3.800

* Netto: som van emissies en vermeden emissies.

** De resultaten van AEEA zijn indicatief, omdat zij zijn gebaseerd op enkele producten en met gegevens van recycling van elektronische producten met een hoge mate van onzekerheid.

NB: Resultaten zijn afgerond op tientallen, met uitzondering van absolute waarden onder 50 kg CO₂-eq.

Door afronding telt het verschil tussen recycling en verbranding niet altijd op.

Begrippenlijst

Term	Toelichting
Afvalverbrandingsinstallatie (AVI)	Een afvalverbrandingsinstallatie die primair is opgericht voor het verbranden van vast stedelijk afval. In Nederland wordt bij elke AVI energie teruggewonnen in de vorm van elektriciteit en warmte. Een andere benaming voor zo'n installatie is ook wel afval-energiecentrale (AEC). In dit rapport hanteren wij echter AVI omdat dit de meest gangbare term is.
Biomassaenergiecentrale (BEC)	Een afvalverbrandingsinstallatie waar huishoudelijk afvalhout dat niet geschikt is voor materiaalhergebruik en de houtfractie uit gft-afval verbrandt, waarbij energie teruggewonnen wordt.
Biotische materialen, biotische oorsprong	Materialen die gemaakt zijn van grondstoffen die worden geteeld of verbouwd, zoals hout, katoen en voedselgewassen. Zij zijn hernieuwbaar (i.e. zij groeien terug) binnen een mensenleven.
Bronscheiding	Gescheiden inzameling bij huishoudens en bedrijven van afvalstromen, ten behoeve van recycling
CO ₂ -kental	Term voor het netto klimaatimpact-resultaat. In dit rapport: het netto klimaatimpactresultaat van recycling of verbranding.
Doelmateriaal	Het materiaal dat bij recycling van een afvalstroom wordt verkregen. Niet-doelmateriaal zijn stoffen die tijdens de recyclingprocessen worden verwijderd.
Ecoinvent	Naam van de grootste database met milieukundige informatie, beschikbaar binnen de SimaPro-software.
Klimaatimpact en Kg CO ₂ -eq.	Klimaatimpact is de naam van het milieueffect dat veroorzaakt wordt door de uitstoot van broeikasgassen. Koolstofdioxide (CO ₂) is het bekendste broeikasgas, daarom wordt de klimaatimpact uitgedrukt in kg CO ₂ -equivalenten. Andere broeikasgassen zijn onder andere methaan (CH ₄), koolmonoxide (CO), stikstofdioxide (N ₂ O) en cfk's.
Levenscyclusanalyse (LCA)	Levenscyclusanalyse (LCA) is een ISO-gestandaardiseerde methode om de totale milieubelasting te bepalen van een product. Dit rapport richt zich alleen op de laatste fase van producten: de afvalverwerking.
Levenscyclusinventarisatie (LCI)	Levenscyclusinventarisatie is de dataverzameling binnen LCA. Het kwantificeert de inputs en outputs van het systeem dat wordt onderzocht. Het systeem is in deze studie de afvalverwerkroute.
Nascheiding	Het scheiden van restafval in deelstromen, ten behoeve van recycling van de nagescheiden deelstromen.
Pmd	Pmd staat voor plastic verpakkingen, metalen verpakkingen en dranken-kartons. Het is de term voor het gezamenlijke inzamelsysteem (bronscheiding) voor deze verpakkingstypen.
Primaire grondstof	Grondstoffen die aan de bodem of natuur onttrokken worden.
Recycling	Het verwerken van afvalstoffen tot nuttig materiaal dat kan worden ingezet in producten, voor het oorspronkelijke doel of voor een ander doel.
Secundaire grondstof	Grondstof van gerecyclede herkomst.
SimaPro	Naam van de LCA-software die CE Delft gebruikt.

1 Inleiding

Dit rapport biedt een overzicht van de klimaatimpact van verbranding en recycling van afvalstromen in Nederland. De resultaten zijn te gebruiken door beleidsmakers bij centrale en decentrale overheden voor milieuberekeningen in het kader van VANG en bij indicatieve berekeningen van verandering in klimaatimpact bij meer of minder recycling. De resultaten geven inzicht in zowel de klimaatimpact van recycling en verbranding (emissies) als de vermeden klimaatimpact (vermeden emissies door de productie van nuttige grondstoffen of energieopwekking).

In opdracht van NVRD heeft CE Delft informatie verzameld op basis van al eerder uitgevoerde analyses door CE Delft en bestaande bronnen met milieukundige informatie over verbranding en recycling. In beperkte mate werd in dit project nieuwe, meest recente informatie opgevraagd bij Nederlandse verwerkers. Wanneer er meerdere recyclingroutes bestaan, zoals bij kunststoffen en gft, heeft CE Delft een gewogen gemiddelde bepaald of de meest gangbare route opgenomen in het rapport.

Er werden dertien materiaalstromen geanalyseerd: papier en karton, kunststoffen, drankenkartons, metalen verpakkingen, glas, steenachtig materiaal, textiel, houtafval, gft, grof tuinafval, frituurvet en olie, luiers en incontinentiemateriaal, en afgedankte elektronische en elektrische apparaten (AEEA). Iedere materiaalstroom heeft zijn eigen hoofdstuk waarin de detailresultaten worden besproken en waarin we verantwoording afleggen over de aanpak en gebruikte bronnen.

Klimaatimpact

Klimaatimpact is de naam van het milieueffect dat veroorzaakt wordt door de uitstoot van broeikasgassen. Broeikasgassen komen bij elke stap in de keten vrij bij de verbranding van fossiele brandstoffen (voor transport en voor energieopwekking voor grondstofwinning en productieprocessen). Bij de productie van klinker uit kalkzandsteen komt CO₂ vrij bij de chemische reactie. Koolstofdioxide (CO₂) is het bekendste broeikasgas, daarom wordt de klimaatimpact uitgedrukt in kg CO₂-equivalenten. Andere broeikasgassen zijn methaan (CH₄), koolmonoxide (CO), stikstofdioxide (N₂O) en cfk's. Bij de berekening van de klimaatimpact in CO₂-equivalenten wordt hun bijdrage aan het broeikaseffect gerelateerd aan het broeikasgaseffect van CO₂. Hiervoor hanteren we de internationale impactanalysemethode 'IPCC GWP 2013 100a' (Pachauri, et al., 2014).

Er zijn meer milieueffecten bij de productie, recycling en verbranding van materialen. Denk aan vermesting, fijnstofvorming en biodiversiteitseffecten door landgebruik. Dit soort effecten zijn niet berekend in dit onderzoek. Verder leidt recycling tot grondstofbehoud en maakt het (meestal) mogelijk om de grondstoffen nog meerdere malen te gebruiken. De klimaatimpact geeft vooral bij materialen van biotische oorsprong – hout, gft, grof tuinafval, frituurvet, papier en karton en drankenkartons – relatief minder gunstige uitkomsten voor recycling dan op bovengenoemde milieueffecten.

Biotische materialen hebben een lage klimaatimpact voor productie (teelt). Daarom is de klimaatwinst van recycling, door vermeden productie, relatief laag voor biotische materialen. Wel zijn ook andere milieuthema's relevant zoals vermesting, waterverbruik en gebruik van vruchtbaar land voor nodig. In bredere milieustudies zien we een winst door recycling op dit soort milieuthema's.

Generieke resultaten: gemiddelde Nederlandse afvalverwerking

De resultaten zullen niet de absolute waarheid weergeven. Daadwerkelijke situatie op gemeenteniveau kan verschillen. De efficiëntie van energieopwekking verschilt per AVI, wat heel bepalend is voor de klimaatimpact van verbranding van materiaal. Ook kunnen specifieke recyclers een ander milieuprofiel hebben, bijvoorbeeld als de recycler veel eigen groene stroom opwekt, als er meer of minder verlies van materiaal optreedt, of als de verwerker het materiaal opwerkt tot een specifieke kwaliteit eindproduct.

2 Aanpak

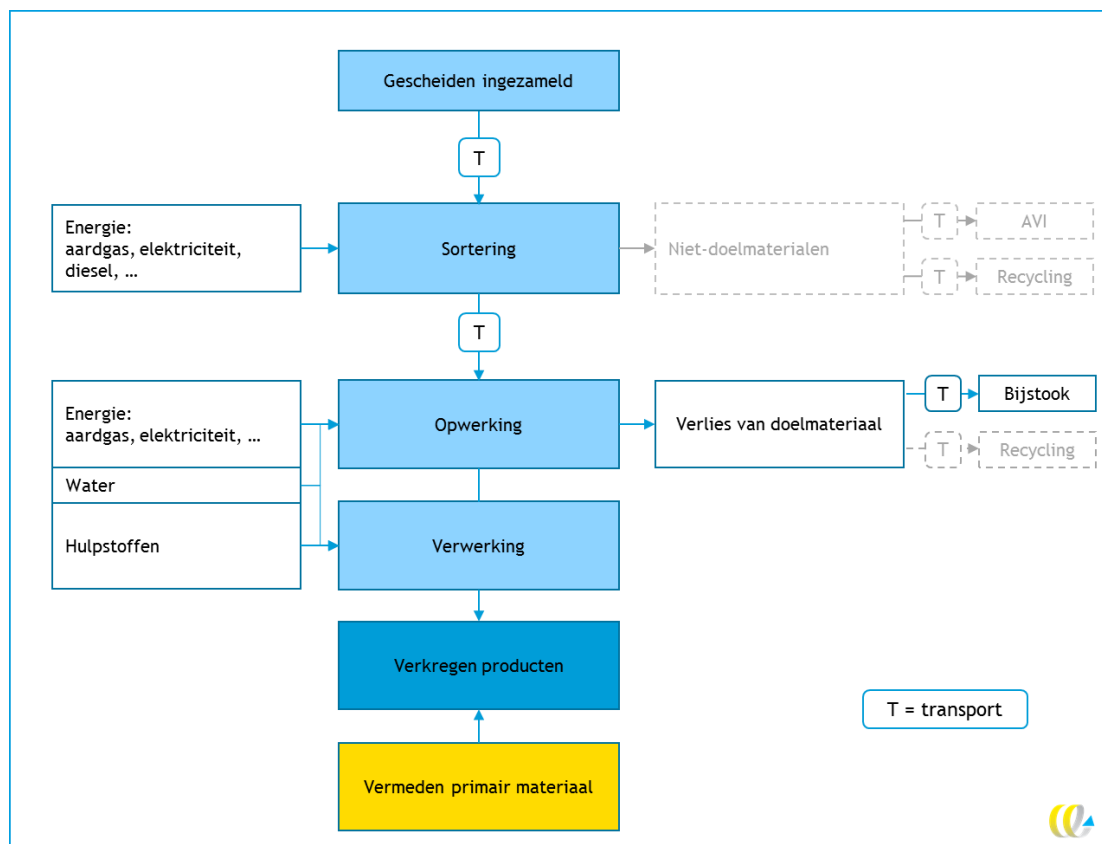
2.1 Afbakening

Onderwerp van de analyse is het verbranden en recycelen van **1 ton materiaal** dat is afgedankt door huishoudens in Nederland. Bij recycling betreft het 1 ton gescheiden ingezameld materiaal of 1 ton nagescheiden materiaal uit restafval (kunststoffen, metalen); bij verbranding betreft het 1 ton van het materiaal in het restafval.

De afbakening van de analyse voor de recyclingroutes per ton materiaal is schematisch weergegeven in Figuur 2. Dit is een generieke procesboom, waarin staat welke stappen en bijbehorende inputs en outputs zijn inbegrepen. Voor recycling van elke materiaalstroom hebben we een specifieke procesboom opgesteld, zie hiervoor de hoofdstukken per materiaal. Voor verbranding is de procesboom voor iedere materiaalstroom gelijk van opzet; zie hiervoor Paragraaf 2.5.

Merk op dat geen inzamelratio is inbegrepen. Het gaat puur om materiaal dat wel of niet wordt gerecycled. Een voorbeeld: van oud papier & karton is bekend dat jaarlijks 85% gescheiden wordt ingezameld voor recycling. Die factor 85% is niet inbegrepen in het resultaat.

Figuur 2 - Procesboom (generiek) die de afbakening van de recyclingketen weergeeft



Enkele toelichtingen bij de afbakening van de analyse, zoals ook weergegeven in Figuur 2:

- De analyse omvat de benodigde verwerkstappen, zoals sortering, op- of voorbereiding en eindverwerking. Ook eindverwerking kan weer uit diverse deelstappen bestaan, denk aan versnipperen, wassen, drogen en/of granuleren van kunststoffen. Het verschilt per materiaalstroom welke verwerkstappen plaatsvinden.
- Transportbewegingen voor inzameling en tussen de verwerkstappen zijn inbegrepen.
- Om eerlijke vergelijking tussen recycling en verbranding mogelijk te maken wordt bij beiden de vermeden emissies inbegrepen. Bij verbranding gaat het om vermeden emissies door opgewekte energie; dit vermijdt conventionele elektriciteit (gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix) en warmte opgewekt met aardgas. Bij recycling gaat het om vermeden emissies door verkregen recyclaten, wat de productie primair materiaal vermijdt. Deze vermeden emissies zijn negatieve waarden in de tabellen en grafieken.
- Ook verlies van doelmateriaal is inbegrepen. Dat is materiaal dat niet gerecycled wordt maar alsnog wordt verbrand in een AVI of bijgestookt.
- Niet inbegrepen is het verlies van ‘niet-doelmateriaal’: stoffen die worden verwijderd voorafgaand aan de eindverwerking. Vaak worden de stoffen zelf nog gerecycled via andere routes, denk aan de metalen deksels in de glasbak. Energieverbruik voor het verwijderen van stoffen is wel inbegrepen.
- Energie omvat ingekochte energie en zelf opgewekte (hernieuwbare) energie. Teruggewonnen energie, bijvoorbeeld door warmtekrachtkoppeling (wkk), is impliciet inbegrepen omdat het de hoeveelheid ingekochte energie vermindert

2.2 Inventarisatie, modellering en impactanalyse: hoe de analyse wordt uitgevoerd

Om de klimaatimpact te bepalen van een verwerkroute of van verbranding is informatie nodig over aspecten die tot de uitstoot van broeikasgassen leiden. Zoals energieverbruik voor recycleprocessen, transportafstanden en energieopwekkingsefficiëntie bij afvalverbrandingsinstallaties (AVIs). Voor veel van de materiaalstromen hebben we deze zogeheten ‘voorgrondinformatie’ beschikbaar uit eerder onderzoek door CE Delft of andere (LCA-)onderzoeksbureaus. De voorgrondinformatie over verwerkstappen (recycling) is in de meeste gevallen afkomstig van bedrijven in de recycleketen.

Dit soort ‘voorgrondinformatie’ koppelen we aan milieukundige achtergrondinformatie uit de Ecoinvent-database versie 3.5 (Ecoinvent, 2020). Ook bevat de Ecoinvent-database informatie over verbrandingsemissies van materialen. Dit ‘modelleren’ – het in kaart brengen van de recycleketen en de verbrandingsroute – doen we in het LCA-programma SimaPro (versie 9.0).

De klimaatimpact wordt vervolgens berekend met impactanalysemethode ‘IPCC Global Warming Potential 2013, 100a’. Deze methode berekent de uitstoot van alle broeikasgassen die vrijkomen en drukt ze uit in CO₂-equivalenten.

2.3 Elektriciteit

Bij de meeste recycleprocessen wordt elektriciteit gebruikt. Bij verbranding wordt elektriciteit opgewekt, waardoor de productie van conventionele elektriciteit wordt vermeden. Voor alle materiaalstromen hebben we dezelfde elektriciteitsmix gemodelleerd. Als bij een bestaand onderzoek een oudere elektriciteitsmix was gehanteerd, hebben we dit aangepast voor dit project. Zo ontstaan er geen onnodige verschillen.

In dit project zijn we uitgegaan van de meest recente cijfers over de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix bij ons beschikbaar. De emissies van opwekking van elektriciteit uit de diverse bronnen in 2018 leidt tot een CO₂-uitstoot van productie van 405 gram/kWh (PBL, 2019). CE Delft heeft daaraan de ketenemissies² toegevoegd (CE Delft, 2020a). Het resultaat, dat opgenomen is op CO₂emissiefactoren.nl en waar wij mee rekenen, is 480 gram CO₂-eq./kWh.

2.4 Methodische achtergronden transport

Transportbewegingen zijn inbegrepen in de analyse. De impact van een vervoersmiddel wordt uitgedrukt in ‘tonkilometers’: de impact om een bepaald gewicht over een bepaalde afstand te transporteren. Het *gewicht* dat wordt getransporteerd volgt uit de massabalans, met als vertrekpunt 1 ton materiaal. Voor de *afstand* hebben we ervoor gekozen om gelijke afstanden te hanteren voor alle materiaalstromen:

Tabel 3 - Transportafstanden gehanteerd in deze studie

Transportbeweging	Afstand	Toelichting
Materiaal in restafval: van straatkant naar AVI	100 km	Deze afstand is overgenomen uit de Bepalingsmethode Gebouwen en GWW-werken (SBK, 2014).
Van gescheiden inzameling naar overslag/sortering	50 km	Deze afstand is overgenomen uit de Bepalingsmethode Gebouwen en GWW-werken (SBK, 2014).
Van overslag/sortering naar verwerking	100 km	Inschatting, aansluitend bij de Bepalingsmethode Gebouwen en GWW-werken (SBK, 2014) voor transport naar AVI (ook een vorm van eindverwerking).

Deze standaardafstanden (‘forfaitaire waarden’ uit de Bepalingsmethode Gebouwen en GWW-werken) zijn gehanteerd omdat we geen specifieke afstanden per materiaal tot onze beschikking hebben. Specifieke afstanden zijn niet geïnventariseerd in deze studie. Voor sommige verwerkroutes zullen de afstanden aan de hoge kant zijn (gft, waarvoor vele installaties bestaan); bij andere zullen de afstanden aan de lage kant zijn (kunststof, dat op enkele locaties in Nederland en Duitsland verwerkt wordt).

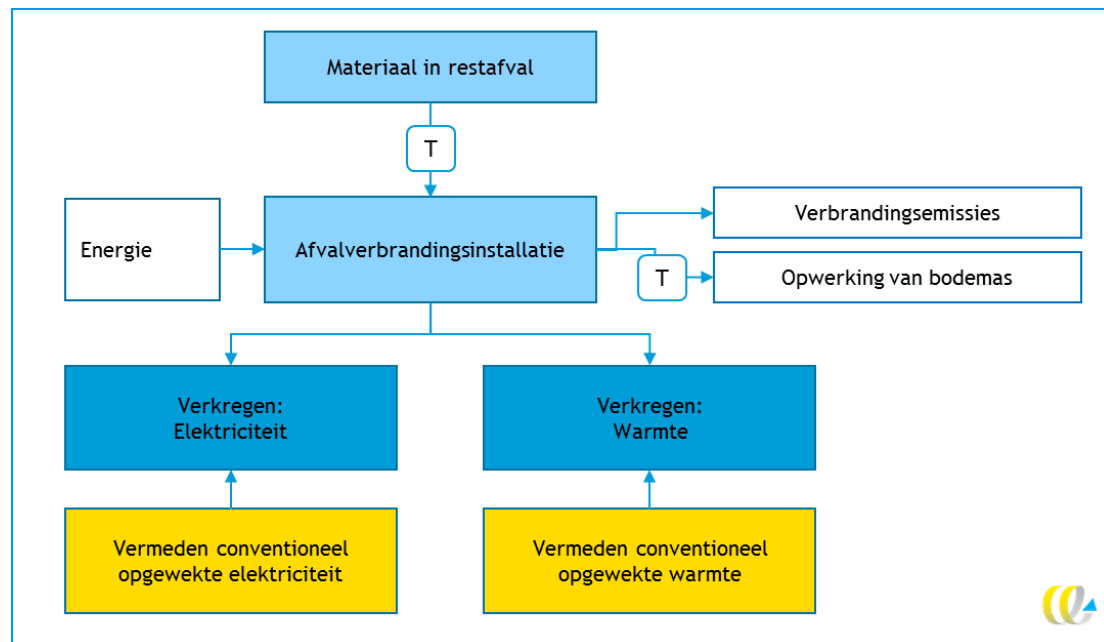
Ook het transportmiddel hebben we gelijkgesteld voor alle materiaalstromen, namelijk een grote vrachtwagen, Euroklasse 5. De geselecteerde dataset uit de Ecoinvent-database is: “Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}”.

2.5 Methodische achtergrondgegevens verbranding

Materiaalstromen van huishoudens die niet gescheiden worden ingezameld eindigen in het restafval. Dit restafval wordt opgehaald en naar afvalverbrandingsinstallaties (AVIs) vervoerd. Tijdens de verbranding in een AVI wordt elektriciteit en warmte opgewekt. Een deel daarvan wordt nuttig toegepast: elektriciteit wordt geleverd aan het elektriciteitsnet, warmte wordt ingezet voor verwarming van het eigen complex, voor stadsverwarming of in naburige industrie. De procesboom voor de afvalverbrandingsroute voor materiaalstromen is weergegeven in Figuur 3.

² De emissies geassocieerd met de productie van de energiedragers zelf (kolen, gas, biomassa, etc.) en elektriciteitscentrale/zonnepaneel/windmolen/waterkrachtcentrale.

Figuur 3 - Procesboom verbranding van materiaal in de AVI via restafval



In deze studie is gehanteerd: 15% elektrisch rendement van de AVI, 28% thermisch rendement. Dit zijn de meest recente cijfers bij ons bekend, op basis van communicatie met Rijkswaterstaat, en zijn ook toegepast in de studie ‘Methodiek duurzaam aanbesteden afval voor Rijkswaterstaat’ (CE Delft, 2019a).

De hoeveelheid energie die wordt opgewekt is afhankelijk van de verbrandingswaarde (*lower heating value*) van het materiaal. De opgewekte elektriciteit vermijdt de productie van conventionele Nederlandse elektriciteit. De opgewekte warmte vermijdt de productie van warmte opgewekt met aardgas. De volgende datasets zijn gebruikt:

- vermeden conventionele elektriciteit: klimaatimpact per kWh op basis van de studie “Emissiekentallen elektriciteit 2018” (CE Delft, 2020a);
- vermeden conventionele warmte: heat, district or industrial, natural gas {NL}| heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical.

3 Papier en karton

In Nederland wordt oud papier en karton (OPK) apart ingezameld en gerecycled. OPK dat in het restafval belandt wordt verbrand (RWS, 2019a).

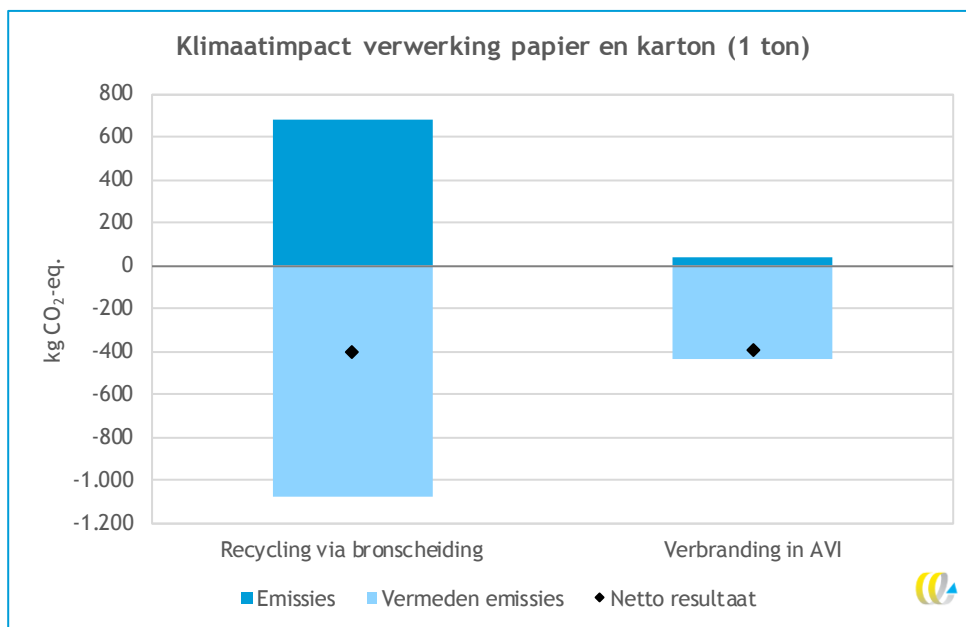
3.1 Resultaten: klimaatimpact

De resultaten worden getoond in Figuur 4 en Tabel 4. Te zien is dat OPK-recycling voor aanzienlijk meer vermeden emissies zorgt, doordat een groot deel van het OPK opnieuw gebruikt kan worden. De klimaatimpact van recycling is echter hoger dan de klimaatimpact van verbranding, waardoor de netto klimaatimpact per ton OPK vrijwel gelijk is voor recycling en verbranding.

Goed om te realiseren is dat papiervezels ongeveer zes tot zeven keer gerecycled kunnen worden (Papier en karton, 2020). Pas dan zijn de vezels te kort voor recycling, vallen uit tijdens het recyclingproces en worden verbrand (bijstook in kolengestookte centrale of cementoven). Als papier of karton direct verbrand wordt in een AVI, gaat het materiaal al na één gebruikscyclus verloren.

Papier en karton zijn van biotische oorsprong. Recycling van papier en karton voorkomt zo ook andere impacts dan klimaatimpact, gerelateerd aan bosbouw en landgebruik.

Figuur 4 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton oud papier en karton



Tabel 4 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton oud papier en karton

	Recycling via bronscheiding	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-400	-400	kg CO ₂ -eq.
Waarvan emissies	680	40	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-1.080	-440	kg CO ₂ -eq.
Verschil met verbranding in AVI	Verwaarloosbaar	N.v.t.	

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

3.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

3.2.1 Recycling van papier en karton

Voor recycling maken we gebruik van gegevens van een sorteerder in Rotterdam en de recycler DS Smith De Hoop in Eerbeek. Deze gegevens zijn afkomstig van een eerder onderzoek van CE Delft uit 2018 (niet openbaar). Bij dit bedrijf wordt OPK gerecycled tot golfkarton. Recycling naar andere producten is niet meegenomen, aangezien hier geen informatie van beschikbaar is.

Ecoinvent biedt ook proceskaarten voor papierrecycling, maar de branchevereniging Vereniging Papier- en Kartonproducenten Nederland geeft aan dat specifieke gegevens van Nederlandse recyclers te prefereren zijn boven generieke gegevens over OPK-recycling uit de Ecoinvent-database. Dit omdat het energieverbruik in Ecoinvent volgens hen duidelijk te hoog is, met name het elektriciteitsverbruik (VNP, 2017).

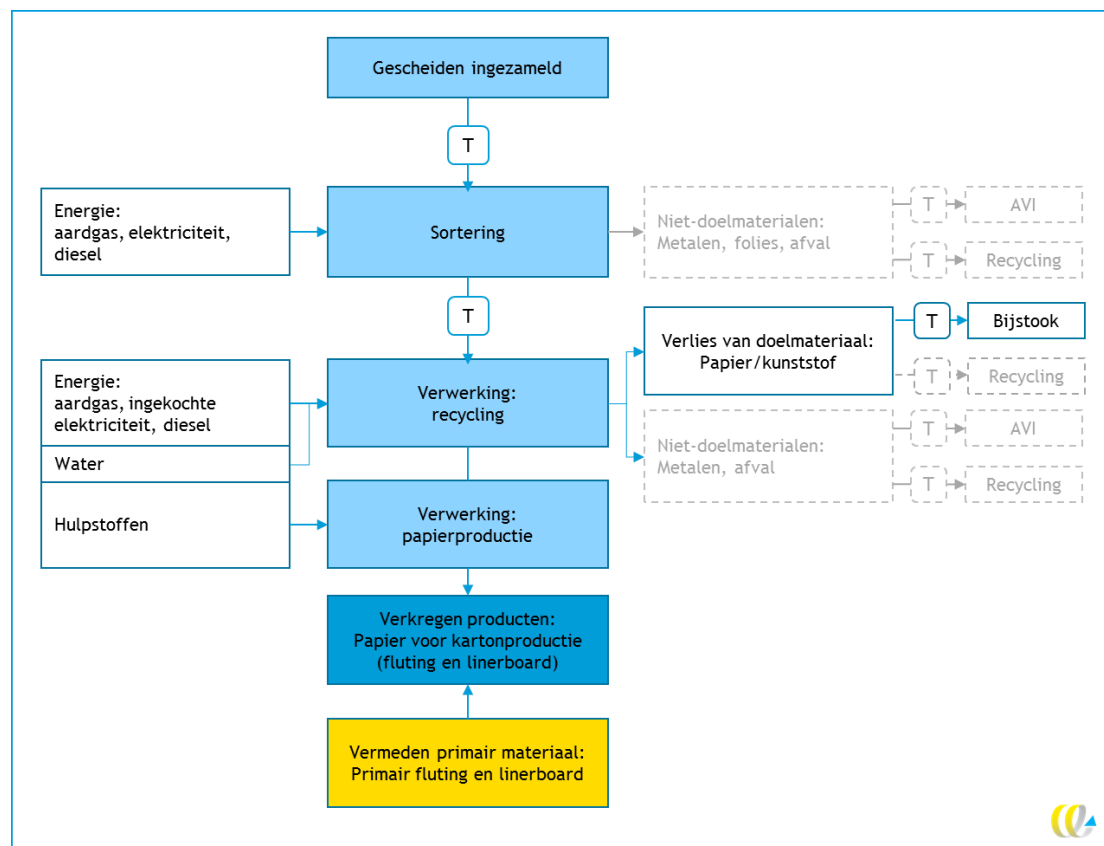
Na gescheiden inzameling wordt het OPK naar een overslag- en sorteerlocatie vervoerd. Daar worden stoorstoffen uit het OPK gehaald, zoals metalen, folies die om tijdschriften zijn blijven zitten.

Recycling betreft verpulpen en zeven. Het OPK wordt opgelost in water en vervolgens worden in diverse stappen andere materialen dan papiervezels verwijderd, zoals nietjes, de kunststofcoating van folders en tijdschriften en adresvensters van enveloppen. Bij de verwijdering van deze materialen gaat ook een deel van de papiervezels verloren. De afvalstromen die bestaan uit kunststof en/of papier, afkomstig van het OPK, worden bijgestookt als '*refuse derived fuel*' (RDF) in kolengestookte centrales. Afvalstromen die niet geschikt zijn voor bijstook worden verbrand in een AVI.

De gezuiverde papierpulp gaat in een continu proces door naar papierproductie. Hierbij wordt het water verwijderd en de papiervezels gedroogd, samengeperst en op rollen gewikkeld voor verkoop aan kartonproducenten.

Figuur 5 toont de diverse stappen in het recycleproces en toont op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyse is inbegrepen.

Figuur 5 - Procesboom systeemgrenzen recycling van papier en karton



Doordat we voor papier gebruik hebben gemaakt van bedrijfsspecifieke data worden de in- en outputs van het recycelen van 1 ton ingezameld OPK niet weergegeven in dit rapport.

3.2.2 Verbranding van papier en karton

Als OPK niet wordt gerecycled, wordt het verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies en vermeden emissies zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 - In- en outputs van verbranding van OPK

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding OPK	1 ton	Waste paperboard {CH} treatment of, municipal incineration	
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	-2.390 MJ	Nederlandse elektriciteitsmix	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van OPK is 15,9 MJ/kg volgens Ecoinvent en CE Delft (2018b).
Vermeden warmte	-4.460 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden van warmte uit aardgas. De LHV van OPK is 15,9 MJ/kg volgens Ecoinvent en CE Delft (2018b).

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

4 Kunststoffen

Kunststof verpakkingen worden in Nederland via drie routes gerecycled: via statiegeld, bronscheiding en nascheiding. Via statiegeldsysteem worden nu de grotere PET-flessen ingezameld. Kleine PET-flesjes worden daar in juli 2021 aan toegevoegd. Het pmd-systeem is opgezet voor scheiden aan de bron: consumenten leveren kunststof verpakkingen via dat systeem gescheiden in. Nascheiding is mechanische sortering van kunststof verpakkingen uit het restafval. Bij bron- en nascheiding gaat het daarbij om de bulkplastics: PET, PP, LDPE-folies en HDPE.

Kunststof producten (niet-verpakkingen) kunnen in Nederland worden ingezameld via de milieustraat. Deze route is niet geanalyseerd; producten als piepschuim (EPS) en grote pvc-producten zoals tuinstoelen zijn niet inbegrepen in deze analyse. Kunststof behuizingen van apparaten zijn ten dele inbegrepen bij recycling van AEEA (Hoofdstuk 15).

Zoals ook toegelicht in Hoofdstuk 2, richt deze analyse zich op 1 ton gescheiden afvalmateriaal. Voor kunststof betekent dat al gescheiden ingezameld door de consument, in de pmd-bak of ingeleverd via statiegeld, of mechanisch nagescheiden kunststof. De inzamelrespons en het nascheidingsrendement zijn zodoende niet in de massabalans inbegrepen. Het energieverbruik voor nascheiding per ton nagescheiden kunststof is wel inbegrepen.

Een groot deel van de milieukundige gegevens, die ten grondslag liggen aan de resultaten voor kunststof, is afkomstig uit eerdere studies voor Vereniging Afvalbedrijven (VA) (CE Delft, 2011) en het Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV; (CE Delft, 2018a). De resultaten uit deze studies komen voort uit interviews met nascheiders, sorteerdere en verwerkers van kunststoffen. Voor dit project voor de NVRD zijn weer enkele milieugegevens geactualiseerd. Zie Paragraaf 4.2 voor een nadere toelichting.

4.1 Resultaat

Figuur 6 en Tabel 6 tonen de klimaatimpact van 1 ton gemengd kunststof uit huishoudens. Voor recycling tonen we ook de resultaten voor 1 ton gemengd kunststof via bronscheiding en nascheiding tezamen, en 1 ton PET via statiegeld. In het gewogen gemiddelde resultaat (links) is rekening gehouden met de gemiddelde samenstelling gemeten aan de poort bij bron- en nascheiders en met de verdeling van materiaal naar bronscheiding, nascheiding en statiegeld.

De resultaten geven aan dat recycling van kunststof een netto klimaatwinst oplevert. Verbranding van kunststof leidt tot een netto klimaatimpact. Kunststof is hoogcalorisch en levert bij verbranding relatief veel energie op, maar daar staat ook een relatief hoge fossiele CO₂-emissie tegenover, want kunststof is een materiaal van fossiele basis.

De resultaten voor recycling via bron- en nascheiding zijn samengenomen, omdat de resultaten in onze analyse bij elkaar in de buurt liggen. Ook vinden wij het niet gerechtvaardigd om het verschil tussen bron- en nascheiding als 'harde werkelijkheid' te presenteren, gezien de onzekerheden in de modellering (zie ook verder in deze paragraaf).

De resultaten voor recycling wordt bepaald door een veelheid van factoren: Energieverbruik, hulpstofverbruik, verlies aan materiaal en kwaliteit van het eindproduct en het type primair materiaal dat dit vermijdt. Maar ook de verdeling naar type kunststof

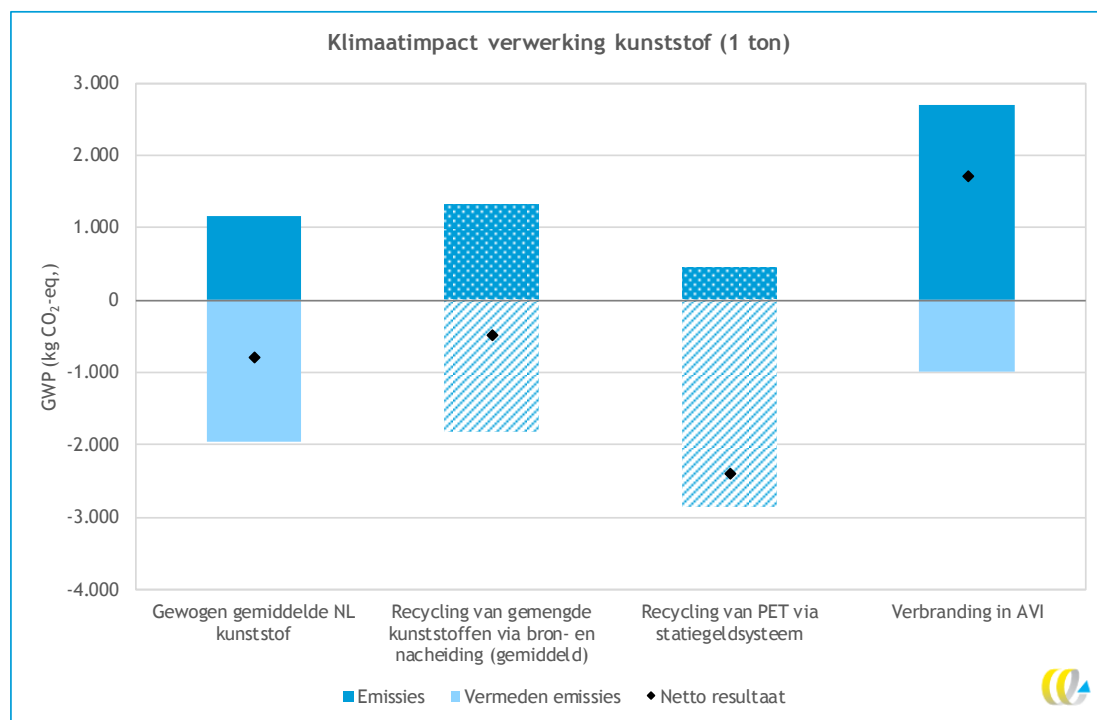
speelt een rol. In vergelijking met de andere kunststoffen levert PET-recycling netto het meeste klimaatwinst op per ton. Het recycleren 1 ton LDPE via bron- of nascheiding, bijvoorbeeld levert minder klimaatwinst op dan het recycleren van 1 ton PET via bron- of nascheiding, mede omdat het vermijden van PET een grotere klimaatwinst oplevert.

Ook de toepassing van het recyclaat is een belangrijke factor. Een behoorlijk deel van de gesorteerde kunststoffen belandt in de mixed-fractie. De mixed-kunststoffractie wordt verwerkt tot dikwandige producten als paaltjes, straatmeubilair of beschoeiingen. Dit resulteert ook in een klimaatvoordeel, maar dat voordeel is lager dan het klimaatvoordeel van uitgesorteerde monostromen (PE, PP of PET). Er wordt gestreefd naar een hoger aandeel monostromen in plaats van mixed. Als dit gerealiseerd gaat worden dan neemt het klimaatvoordeel van bron- en nascheiding toe.

CE Delft benadrukt dat alle typen inzameling voor recycling – statiegeld, bronscheiding en nascheiding – hun meerwaarde hebben. Vooral wanneer ze in combinatie met elkaar worden toegepast.

Er zit enige onzekerheid op de resultaten van kunststofrecycling via bron- en nascheiding. We schatten deze onzekerheid ruwweg in op 30%. Die onzekerheid komt met name voort uit het feit dat we niet voor elke verwerkroute bedrijfsgegevens beschikbaar hebben (energieverbruik, massabalans). Vooral de verwerking van de mixed-fractie is onzeker.

Figuur 6 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton gemengd kunststof uit huishoudens



Tabel 6 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton gemengd kunststof uit huishoudens

	Recycling: gewogen gemiddelde resultaat kunststoffen uit huishoudens	Recycling van 1 ton gemengde kunststoffen via bron- en nascheiding (gemiddeld) tot mono- en mixed-kunststof-eindproducten	Recycling: kunststof via statiegeldsysteem tot PET en PP (mono-kunststof)	Verbranding in AVI	Eenheid
Emissies	1.170	1.320	460	2.710	kg CO ₂ -eq.
Vermeden emissies	-1.950	-1.810	-2.850	-980	kg CO ₂ -eq.
Netto resultaat	-780	-490	-2.390	1.730	kg CO₂-eq.
Vershil met verbranding in AVI	-2.510	2.220	Niet vergelijkbaar (alleen PET)	N.v.t.	kg CO ₂ -eq

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

4.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

4.2.1 Recycling van kunststoffen

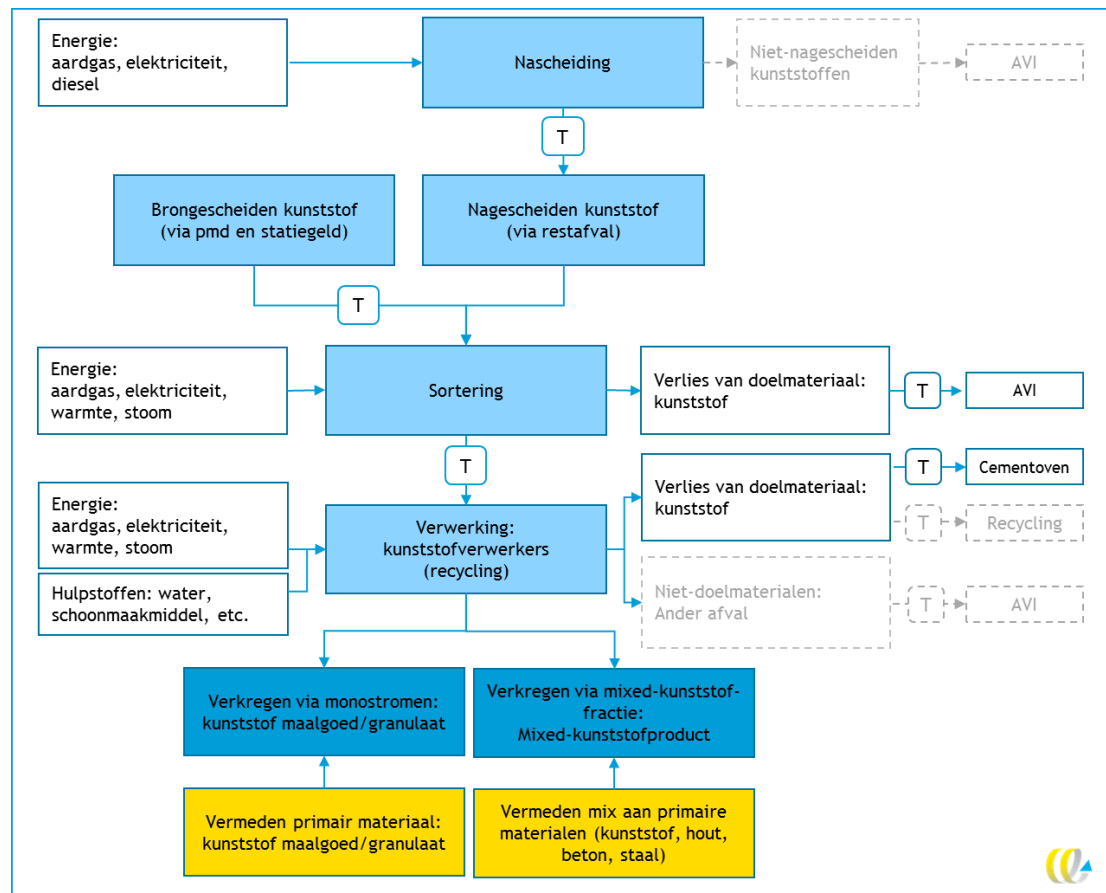
Figuur 7 toont de processtappen in de recyclingketen. Gescheiden kunststof wordt verkregen via nascheiding bronscheiding (het pmd-systeem) en het statiegeldsysteem. Nascheiders en sorteerdere sorteren de diverse kunststoffen in enkele gestandaardiseerde stromen, zogeheten DKR-stromen³. De normen/richtlijnen van DKR geven aan hoeveel stoorstoffen en niet-doelmaterialen (ander type plastics) er nog aanwezig mogen zijn.

De in balen geperste, gesorteerde DKR-stromen worden verkocht aan verwerkers. Er zijn vele verwerkers actief in Nederland, die zich richten op een of meerdere DKR-stromen. Het verschilt per verwerker hoe ver zij gaan in de opwerking van kunststof en welke eindproducten zij leveren. Opwerkstappen kunnen omvatten: nasorteren, vermaleren, op kleur scheiden, wassen en drogen, agglomereren, regranuleren en/of kristalliseren en nacondenseren.

Bij sortering en verwerking gaat een klein deel (enkele procenten) van het doelmateriaal verloren. Het wordt dan verbrand in een AVI (sorteeruitval) of bijgestookt bij bijvoorbeeld cementproductie (uitval bij verwerking); die verbranding is inbegrepen in de analyse. Verwerking: verschillende opwerkstappen, tot verschillende kwaliteit. Het verkregen materiaal heeft een bepaalde kwaliteit; dit gerecyclede materiaal vermijdt de productie van primair kunststof.

³ De DKR-normen schrijven voor hoeveel stoorstoffen en niet-doelmateriaal (ander type plastics) er aanwezig mogen zijn. Zo weten verwerkers waar zij aan toe zijn. De DKR-normen zijn te vinden op [de website van Der Grüne Punkt](#).

Figuur 7 - Processtappen recycling van kunststof, ingezameld via het bronscheidings-, nascheidings- of statiegeldsysteem



Het voert te ver om in dit hoofdstuk volledig verslag te doen van alle brongegevens die ten grondslag liggen aan de analyse. Gegevens zoals energieverbruik en massabalansen zijn bedrijfsgegevens die ons in vertrouwen zijn toegezonden. Hier geven we een overzicht op hoofdlijnen van de omvang van de beschikbare gegevens.

In 2011 bracht CE Delft de gehele Nederlandse recyclingketen van kunststof verpakkingen-afval uit huishoudens in kaart (CE Delft, 2011). Het project was in opdracht voor de Vereniging Afvalbedrijven en met inspraak en input van vele spelers in de kunststof-recyclingketen. We ontvingen bedrijfsinformatie van sorteerder SUEZ, nascheiders Attero en Omrin, die inmiddels zelf ook hun gescheiden kunststof deels verwerken, en acht verwerkers van DKR-stromen in Nederland en Duitsland. Voor details over de toenmalige modellering verwijzen we naar hoofdstuk 4 van (CE Delft, 2011).

In 2018 kwam hier vervolg op voor het KIDV (CE Delft, 2018a). Het achtergrondrapport is niet openbaar; resultaten werden opgenomen in het kunststofketenproject van KIDV. Aanpassingen en uitbreidingen ten opzichte van (CE Delft, 2011) zijn:

- Uitbreiding van verwerking van de DKR-stromen met gegevens van drie verwerkers (LDPE, PP en mixed kunststoffen).
- Uitbreiding met een massabalans en samenstellingen door de keten heen, om een gewogen gemiddelde te kunnen bepalen voor gemiddelde kunststofverwerking in

Nederland. Dit omvat een uitgebreid onderzoek naar de massabalans bij sortering en nascheiding: welk deel van ieder type kunststof belandt in de monostroom en in de mixed-kunststoffractie.

Actualisatie 2020

Deze actualisatie staat in het teken van actualiseren van gegevens over verwerking die nog uit 2010 stamden. In totaal hebben we twaalf verwerkers gesproken waarvan er zes aangaven mee te willen werken aan het onderzoek. Helaas gaven enkele verwerkers uiteindelijk aan toch geen informatie te kunnen verstrekken, vanwege gebrek aan tijd (ondanks een doorlooptijd van enkele maanden) of capaciteit, in de meeste gevallen vanwege de COVID-19-crisis.

We hebben onze modellering kunnen uitbreiden en verbeteren met aanvullende, recente gegevens van verwerking van PET via statiegeld en LDPE via bronscheiding en nascheiding. Verwerking is hierdoor in de breedte goed in beeld, hoewel de verwerking van enkele DKR-stromen nog steeds op basis van gegevens uit 2011 is.

Verder zijn uiteraard de algemene actualisaties van elektriciteitsproductie en AVI-rendementen doorgevoerd (Paragrafen 2.3 en 2.5).

Op onze wensenlijst blijft staan, om de modellering verder te verbeteren:

- verbetering van energieverbruik en het uitvalspercentage⁴ bij mixed-kunststof-verwerking en HDPE-verwerking;
- differentiatie per DKR-stroom naar de mate van opwerking: opwerking naar *flakes* kost minder energie dan opwerking naar granulaten en *compounds*, maar levert ook een ander eindproduct op;
- over enkele jaren: wederom actualiseren van de massabalans, met name de verhouding bij nascheiding en sortering naar mono- en mixed-fractie.

4.2.2 Verbranding van kunststoffen

Voor emissies en vermeden emissies van 1 ton kunststof hanteren we een marktsamenstelling van kunststoffen uit huishoudens. De samenstelling is op basis van (RWS, 2016).

Tabel 7 - In- en outputs van verbranding van kunststof

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding PET-flessen	141 kg	Waste polyethylene terephthalate {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	LHV 23 MJ/kg
Verbranding PET-trays	128 kg	Waste polyethylene terephthalate {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	LHV 23 MJ/kg
Verbranding HDPE	141 kg	Waste polyethylene {Europe without Switzerland} treatment of waste polyethylene, municipal incineration	LHV 43 MJ/kg
Verbranding LDPE	346 kg	Waste polyethylene {Europe without Switzerland} treatment of waste polyethylene, municipal incineration	LHV 43 MJ/kg

⁴ Het aandeel doelkunststof dat bij de opwerking niet wordt gerecycled, bijvoorbeeld vanwege verkleefing met een ander materiaal.

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Verbranding PP	167 kg	Waste polypropylene {CH} treatment of, municipal incineration	LHV 33 MJ/kg
Verbranding overige kunststoffen	77 kg	Waste plastic, mixture {Europe without Switzerland} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration	LHV 23 MJ/kg*
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	Verschilt per type kunststof. Tussen 3 en 6,5 MJ/kg	Nederlandse elektriciteitsmix (zie Paragraaf 2.3)	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Vermeden warmte	Verschilt per type kunststof. Tussen 6 en 12 MJ/kg	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden van warmte uit aardgas.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

* De verbrandingswaarde voor 'overig kunststof' is een conservatieve benadering, op basis van de verbrandingswaarde van PET.

5 Drankenkartons

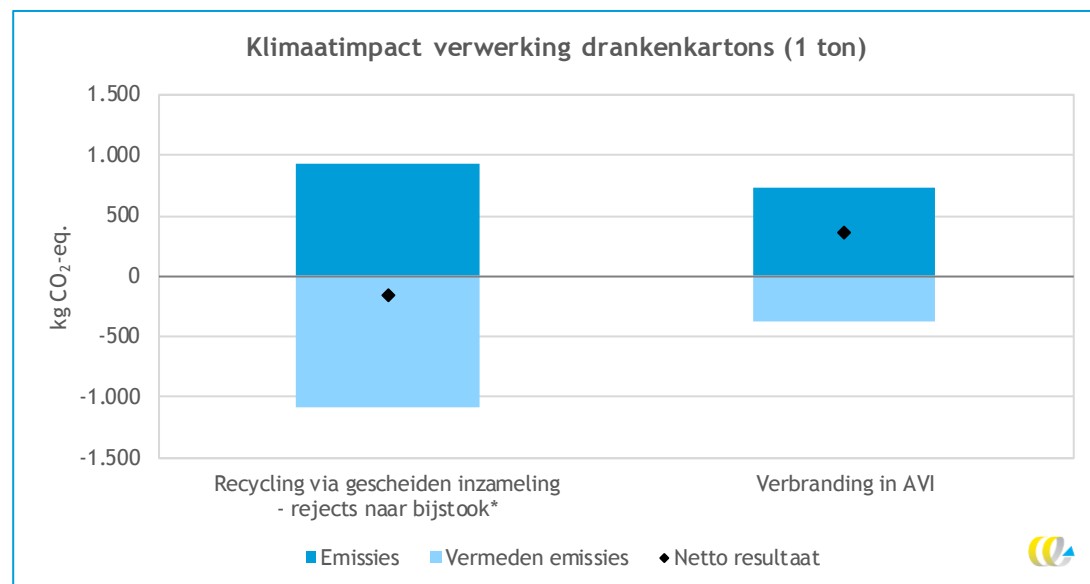
Drankenkartons worden in Nederland ingezameld via het pmd-systeem – de ‘d’ staat voor drankenkartons – of nagescheiden uit restafval (RWS, 2019d). Drankenkartons worden uitgesorteerd in een aparte categorie (‘DKR 510’). Op dit moment worden post-consumer drankenkartons niet in Nederland gerecycled maar elders in Europa, voornamelijk in Duitsland. Wel werd in het kader van de Raamovereenkomst Verpakkingen een pilot uitgevoerd naar recycling van drankenkartons, waarbij de recycling werd verzorgd door het bedrijf WEPA. De rapporten ‘Evaluatie milieu- en kosteneffectiviteit drankenkartonrecycling - Milieuanalyse’ (TNO & CE Delft, 2017) en ‘*Recycling of beverage cartons in the Netherlands 2016*’ (WUR, 2017) zijn gebaseerd op die proef. WEPA recyclet momenteel wel ongebruikte drankenkartons (productie-uitval). Ook zijn initiatieven in ontwikkeling om ook *post-consumer* drankenkartons weer in Nederland te recyclen.

Drankenkartons bestaan uit karton en LDPE en afhankelijk van de toepassing aluminium. Zo bevatten drankenkartons voor verse dranken en zuivel geen aluminium barrièrelaag en drankenkartons voor houdbare sappen wel. Recycling van drankenkartons richt zich op de papierzakken uit de kartonnen laag.

5.1 Resultaat

De resultaten worden getoond in Figuur 8 en Tabel 8. Omdat recycling zich richt op de papierzakken wordt het LDPE en het aluminium zowel bij de verbrandingsroute als de recyclingroute verbrand. Het verbranden van PE levert een relatief grote emissie op: ruim 700 kg CO₂-eq./ton drankenkartons.

Figuur 8 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton drankenkartons



* Let op: dit resultaat geldt alleen als de rejets worden bijgestookt in een kolengestookte cementoven of energiecentrale.

Tabel 8 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton drankenkartons

	Recycling van 1 ton drankenkartons - rejets bijgestookt in kolengestookte cementoven of energiecentrale	Verbranding van 1 ton drankenkartons in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-160	360	kg CO ₂ -eq.
Waarvan emissies	930	740	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-1.090	-380	kg CO ₂ -eq.
Verschil met verbranding in AVI	510	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

Het resultaat voor recycling wordt gedomineerd door de verbranding van het LDPE. Het resultaat is sterk afhankelijk van of de *rejets* (LDPE, aluminium en verkleefde papiervezels daaraan) worden verbrand in een AVI of worden bijgestookt in een cementoven of kolengestookte energiecentrale. Bij papierrecyclers en WEPA vindt bijstook plaats. Bijstook vermijdt het gebruik van steenkool voor energieproductie en leidt tot een relatief hoge klimaatwinst. Als de rejets worden verbrand in een AVI, dan levert dit aanzienlijk minder klimaatwinst op. Bij verbranding van rejets in een AVI is het nettoresultaat voor recycling vergelijkbaar met integrale verbranding van de drankenkartons in een AVI.

Voor het verpulpen van drankenkartons is wat meer energie nodig dan voor het verpulpen van oud papier en karton (Hoofdstuk 3).

De analyse wordt gedomineerd door het effect van kunststof omdat voor papier de klimaat-impact een minder relevant milieuthema is. Goed om te realiseren is dat bij papier, dat van biotische oorsprong is, ook andere milieuthema's dan klimaatimpact relevant zijn, zoals landgebruik, waterverbruik en vermisting. Een analyse van alleen het klimaateffect geeft geen compleet beeld voor recycling van biotische materialen.

5.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

5.2.1 Recycling van drankenkartons

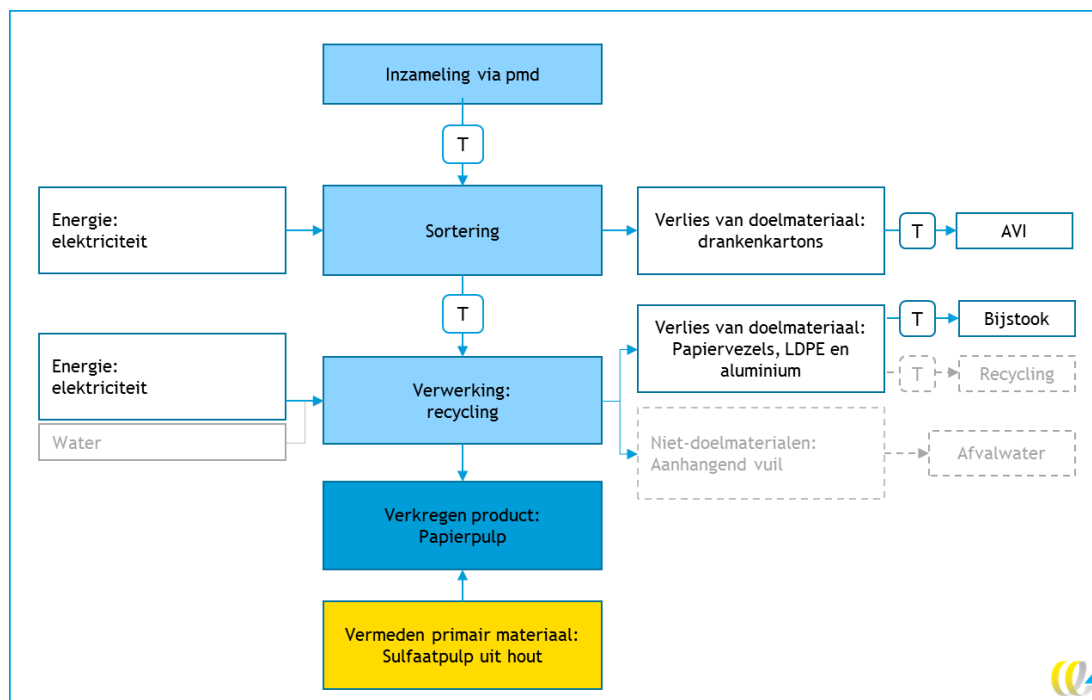
De gemiddelde samenstelling werd bepaald voor de Pilot Drankenkartons (KIDV, 2013), zie Tabel 9.

Tabel 9 - Samenstelling drankenkartons gemiddeld (KIDV, 2013)

Materiaal	Aandeel
Karton (papiervezel)	74,0%
LDPE-folie	23,6%
Aluminium	2,4%

Figuur 9 toont de diverse stappen in het recycleproces en toont op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyse is inbegrepen.

Figuur 9 - Processtappen recycling van drankenkartons



De in- en outputs voor de recycling van 1 ton drankenkartons zijn weergegeven in Tabel 10. De gekozen emissiefactoren en proceskaarten zijn ook in deze tabel weergegeven.

Tabel 10 - In- en outputs van recylen van 1 ton drankenkartons

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Drankenkartons	1 ton	N.v.t.	Afval input
Elektriciteit voor sortering van pmd	61 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Zoals geïnventariseerd door SUEZ Rotterdam in project (CE Delft, 2011).
Elektriciteit voor verpulpen	370 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Zoals geïnventariseerd door WEPA in project (TNO & CE Delft, 2017).
Verloren materiaal			
Papiervezels	302 kg	Waste paperboard {CH} treatment of, municipal incineration	Bij een sorteerrendement van 73,5% en terugwinrendement bij verpulpen van 81% (WUR, 2017).
LDPE	236 kg	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration	Het gemiddeld aandeel LDPE in drankenkartons.
Aluminium	24 kg	Scrap aluminium {CH} treatment of, municipal incineration	Het gemiddeld aandeel aluminium in drankenkartons.
Vermeden materiaal			
Vermeden sulfaatpulp	-438 kg	Sulfate pulp, unbleached {RER} market for sulfate pulp, unbleached	Bij een sorteerrendement van 73,5% en terugwinrendement bij verpulpen van 81% (WUR, 2017).
Vermeden steenkool door bijstook van rejets	-400 kg	Impact van steenkool (Hard coal supply mix/NL) + verbrandingsemissies	Verbrandingsemissies basis van MER-LAP Achtergronddocument A1: balansen, reststoffen en uitloging (Afval Overleg Orgaan, 2002).

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

5.2.2 Verbranding van drankenkartons

Als drankenkartons niet wordt gerecycled, worden zij via het restafval verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies en vermeden emissies van verbranding van de componenten van drankenkartons zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 - In- en outputs van verbranding van drankenkartons in een Nederlandse AVI

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding van papiervezels	740 kg	Waste paperboard {CH} treatment of, municipal incineration	Het gemiddeld aandeel papiervezels in drankenkartons.
Verbranding van LDPE	236 kg	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration	Het gemiddeld aandeel LDPE in drankenkartons.
Verbranding van aluminium	24 kg	Scrap aluminium {CH} treatment of, municipal incineration	Het gemiddeld aandeel aluminium in drankenkartons
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	Papiervezels -566 MJ	Nederlandse elektriciteitsmix. Elektriciteit op basis van de meeste recente emissie-kentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).	De LHV van papier is 15,9 MJ/kg volgens Ecoinvent.
	LDPE: -2.810 MJ		De LHV van LDPE is 42,5 MJ/kg volgens Ecoinvent.
	Aluminium: 0 MJ		De LHV van aluminium is 0 MJ/kg volgens Ecoinvent.
Vermeden warmte	Papiervezels: -1.060 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	De LHV van papier is 15,9 MJ/kg volgens Ecoinvent.
	LDPE: -1.500 MJ		De LHV van LDPE is 42,5 MJ/kg volgens Ecoinvent.
	Aluminium: 0 MJ		De LHV van aluminium is 0 MJ/kg volgens Ecoinvent.

6 Metalen verpakkingen

De minimumstandaard voor verwerking van metalen in Nederland is recycling. Metalen verpakkingen worden in Nederland gerecycled via gescheiden inzameling, bronscheiding met pmd, via nascheiding uit restafval en via metaalterugwinning uit AVI-bodemas. Het is toegestaan om metalen (verpakkingen) te verbranden in, mits de metalen uit de bodemassen worden teruggewonnen en gerecycled (RWS, 2019g). In alle routes zal metaal dus worden gerecycled.

De onderstaande toelichting en berekeningen zijn gebaseerd op nascheiding van aluminium en staal uit restafval, omdat we nog geen onderzoek beschikbaar hebben naar het recyclen van metalen verpakkingen via pmd. We vermoeden echter dat de resultaten niet erg zullen verschillen. Beide routes omvatten transport en een sorteerstap middels magnetisme (staal) of *eddy currents* (aluminium). Energie voor sortering zal vergelijkbaar zijn voor metalen uit pmd en restafval.

Als metalen verbrand worden belandt het metaal in de bodemassen. In Nederland wordt bij een deel van de AVIs metaal teruggewonnen uit bodemas.

6.1 Resultaat

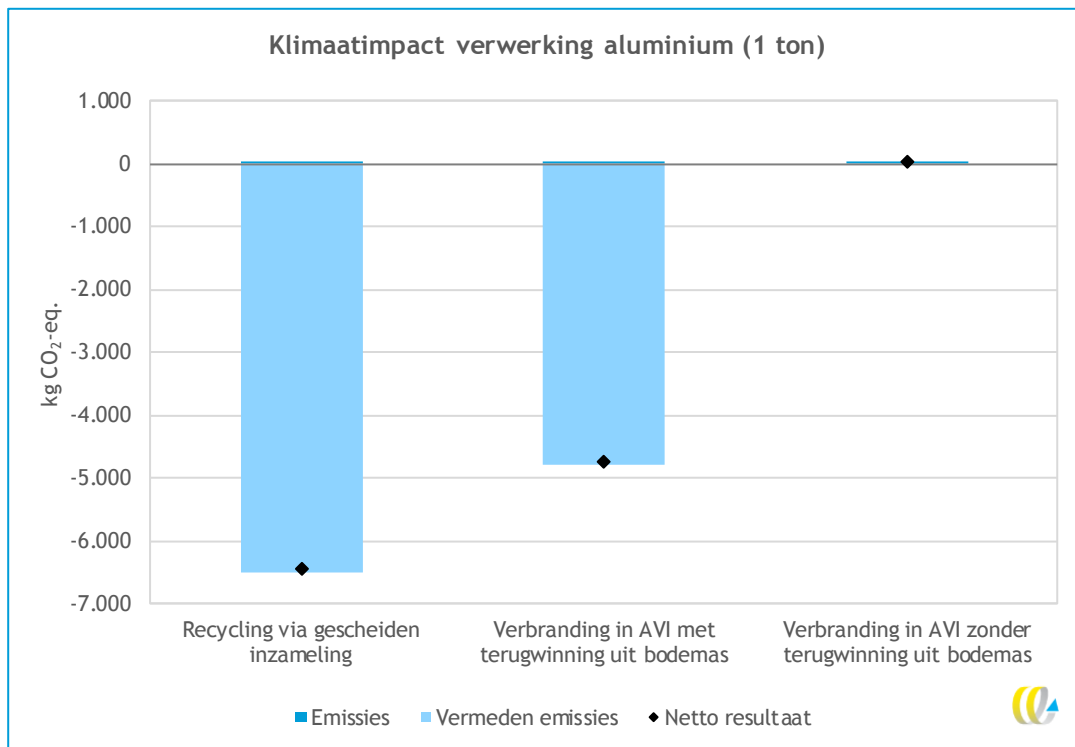
De resultaten worden getoond in Figuur 10, en Tabel 12 voor aluminium en Figuur 11 en Tabel 13 voor staal. Te zien is dat bij zowel recycling als verbranding met terugwinning uit bodemas sprake is van hoge vermeden emissies. Dit komt doordat beide metalen bij zowel recycling als verbranding teruggewonnen worden.

Ter informatie tonen we ook resultaten exclusief terugwinning uit bodemas, wat dus in de praktijk niet is toegestaan (recycling is de minimumstandaard in LAP3). Dit toont duidelijk het nut van recycling.

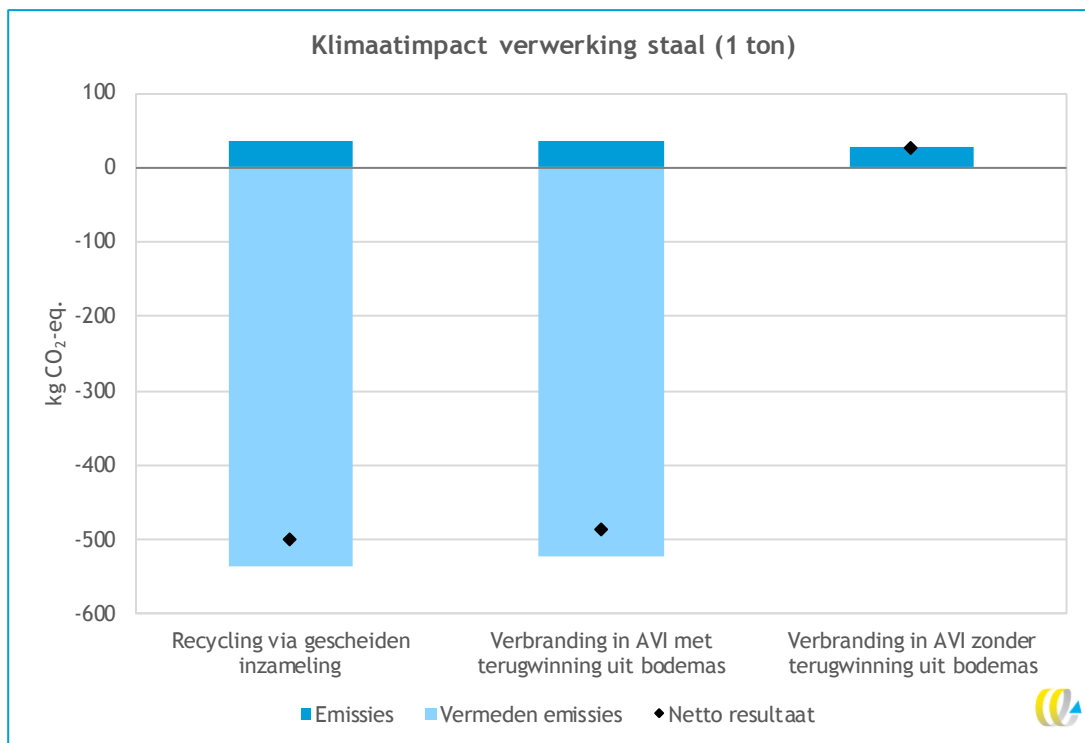
De vermeden emissies bij aluminium zijn aanzienlijk hoger dan de vermeden emissies bij staal, doordat de productie van nieuw aluminium vermeden wordt. Aluminiumproductie is geassocieerd met hoge milieu-impacts, veel hoger dan bij staal het geval is.

Zowel bij aluminium als bij staal is recycling geassocieerd met netto meer vermeden emissies dan verbranden met bodemas. Bij aluminium is het verschil tussen recycling en verbranding met terugwinning uit bodemas echter beduidend groter dan bij staal, omdat zo'n 15% van het aluminium oxideert in de AVI, terwijl staal onder dezelfde omstandigheden niet oxideert. Daarnaast kan maar 85% van het aanwezige aluminiumbodemas teruggewonnen worden. Hierdoor kan er minder aluminium uit bodemas worden teruggewonnen dan met bronscheiding mogelijk is. Voor staal is dit verschil marginaal, met 98% terugwinning bij nascheiding en 96% terugwinning uit bodemas.

Figuur 10 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton aluminium



Figuur 11 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton staal



Tabel 12 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton aluminium

	Recycling via gescheiden inzameling	Verbranding in AVI met terugwinning uit bodemas	Verbranding in AVI zonder terugwinning uit bodemas	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-6.460	-4.750	30	kg CO₂-eq.
Waarvan emissies	40	40	0	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-6.500	-4.790	30	kg CO ₂ -eq.
Vershil met verbranding in AVI met terugwinning uit bodemas	-1.710	N.v.t.	4.780	kg CO ₂ -eq.
Vershil met verbranding in AVI zonder terugwinning uit bodemas	-6.490	-4.780	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

Tabel 13 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton staal

	Recycling via gescheiden inzameling	Verbranding in AVI met terugwinning uit bodemas	Verbranding in AVI zonder terugwinning uit bodemas	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-500	-490	30	kg CO₂-eq.
Waarvan emissies	30	40	0	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-530	-520	30	kg CO ₂ -eq.
Vershil met verbranding in AVI met terugwinning uit bodemas	-10	N.v.t.	520	kg CO ₂ -eq.
Vershil met verbranding in AVI zonder terugwinning uit bodemas	-530	-520	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

6.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

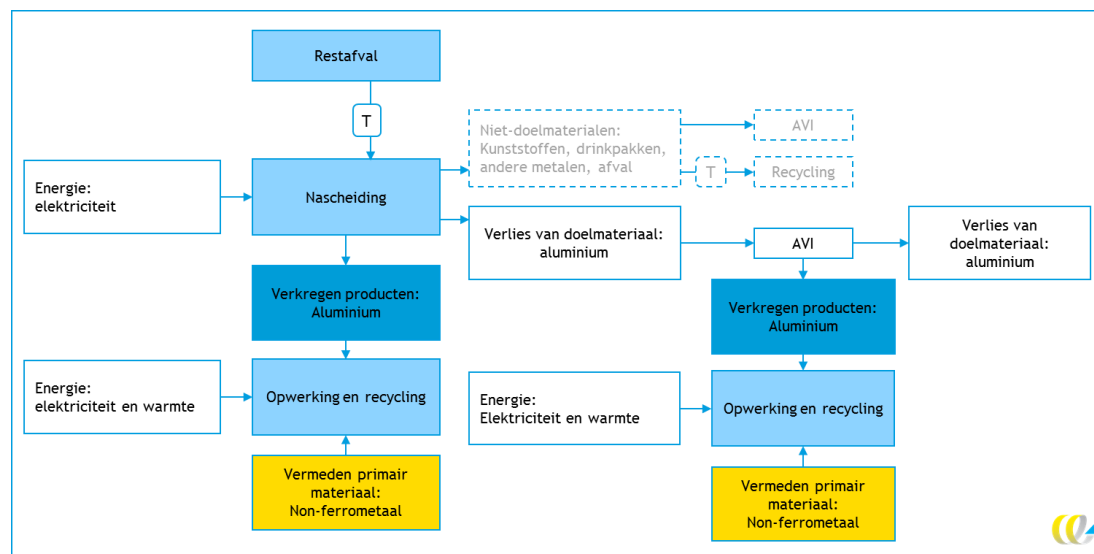
6.2.1 Recycling van metalen verpakkingen

Bij de recycling van aluminium en staal uit restafval wordt 98% van de metalen uitgesorteerd. De 2% die niet uitgesorteerd wordt, wordt met het restafval verbrand in een AVI. Een nascheidingsinstallatie verbruikt ongeveer 20 kWh per ton (CE Delft, 2019b). Er is geen verschil bekend tussen energieverbruik voor uitsortering van staal en aluminium. Daarom nemen we aan dat het nascheiden van 1 ton staal en aluminium beiden 20 kWh per ton afval kost.

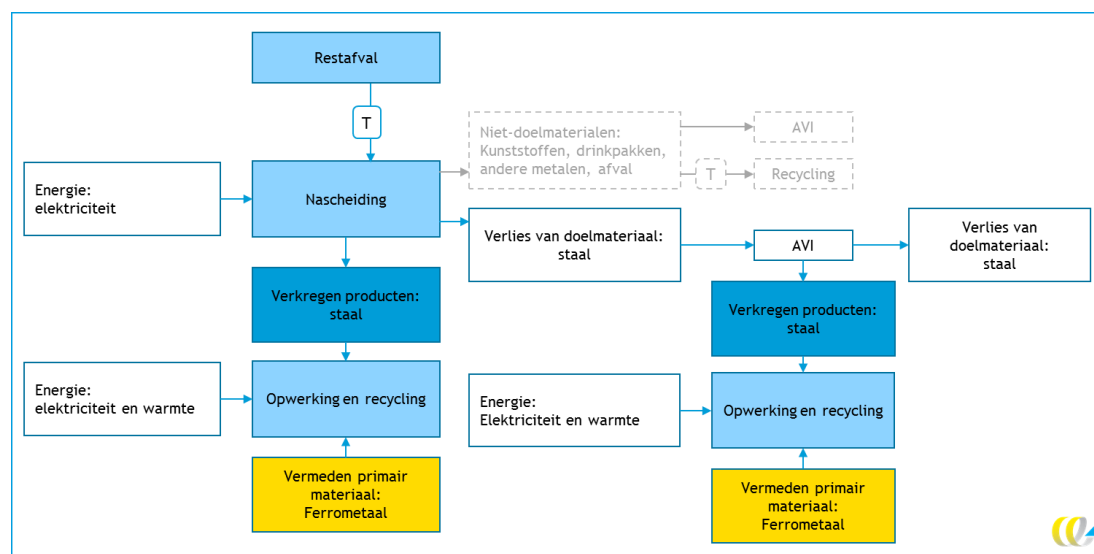
Het metaal wat met het restafval wordt verbrand, dus ook het niet-nagescheiden aandeel, wordt teruggewonnen uit de bodemas. Dit is verder toegelicht in Paragraaf 6.2.2. De emissies en vermeden emissies door verbranding en terugwinning van het aandeel metaal dat niet uitgesorteerd wordt, zijn meegenomen in de analyse van recycling.

Figuur 12 en Figuur 13 tonen de diverse stappen in het recycleproces en tonen op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyses is inbegrepen.

Figuur 12 - Processtappen recycling van aluminium verpakkingen



Figuur 13 - Processtappen recycling van stalen verpakkingen



In Tabel 14 en Tabel 15 zijn de in- en outputs voor recycling van respectievelijk 1 ton aluminium en 1 ton staal weergegeven. De gekozen proceskaarten en emissiefactoren zijn ook in deze tabel weergegeven.

Tabel 14 - In- en outputs van recycelen 1 ton aluminium

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Aluminium in restafval	1 ton	N.v.t.	Afval input
Elektriciteit	20 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Voor nascheiding. Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). Proceskaart op basis van meeste recente emissieken-tallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Verloren materiaal			
Aluminium, verbrand via restafval	20 kg	Zie verbranding aluminium in Tabel 16	Zie verbranding aluminium in Tabel 16.
Vermeden materiaal			
Vermeden non-ferrometaal door aluminiumrecycling	-980 kg	-6,6 kg CO ₂ -eq./kg	Hoeveelheid op basis van CE Delft (CE Delft, 2019b). Emissiefactor op basis van CE Delft (2019a). Deze netto emissiefactor bevat ook al de emissies en kwaliteit- en materiaalverlies bij recycling.

Tabel 15 - In- en outputs van recycelen 1 ton staal

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Staal in restafval	1 ton	N.v.t.	Afval input
Elektriciteit	20 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Voor nascheiding. Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). Proceskaart op basis van meeste recente emissieken-tallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Verloren materiaal			
Staal naar AVI via restafval	20 kg	Zie verbranding staal in Tabel 17	Zie verbranding staal in Tabel 17.
Vermeden materiaal			
Vermeden ferrometaal door staalrecycling	-980 kg	-0,55 kg CO ₂ -eq./kg	Hoeveelheid op basis van CE Delft (CE Delft, 2019b). Emissiefactor op basis van CE Delft (2019a). Deze netto emissiefactor bevat ook al de emissies en kwaliteit- en materiaalverlies bij recycling.

6.2.2 Verbranding van metalen verpakkingen

Als metalen verpakkingen niet uitgesorteerd worden, worden deze met het restafval verbrand in een AVI. Bij de verbranding van verpakkingen van aluminium of staal komt geen energie vrij. Voor de bodemasverwerking is alleen het verbruik voor het wassen van de bodemas bekend. De impact van overige bewerking en sortering is niet openbaar beschikbaar.

In Tabel 16 en Tabel 17 zijn de in- en outputs voor verbranding van respectievelijk 1 ton aluminium en 1 ton staal weergegeven.

Tabel 16 - In- en outputs van verbranding van aluminium via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Aluminiumverbranding via restafval	1 ton	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration	Verbranden met Europees restafval.
Elektriciteit	9,8 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Bodemasverwerking. Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). Proceskaart op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Diesel	1,5 liter (54 MJ)	Diesel, burned in building machine {GLO} processing	Bodemasverwerking. Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). De LHV van petrochemische diesel is 42,74 MJ/kg volgens Ecoinvent. Met een dichtheid van 0,85 kg/liter (Engineering Toolbox, 2020) komt dit uit op 36,16 MJ/liter.
Vermeden materialen			
Vermeden non-ferrometaal uit bodemas	-722,5 kg	-6,6 kg CO ₂ -eq./kg	Uitgegaan van worst case volgens CE Delft (2017): 15% verlies tijdens verbranding door oxidatie. Uit de bodemas wordt 85% van het aanwezige aluminium teruggewonnen (Afvalfonds Verpakkingen, 2019). In de emissiefactor zijn de emissies en verliezen meegenomen.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

Tabel 17 - In- en outputs van verbranding van staal via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Staalverbranding via restafval	1 ton	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration	Verbranden met Europees restafval.
Elektriciteit	9,80 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Bodemasverwerking. Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). Proceskaart op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Diesel	1,50 liter (54 MJ)	Diesel, burned in building machine {GLO} processing	Bodemasverwerking. Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). De LHV van petrochemische diesel is 42,74 MJ/kg volgens Ecoinvent. Met een dichtheid van 0,85 kg/liter (Engineering Toolbox, 2020) komt dit uit op 36,16 MJ/liter.
Vermeden materialen			
Vermeden ferrometaal uit bodemas	-960 kg	-0,55 kg CO ₂ -eq./kg	0% verlies tijdens verbranding (CE Delft, 2017). Uit de bodemas wordt 96% van het aanwezige staal teruggewonnen (Afvalfonds Verpakkingen, 2019). In de emissiefactor zijn de emissies en verliezen meegenomen.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

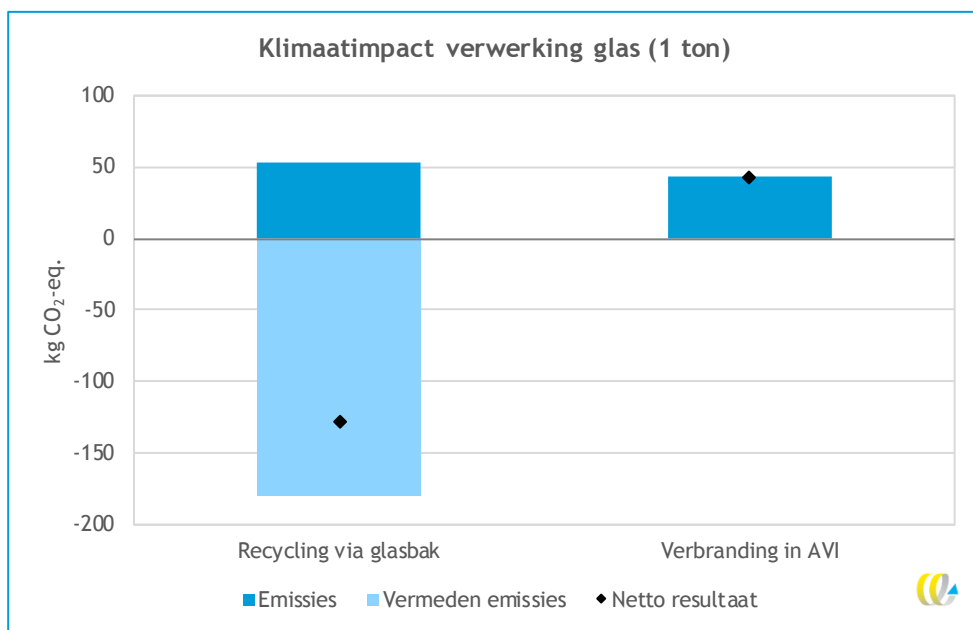
7 Glas

In Nederland wordt glas gescheiden ingezameld in onder- of bovengrondse containers. Dit glas wordt gerecycled tot nieuw glas. Glas dat in het restafval belandt, smelt in de AVI en belandt in de bodemassen.

7.1 Resultaat

De resultaten worden getoond in Figuur 14 en Tabel 18. Te zien is dat recycling van glas resulteert in zowel hogere emissies als hogere vermeden emissies dan verbranding van glas. Door de grote hoeveelheid vermeden emissies zorgt recycling van glas netto voor een negatieve klimaatimpact. De klimaatimpact van de verbranding van glas is positief, omdat er geen emissies vermeden worden als gevolg van het verbranden van glas. De emissie bij verbranding komt voort uit transport en energieverbruik in de AVI die wordt toegerekend aan glas.

Figuur 14 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton glas



Tabel 18 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton glas

	Recycling via glasbak	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-130	40	kg CO ₂ -eq.
Waarvan emissies	50	40	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-180	0	kg CO ₂ -eq.
Verskil met verbranding in AVI	-170	N.v.t.	kg CO ₂ -eq

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

7.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

7.2.1 Recycling van glas

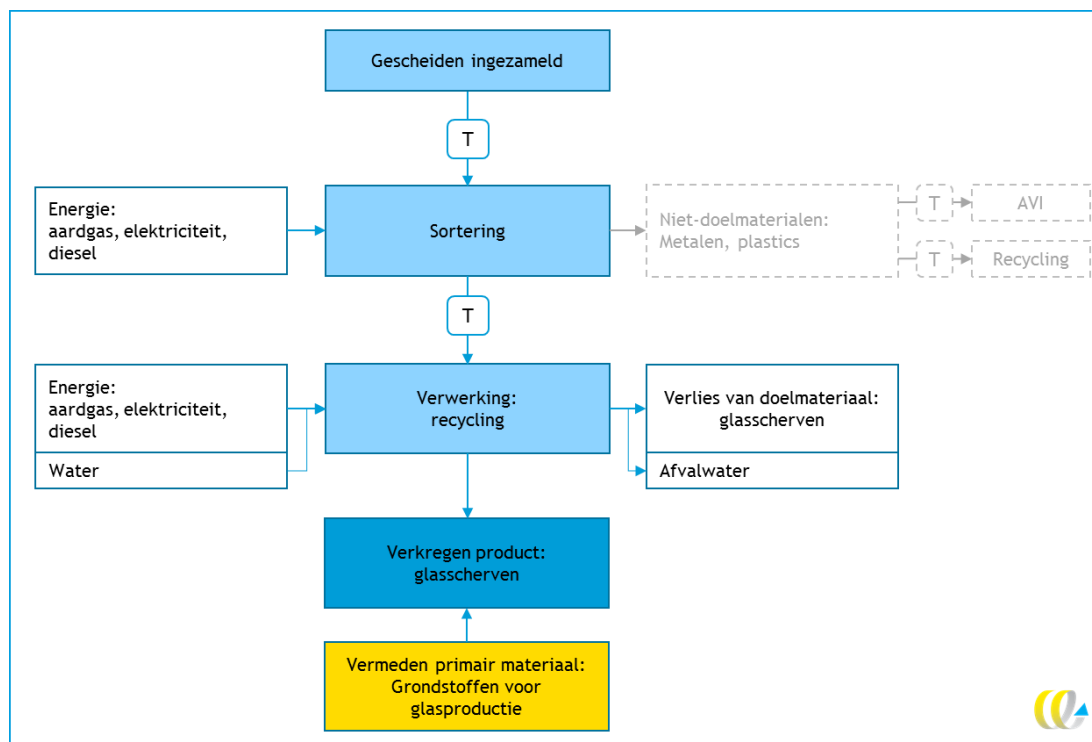
Glas wordt bij inzameling soms op kleur gescheiden. Bij het recyclingbedrijf worden de afvalstromen vervolgens ontdaan van verontreinigingen en verwerkt tot glasscherven.

Grote verontreinigingen zoals plastic flessen worden handmatig uit het glasafval verwijderd, waarna het glas door een grote breker en zeef gaat om er scherven van te maken. Vervolgens wordt de afvalstroom ontdaan van metaal, kunststoffen en kurk met behulp van magneten en zwaartekrachttechnieken. Met laserstralen, camera's en UV-technieken worden de achtergebleven, kleinste verontreinigingen, zoals keramiek, porselein en hittebestendig glas, opgespoord en verwijderd. De etensresten in het glasafval worden verwijderd door het glas gedurende een aantal weken op te slaan, het organisch materiaal verteerd dan (Maltha Glasrecycling, 2018).

De homogene, schone stroom glasscherven wordt verkocht aan de glasindustrie, die de glasscherven gebruiken als grondstof voor nieuwe glazen producten.

Figuur 15 toont de diverse stappen in het recycleproces en toont op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyse is inbegrepen.

Figuur 15 - Processtappen recycling van glas



Voor glas hebben we gebruik kunnen maken van bedrijfsspecifieke data van Maltha Glasrecycling. De in- en outputs van het recyclen van 1 ton ingezameld glas zijn vertrouwelijk en worden daarom niet weergegeven in dit rapport.

7.2.2 Verbranding van glas

Als glas in het restafval belandt en dus niet wordt gerecycled, wordt het verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies van verbranding van glas zijn weergegeven in Tabel 19. Er zijn geen vermeden emissies (outputs) omdat de verbrandingswaarde van glas 0 MJ/kg is.

Tabel 19 - Inputs van verbranding van glas via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding glas	1 ton	Waste glass {CH ₃ } treatment of, municipal incineration	Verbranding van glas

8 Steenachtig materiaal

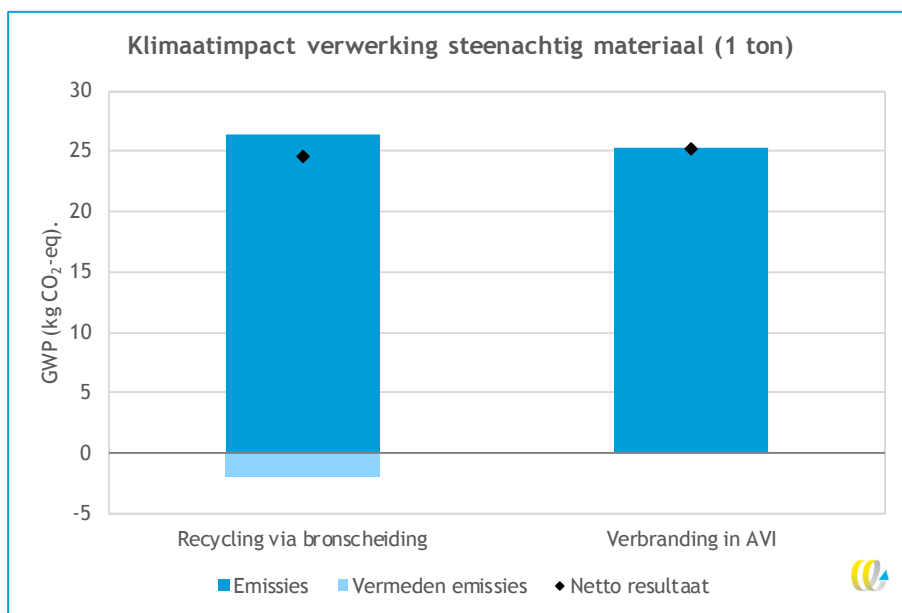
In Nederland wordt steenachtig materiaal afkomstig uit huishoudens apart ingezameld in milieustraten. Het wordt gerecycled tot gebroken puin, wat ingezet wordt als grind-ervanger. Steenachtig materiaal zal niet vaak opzettelijk in het restafval en vervolgens een verbrandingsinstallatie terechtkomen, aangezien het inert materiaal is en dus niet verbrandt. We tonen de resultaten van ‘verbranding’ van steenachtig materiaal om te laten zien ‘wat als’ het in een AVI terechtkomt.

8.1 Resultaat

De resultaten worden getoond in Figuur 16 en Tabel 20. Te zien is dat recycling en verbranding van steenachtig materiaal een vergelijkbare klimaatimpact hebben. De klimaatimpact per ton is laag in vergelijking met andere materialen (zie de andere hoofdstukken), in de orde van enkele tientallen kg CO₂-eq./ton.

De emissies die voortkomen uit de recyclingprocessen zijn iets hoger dan de emissies van verbranding, maar doordat er bij recycling ook emissies vermeden worden valt de netto klimaatimpact van recycling iets lager uit dan de netto klimaatimpact van verbranding. De winst van recycling is relatief beperkt, omdat de vermeden grondstof (grind) een lage klimaatimpact heeft. Door de relatief lage emissies van het recyclings- en verbrandingsproces zelf, hebben de emissies van het transport van het steenachtig materiaal een groot aandeel in deze resultaten.

Figuur 16 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton steenachtig materiaal



Tabel 20 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton steenachtig materiaal

	Recycling via bronscheiding	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	25	25	kg CO₂-eq.
Waarvan emissies	26	25	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-2	0	kg CO ₂ -eq.
Verschil met verbranding in AVI	Verwaarloosbaar	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

8.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

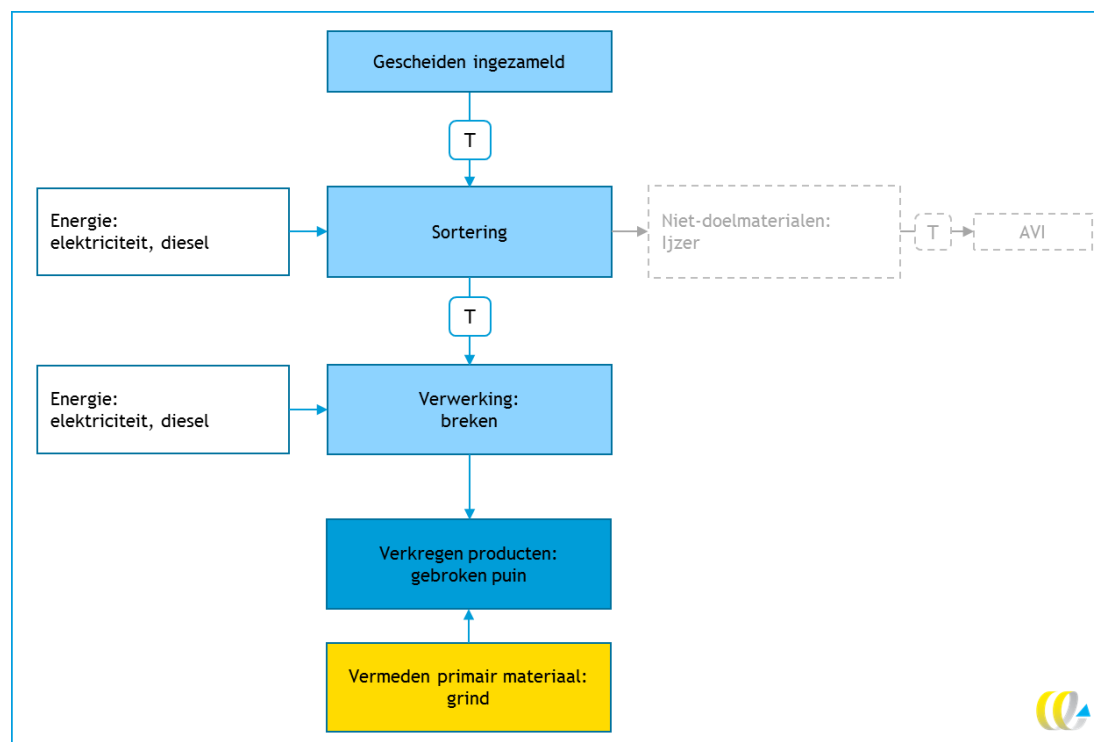
8.2.1 Recycling van steenachtig materiaal

De afvalstroom steenachtig materiaal bestaat uit verschillende materialen, zoals betonafval, metselwerk en asfaltpuin. Aangezien de granulaten van deze steensoorten verschillende soorten primair materiaal kunnen vervangen worden de steensoorten eerst gesorteerd. Niet-doelmateriaal zoals ijzer worden ook uit de afvalstroom gehaald.

Na sortering wordt het puin in een breker tot granulaat verwerkt. Het verkregen granulaat bestaat uit puin van verschillende afmetingen en dit kan nog gescheiden worden om meer homogene fracties te verkrijgen. Granulaten uit steenachtig materiaal dienen vooral als vervanger van grind, bijvoorbeeld in funderingen van wegen of in beton (Van Werven, 2020).

Figuur 17 toont de diverse stappen in het recycleproces en toont op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyse is inbegrepen.

Figuur 17 - Processtappen recycling van steenachtig materiaal



In Tabel 21 zijn de in- en outputs voor recycling van 1 ton steenachtig materiaal weergegeven. De gekozen proceskaarten en emissiefactoren zijn ook in deze tabel weergegeven.

Tabel 21 - In- en outputs van recycling van brongescheiden steenachtig materiaal

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Steenachtig materiaal	1 ton	N.v.t.	Afval input
Elektriciteit	1,3 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Gemiddeld energieverbruik van een stationaire breker, zoals opgenomen in de Nationale Milieudatabase (NMD, 2020).
Diesel	8,6 MJ	Diesel, burned in building machine {GLO} market for	
Vermeden materiaal			
Grind	-1 ton	Grind 4-32, in en nabij Nederland geproduceerd door Cascade-leden. c2	Nationale Milieudatabase (NMD, 2020).

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5 tenzij anders aangegeven.

8.2.2 Verbranding van steenachtig materiaal

Als steenachtig materiaal in het restafval belandt zal het in de AVI terechtkomen. De gebruikte proceskaarten voor de emissies van verbranding van steenachtig materiaal zijn weergegeven in Tabel 22. Er zijn geen vermeden emissies (outputs) omdat de verbrandingswaarde van steenachtig materiaal 0 MJ/kg is.

Tabel 22 - In- en outputs van verbranding steenachtig materiaal via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding steenachtig materiaal	1 ton	Waste cement-fibre slab, dismantled {CH} treatment of waste cement-fibre slab, municipal incineration	

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5.

9 Textiel

In Nederland wordt textiel gescheiden ingezameld via onder- of bovengrondse containers of via zakken aan huis. In 2018 werd ongeveer 45% van het gebruikte textiel op deze manier ingezameld. De overige 55% belandt in het restafval waarna het wordt verbrand in een AVI. Een deel van het ingezamelde textiel (indicatie: 9 tot 21%) wordt afgekeurd voor hergebruik of recycling en alsnog verbrand, bijvoorbeeld omdat het sterk vervuild of beschimmeld is (FFact, 2020).

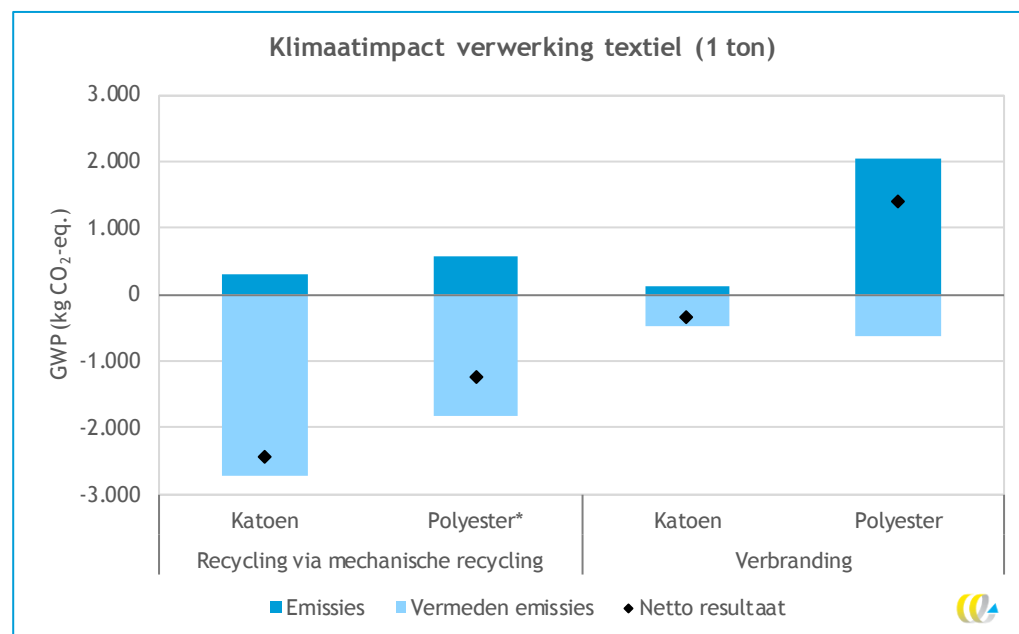
Een deel van het ingezamelde textiel is herdraagbaar en kan in zijn oorspronkelijke functie worden hergebruikt, binnen of buiten Nederland. Ook wordt textiel laagwaardig hergebruikt als poetsdoek, vulling of isolatiemateriaal (FFact, 2020). Hoogwaardige recyclingtechnieken van textiel, die zich richten op behoud van de vezels en die circulariteit in de textielketen mogelijk maken, zijn momenteel in opkomst en volop in ontwikkeling.

De resultaten laten zien wat de potentiële klimaatwinst is van mechanische recycling van 1 ton vezels, wanneer het hoogwaardig zou worden gerecycled. In de praktijk zullen polyestervezels alleen worden gerecycled als zij onderdeel zijn van een blend met katoen.

9.1 Resultaat

De resultaten voor hoogwaardige recycling (vezelrecycling) worden getoond in Figuur 18 en Tabel 23.

Figuur 18 - Klimaatimpact van de verwerking van 1 ton textielafval



* Polyestervezels zullen alleen mechanisch worden gerecycled als onderdeel van een (katoen-polyester) blend. De figuur toont: wat als polyestervezels worden gerecycled.

Tabel 23 - Klimaatimpact van de verwerking van 1 ton textielafval

	Recycling via mechanische recycling		Verbranding		Eenheid
	Katoen	Polyester*	Katoen	Polyester	
Totaal: netto resultaat	-2.440	-1.250	-330	1.410	kg CO₂-eq.
Waarvan emissies	300	580	130	2.040	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-2.740	-1.830	-470	-630	kg CO ₂ -eq.
Verschil met verbranding in AVI	-2.110	-2.660	N.v.t.	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

* Polyestervezels zullen in de praktijk alleen mechanisch worden gerecycled als onderdeel van een (katoen-polyester) blend. De resultaten tonen 'wat als polyestervezels worden gerecycled'.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

Te zien is dat mechanische recycling van zowel katoen- als polyestervezels voor een aanzienlijke vermeden emissie zorgt. Aangezien het mechanisch recyclingproces van katoen- en polyester gelijkwaardig is, zijn de emissies van recycling voor deze textielsoorten ook gelijk. De verbranding van katoen en de gemiddelde textielsamenstelling zorgen voor lagere vermeden emissies. De verbranding van polyester leidt tot een aanzienlijke netto uitstoot.

9.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

9.2.1 Recycling van textiel

Ingezameld textiel gaat naar inzamelingsbedrijven die het textiel zelf sorteren of doorverköpen aan een sorteerbeidrijf. Het textiel wordt gesorteerd op kwaliteit en ongewenste stoorstoffen worden verwijderd. Textiel dat nog een goede kwaliteit heeft kan direct worden hergebruikt en is bestemd voor de tweedehandsmarkt. Het textiel dat niet draagbaar meer is, kan nog wel geschikt zijn voor materiaalhergebruik. De textielvezels kunnen dan opnieuw gebruikt worden in textielproducten.

De meeste gebruikte techniek voor het recycelen van textielvezels is mechanische recycling. Hierbij wordt het textiel vervezeld tot alleen nog afzonderlijke vezels over zijn. Alle niet-textiele materialen, zoals knopen en ritsen, worden uit het textiel verwijderd. Hierbij gaat 10-15% van het textiel zelf verloren, dat bevestigd is aan de knopen, ritsen, e.d. Bij katoen gaat tijdens het recycleproces nog eens 5% van het materiaal verloren doordat de vezels zijn versleten en tijdens het vervezelen uit elkaar vallen. Dit verliespercentage hangt af van de mate waarin het textiel versleten is. De percentages betreffen een expertinschatting door Alcon Advies. Binnen deze studie hanteren we een conservatieve aanpak: 15% verlies bij polyester- en 20% verlies bij katoenrecycling.

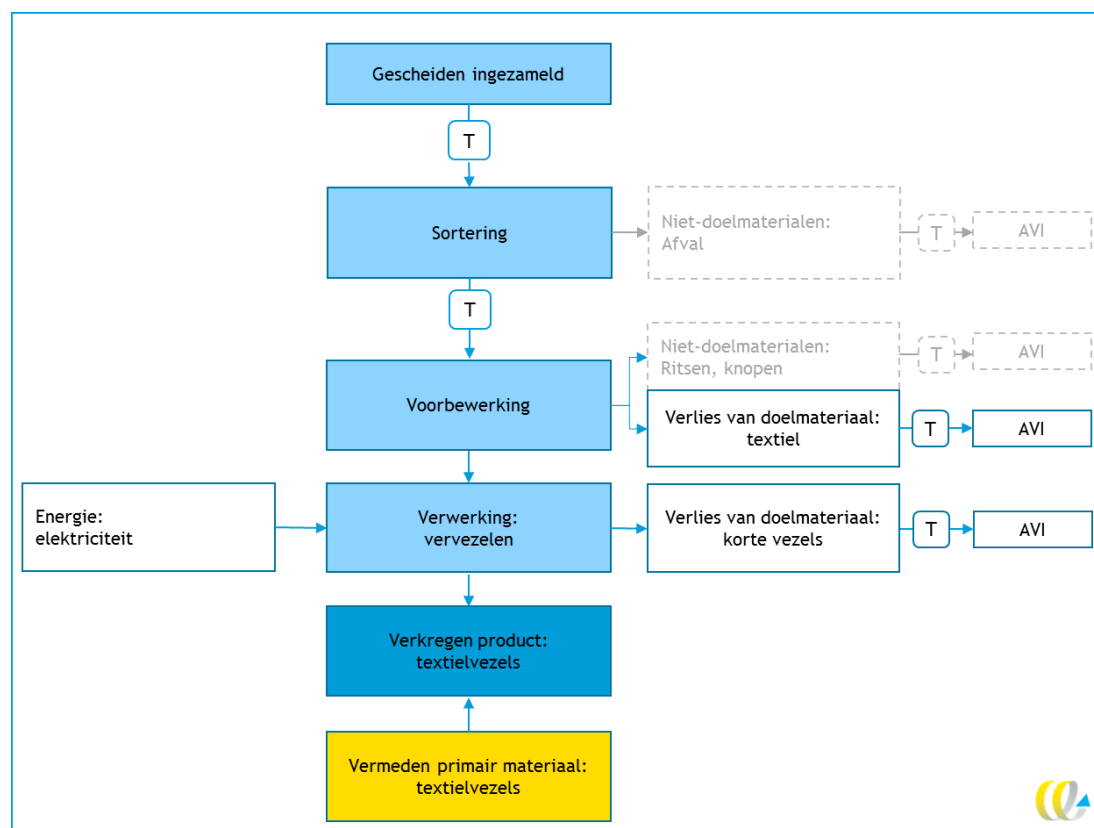
Naast mechanische recycling is het technisch ook mogelijk om textiel chemisch te recycelen. Voor katoen gaat het om chemische terugwinning van de cellulose uit de katoenvezels. Polyestervezels kunnen chemisch worden teruggebracht tot hun monomeer. Op dit moment wordt chemische recycling van katoen echter nog niet op grote schaal toegepast, en gebeurt chemische recycling van polyester uit textiel⁵ niet in de praktijk. Om het mogelijk te maken zal sortering van 100% polyestertextiel moeten gaan plaatsvinden.

⁵ Wel: chemische recycling van PET uit PET-flessen en andere niet-textiele PET-producten.

Voor chemische recycling van katoen is nog geen openbare⁶ data beschikbaar. Aangezien chemische recycling zich richt op pure grondstoffen, is het niet geschikt voor blends tenzij de componenten kunnen worden gescheiden in een voorbereidingsstap.

Figuur 19 toont de diverse stappen in van het mechanische recycleproces en toont op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyse is inbegrepen.

Figuur 19 - Processtappen mechanische recycling van textiel



In Tabel 24 en Tabel 25 zijn de in- en outputs voor recycling van respectievelijk 1 ton katoen en 1 ton polyester weergegeven. De gekozen proceskaarten en emissiefactoren zijn ook in deze tabel weergegeven.

⁶ CE Delft heeft een LCA uitgevoerd van het SaxCell-proces voor chemische katoenrecycling, maar de resultaten daarvan zijn niet openbaar.

Tabel 24 - In- en outputs van de recycling van 1 ton brongescheiden textiel van katoenvezel

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Katoen textiel	1 ton	N.v.t.	Afval input
Elektriciteit	500 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). Proceskaart op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Verloren materiaal			
Textielvezels	200 kg	Waste textile, soiled {CH} treatment of, municipal incineration	Aanname: 20% van het textiel gaat verloren tijdens het recyclingproces en wordt verbrand.
Vermeden materiaal, elektriciteit en warmte			
Vermeden katoenvezels	-800 kg	Cotton fibre {GLO} market for. (waaruit transport is verwijderd)	Dit representeert de marktmix van katoenproductie. Transport van het katoen naar productielocatie is verwijderd zodat het de productie representeert (dat wat vermeden wordt).
Vermeden elektriciteit	-510 MJ	Nederlandse elektriciteitsmix	Vermeden elektriciteit door verbranding van het uitgevallen textiel. Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van katoen is 17 MJ/kg (Piegsa, 2010).
Vermeden warmte	-950 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas door verbranding het uitgevallen textiel. De LHV van katoen is 17 MJ/kg (Piegsa, 2010).

Tabel 25 - In- en outputs van de recycling van 1 ton brongescheiden textiel van polyestervezel

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Polyester textiel	1 ton	N.v.t.	Afval input
Elektriciteit	500 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). Proceskaart op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Verloren materiaal			
Textielvezels	150 kg	Waste polyethylene terephthalate {CH} treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration	15% van het textiel gaat verloren tijdens het recyclingproces en wordt verbrand.
Vermeden materiaal, elektriciteit en warmte			
Polyester	-850 kg	PET (amorf) Plastics Europe	
Vermeden elektriciteit	-520 MJ	Nederlandse elektriciteit	Vermeden elektriciteit door verbranding van het uitgevallen textiel. Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van PET is 22,9 MJ/kg volgens Ecoinvent
Vermeden warmte	-960 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas door verbranding van het uitgevallen textiel. De LHV van PET is 22,9 MJ/kg volgens Ecoinvent.



9.2.2 Verbranding van textiel

Als textiel in het restafval belandt wordt het verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies en vermeden emissies van verbranding van katoen en polyester zijn weergegeven in respectievelijk Tabel 26 en Tabel 27.

Tabel 26 - In- en outputs van verbranding van katoen textiel via brongescheiden inzameling

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding van katoen	1 ton	Waste textile, soiled {CH} treatment of, municipal incineration	Verbranding van textielafval.
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	-2.550 MJ	Nederlandse elektriciteit	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van katoen is 17 MJ/kg (Piegsa, 2010).
Vermeden warmte	-4.760 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van katoen is 17 MJ/kg (Piegsa, 2010).

Tabel 27 - In- en outputs van verbranding van polyester textiel via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding van polyester	1 ton	Waste polyethylene terephthalate {CH} treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration	Verbranding van PET.
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	-3.440 MJ	Nederlandse elektriciteitsmix	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van polyester is 22,9 MJ/kg volgens Ecoinvent.
Vermeden warmte	-6.430 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van polyester is 22,9 MJ/kg volgens Ecoinvent.

10 Houtafval

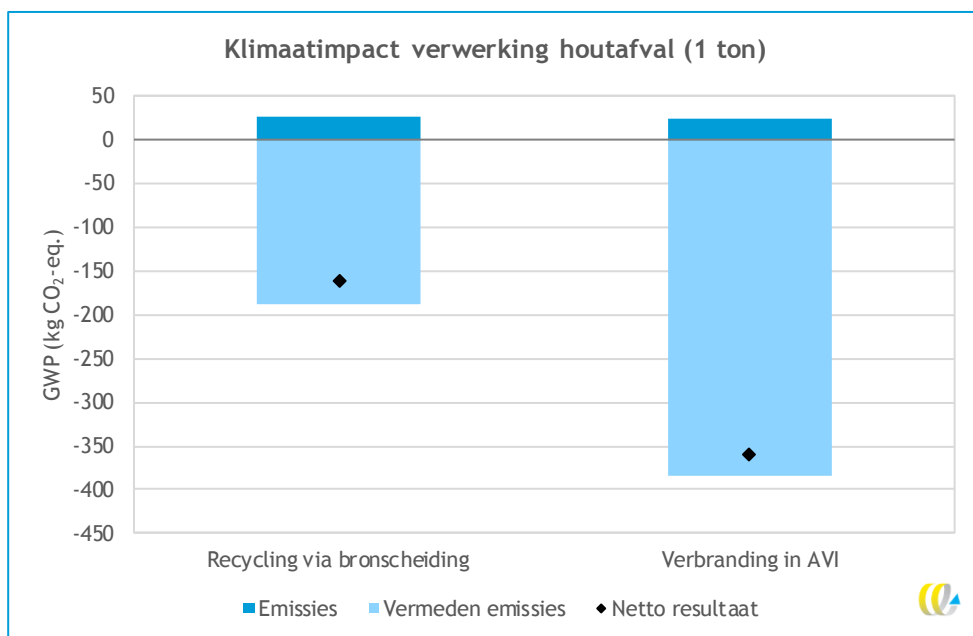
Afvalhout is onder te verdelen in drie categorieën. A-hout is schoon en onbehandeld hout, B-hout is bewerkt hout dat bijvoorbeeld geverfd of gelijmd is en C-hout is geïmpregneerd hout. C-hout mag alleen verbrand worden in gespecialiseerde verbrandingsinstallaties. De hieronder weergegeven resultaten zijn daarom alleen van toepassing op A- en B-hout.

In Nederland wordt houtafval afkomstig uit huishoudens apart ingezameld in milieustraten. Houtafval dat in het restafval belandt of dat niet geschikt is voor recycling wordt verbrand in een AVI.

10.1 Resultaat

De resultaten worden getoond in Figuur 20 en Tabel 28. Te zien is dat de verbranding van hout voor meer vermeden emissies zorgt dan de recycling van hout. Dit komt met name door de relatief lage vermeden impact van recycling van hout. Gerecycled hout vervangt nieuwe houtsnippers en vermijdt dus de emissies die gepaard gaan met de productie van de nieuwe houtsnippers. De klimaatimpact van de productie van houtsnippers is echter laag, waardoor de vermeden emissies van gerecycled hout ook laag zijn. Daarnaast zijn de emissies van verbranding van hout laag, omdat wordt aangenomen dat de CO₂ die vrijkomt bij de verbranding niet bijdraagt aan een toename van de concentratie CO₂ in de atmosfeer. De bomen waarvan het hout gemaakt is, hebben de CO₂ namelijk eerder al uit de atmosfeer opgenomen.

Figuur 20 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton houtafval



Goed om te realiseren is dat hout in principe meerdere keren gerecycled kan worden en dus na meerdere gebruikscycli pas verbrand hoeft te worden. Als het direct verbrand wordt, gaat het materiaal na één gebruikscyclus verloren. Daarnaast is het zo dat recycling van hout, dat van biotische oorsprong is, ook gunstig is voor het vermijden van andere impacts dan klimaatimpact, zoals impacts gerelateerd aan bosbouw en landgebruik.

Tabel 28 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton houtafval

	Recycling via bronscheiding	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-160	-360	kg CO₂-eq.
Waarvan emissies	30	30	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-190	-390	kg CO ₂ -eq.
Verskil met verbranding in AVI	-200	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

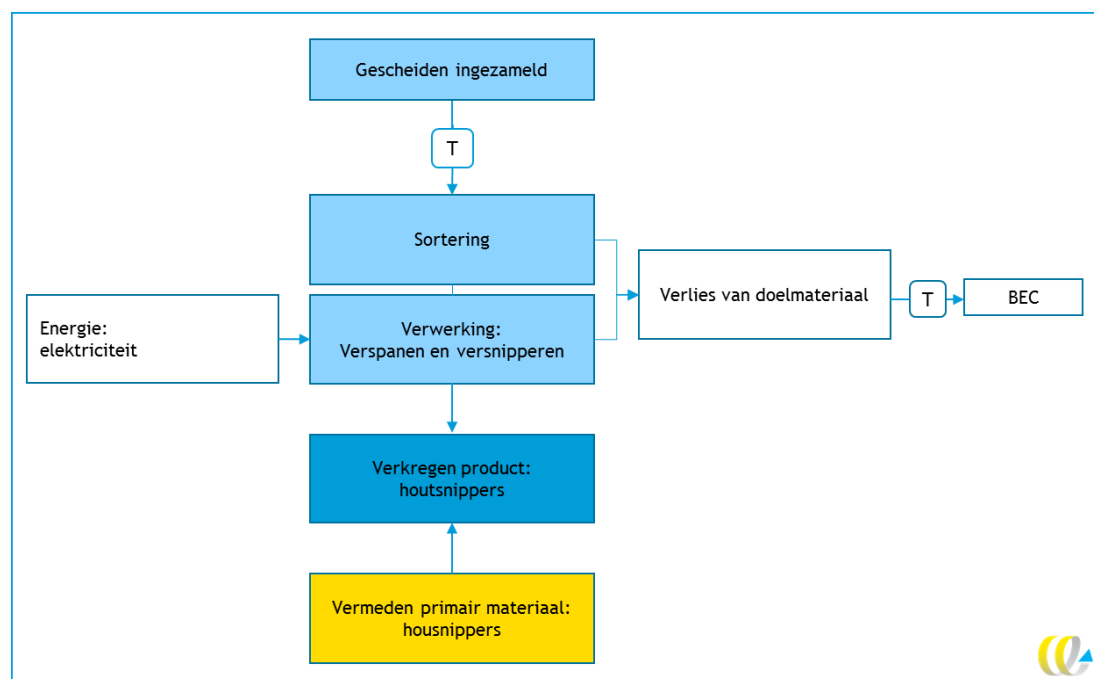
10.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

10.2.1 Recycling van hout

Houtafval afkomstig uit huishoudens wordt apart ingezameld via milieustraten. Na verwijdering van ongeschikt hout wordt het geschikt bevonden hout verspaand en versnipperd tot houtsnippers. Resterende vervuiling, zoals metalen, plastic en glas wordt verwijderd. De houtsnippers die dan overblijven kunnen gebruikt worden voor de productie van spaanplaat. Ze worden hiervoor met zaagsel en een bindmiddel samengeperst tot platen (Recycling Platform, sd).

Het deel van het ingezamelde houtafval dat kwalitatief niet geschikt is voor recycling wordt bijgestookt in een bioenergiecentrale (BEC). Dit is gemodelleerd met verbranding in een AVI als benadering, omdat bij ons (nog) geen milieukundige informatie beschikbaar is voor bijstook van biomassa in een BEC.

Figuur 21 - Processtappen recycling van houtafval



In Tabel 29 zijn de in- en outputs voor recycling van 1 ton houtafval weergegeven. De gekozen proceskaarten en emissiefactoren zijn ook in deze tabel weergegeven.

Tabel 29 - In- en outputs van recycling van brongescheiden houtafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
A- en B-hout	1 ton	N.v.t.	Afval input
Elektriciteit	3,5 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Hoeveelheid op basis van CE Delft (2019b). Proceskaart op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). Energiebehoefte voor verwerking en verspanen van het afgedankte hout: 2 tot 5 kWh/ton (ECP, sd).
Verloren materiaal			
Hout	200	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration	Aanname: 20% van het ingezamelde hout wordt niet gerecycled vanwege afkeuring (kwaliteit).
Vermeden materiaal, elektriciteit en warmte			
Vermeden houtsnippers	-800 kg	Wood chips, dry, measured as dry mass {RER} market for	Aanname: 20% van het ingezamelde hout wordt niet gerecycled vanwege afkeuring (kwaliteit).
Vermeden elektriciteit	-420 MJ	Nederlandse elektriciteit	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van hout is 14,0 MJ/kg volgens Ecoinvent.

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Vermeden warmte	-780 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van hout is 14,0 MJ/kg volgens Ecoinvent.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5 tenzij anders aangegeven.

10.2.2 Verbranding van hout

Hout dat in het restafval belandt wordt verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies van verbranding van hout zijn weergegeven in Tabel 30.

Tabel 30 - In- en outputs van de verbranding van houtafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding van hout	1 ton	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration	Verbranding van hout
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	-2.100 MJ	Nederlandse elektriciteit	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van hout is 14,0 MJ/kg volgens Ecoinvent.
Vermeden warmte	-3.900 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van hout is 14,0 MJ/kg volgens Ecoinvent.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5.

11 Groente-, fruit- en tuinafval (gft)

Het gft in Nederland bevat ongeveer 80% tuinafval en 20% voedselresten. In Nederland wordt groente-, fruit- en tuinafval (gft) gecomposteerd of vergist met na-compostering. Dit is de minimumstandaard die gedefinieerd is in het LAP3 (RWS, 2019b). Ongeveer 3% van het gft in Nederland wordt opgewerkt tot biomassa en bijgestookt in bio-energiecentrales (Attero, 2020). Aangezien dit geen recycling betreft is dit aandeel niet meegenomen in de analyse. Gft dat in het restafval terechtkomt wordt verbrand in een AVI.

Met het biogas uit vergisting wordt elektriciteit en warmte in een wkk opgewekt, of het biogas wordt opgewerkt tot groengas (CE Delft, 2019a). Compostering en na-compostering van het digestaat uit vergistingsproces leiden tot compost. Dit compost vervangt veen en kunstmest en legt koolstof vast in de bodem. Het betreft koolstof dat eerder door de gewassen/planten was opgenomen uit de lucht. Deze koolstofopname is inbegrepen in de analyse.

Nederland kent een grote variatie in type composteer- en vergistingsinstallaties. Deze verschillen in aanpak. Zo is de verblijftijd in een installatie een cruciale parameter voor directe broeikasgasemissies naar lucht, energiebehoefte en type opbrengst. Ook de samenstelling van het gft, die van gemeente tot gemeente kan verschillen, heeft hier invloed op. Ook restwarmtelevering komt oor bij een enkel bedrijf, maar dit is niet inbegrepen in deze analyse op hoofdlijnen (Attero, 2020).

De resultaten representeren een indicatie, gebaseerd op informatie uit diverse algemene bronnen over energiebehoefte, emissies en opbrengst. Voor het bepalen van CO₂-kentallen voor een specifieke installatie of gft-fractie van een specifieke gemeente raden we aan om nadere analyse uit te laten voeren.

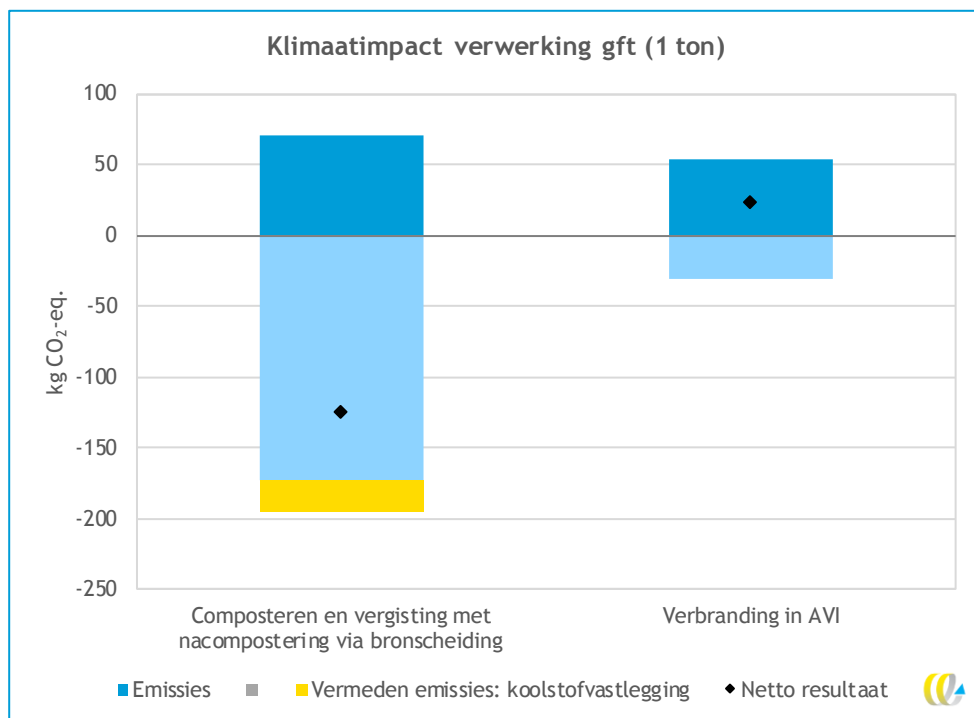
Net als bij de andere biobased materialen is de klimaatimpact (CO₂-eq.) niet de enige relevante milieukundige indicator. Recycling van gft tot compost heeft, ten opzichte van verbranding, ook voordelen op het gebied van (verbetering van) bodemkwaliteit

11.1 Resultaat

Figuur 22 en Tabel 31 tonen de klimaatimpactresultaten van verbranding in een AVI en van recycling via compostering en vergisting met na-compostering. De twee recyclingroutes zijn tezamen getoond, want zij kunnen niet gesplitst worden: de hoeveelheid compost, jaarlijks in Nederland geproduceerd, is in de gehanteerde bron (RWS, 2020) opgegeven voor compostering en na-compostering tezamen.

Te zien is dat de recyclingroute (tot compost en biobrandstof) een gunstiger resultaat heeft dan verbranding in een AVI. Koolstofvastlegging draagt hier mede aan bij, maar de grootste winst wordt geboekt door het compost en de biobrandstoffen.

Figuur 22 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton gft



Tabel 31 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton gft

	Recycling: gewogen gemiddelde resultaat o.b.v. composteren en vergisten via bronscheiding	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-120	20	kg CO₂-eq.
Emissies	70	50	kg CO ₂ -eq.
Vermeden emissies: grondstoffen/brandstoffen	-170	-30	kg CO ₂ -eq.
Vermeden emissies: koolstofvastlegging	-20	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.
Verskil met verbranding in AVI	-150	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

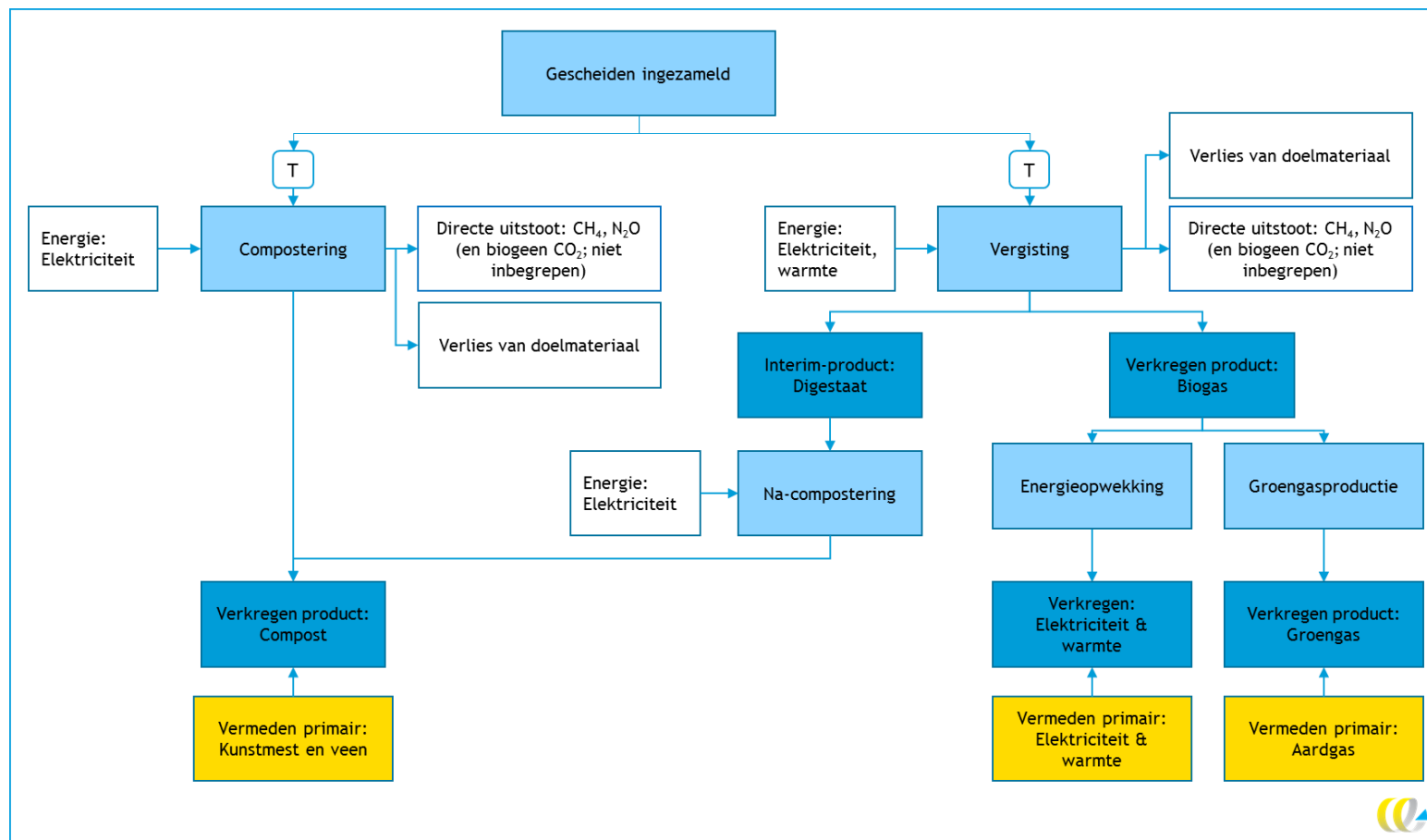
NB: resultaten zijn afgerond op tientallen. Getal bij 'verschil' telt niet op door afronding.

11.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

11.2.1 Recycling

Figuur 23 toont het systeem van compostering en vergisting met na-compostering.

Figuur 23 - Processtappen recycling van gft-recycling via compostering en vergisting met na-compostering



In 2018 werd in Nederland ruim 1.500 kton gft uit huishoudens en organisch afval van bedrijven gescheiden ingezameld en verwerkt. Daarvan werd ongeveer 450 kton, ofwel 30%, verwerkt via vergisting met na-compostering (RWS, 2020). Dezelfde bron geeft de hoeveelheid eindproducten die vergisting met na-compostering en compostering opleverden. Wij zijn ervan uitgegaan dat de rest van het gft, de 70% die niet via vergisting met na-compostering wordt verwerkt, wordt gecomposteerd.

De massabalans uit (RWS, 2020) is aangevuld met informatie over gemiddeld energieverbruik en directe emissies van broeikasgassen naar lucht uit andere bronnen, voor vergisting met na-compostering enerzijds en compostering anderzijds. Eindverwerking (verbranding) van een klein aandeel verloren doelmateriaal is niet inbegrepen in de analyse.

Energieverbruik en directe emissies naar lucht

Tabel 32 toont de aspecten van recycling van gft die leiden tot klimaatimpact: energieverbruik voor de recycleprocessen en broeikasgassen die vrijkomen tijdens het vergisten en (na-)composteren.

Tabel 32 - Inputs en directe emissies bij compostering en vergisting van na-compostering per ton gft

Type	Hoeveelheid voor compostering	Hoeveelheid voor vergisting met na-compostering	Emissiefactor/ Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input				
Gft-afval	1 ton	1 ton	N.v.t.	Afval input, geen impact
Elektriciteit voor compostering van gft	32 kWh		Nederlandse elektriciteitsmix	Hoeveelheid op basis van Stichting RIONED en STOWA (2015). Emissiefactor op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Directe emissies				
Methaan (CH ₄)	450 gram	480	Methaan naar lucht	(Cuhls, et al., 2015) Compostering: gesloten composteerinstallatie, opwerking tot vers compost. Vergisting met na-compostering: route vergistingsinstallatie. Mediaanwaarden. Emissiefactor op basis van IPCC 2013 GWP 100a impact-assessmentmethode.
Distikstofmonoxide (N ₂ O)	79 gram	9,7 gram	N ₂ O naar lucht	

Daarnaast is elektriciteit en een hulpstof nodig voor het opwerken van groengas, verkregen via vergisting.

Tabel 33 - Input en output per m³ groengasproductie

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Elektriciteit	0,13 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Hoeveelheid op basis van Stichting RIONED en STOWA (2015). Proceskaart op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Hulpstof amines	0,06 gram	Monoethanolamine {RER} ethanolamine production	Hoeveelheid proceskaart op basis van Stichting RIONED en STOWA (2015)

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

Verkregen producten

Tabel 34 bevat de verkregen producten uit compostering en vergisting met na-compostering in 2018. De opbrengst per ton gft is berekend door de hoeveelheden te delen per totale hoeveelheid verwerkt gft in 2018 (RWS, 2020).

Tabel 34 - Verkregen producten in Nederland in 2018 (RWS, 2020)

Verkregen product	Hoeveelheid in 2018 (RWS, 2020)	Dit vermijdt	Proceskaart/emissiefactor
Groengas	18,1 miljoen m ³	Aardgas	-2,0 kg CO ₂ -eq./Nm ³
Elektriciteit	28,9 GWh	Conventionele elektriciteit	Emissiefactor op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Warmte	80,3 TJ	Warmte uit aardgas	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical.
Compost	714 kton	Veen en kunstmest	Veen: -850 kg CO ₂ -eq./ton Kunstmest: -50 kg CO ₂ -eq./ton Bron: (CE Delft, 2019a)

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

Het verkregen compost wordt in diverse sectoren toegepast. Een verdeling naar sector is ook beschikbaar in (RWS, 2020). Afhankelijk van de inzet vervangt het compost veen of kunstmest. Net als in het project (CE Delft, 2019a) doen wij de volgende aannames:

- compost dat wordt verwerkt via de potgrond- en opzaksector vervangt veen;
- compost dat wordt toegepast in de glastuinbouwsector vervangt veen;
- compost dat wordt ingezet op land via de overige sectoren (waarvan akkerbouw de grootste sector is) vervangt kunstmest.

De verhouding komt dan uit op 17% veenvervanging en 83% kunstmestvervanging.

Compost legt de uit de lucht opgenomen CO₂ in het gft vast in de bodem. Koolstof-vastlegging van organische stof in de bodem, en de daarmee gepaard gaande vermeden CO₂-uitstoot, is berekend in (CE Delft, 2020b). De CO₂-vastlegging is, volgens genoemde bron 23,3 kg CO₂ per ton compost en 25,1 kg per ton na-gecomposteerd digestaat.

11.2.2 Verbranding van gft

Gft dat in het restafval belandt wordt verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies en vermeden emissies zijn weergegeven in Tabel 35.

Tabel 35 - In- en outputs van verbranding van gft via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Verbranding gft	1 ton	Biowaste {GLO} treatment of biowaste, municipal incineration	Verbranding van biologisch afval.
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	-172 MJ	Nederlandse elektriciteitsmix	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van gft is 1,15 MJ/kg (CE Delft, 2018b).
Vermeden warmte	-322 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van gft is 1,15 MJ/kg (CE Delft, 2018b).

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

12 Grof tuinafval

Grof tuinafval is organisch afval dat niet in de gft-container past, waaronder groot snoei-afval, kerstbomen en grote hoeveelheden gemaaid gras en bladafval (ROVA, 2020; Irado, 2020). Het verschil met gft is dat het geen voedselresten bevat en meer houtig materiaal bevat. Het wordt gescheiden ingezameld via milieustraten of opgehaald aan huis. In Nederland wordt grof tuinafval gecomposteerd. Vergisting van grof tuinafval is ongebruikelijk vanwege lage gasopbrengsten (Attero, 2020).

In plaats van recycling wordt grof tuinafval ook wel ingezet als brandstof in biomassa-energiecentrales (Milieucentraal, 2020; RWS, 2019c). Deze verbrandingsroute is niet opgenomen in dit rapport, omdat het geen recyclingroute is.

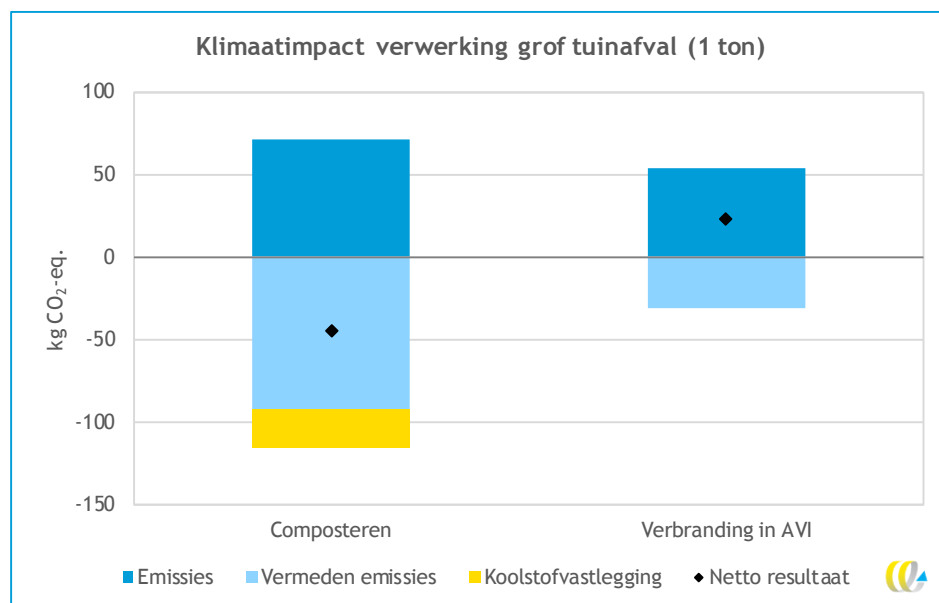
Als grof tuinafval in het restafval terechtkomt, ook al komt dat niet vaak voor, wordt het verbrand in een AVI.

Net als bij de andere biobased materialen is de klimaatimpact (CO₂-eq.) niet de enige relevante milieukundige indicator. Recycling van grof tuinafval heeft, ten opzichte van verbranding, ook voordelen op het gebied van (verbetering van) bodemkwaliteit.

12.1 Resultaat

De resultaten worden getoond in Figuur 24 en Tabel 36. Te zien is dat compostering tot een netto klimaatwinst leidt en verbranding een netto klimaatimpact. Mogelijk is de klimaatwinst van recycling (compostering) een onderschatting, aangezien we uitgaan van eenzelfde opbrengst per ton inputmateriaal als bij gft. Maar bij gft vindt ook vergisting plaats; waarschijnlijk is de compostopbrengst per ton grof tuinafval hoger bij directe compostering.

Figuur 24 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton grof tuinafval



Tabel 36 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton grof tuinafval, via compostering

	Recycling: gewogen gemiddelde resultaat o.b.v. composteren	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-50	20	kg CO₂-eq.
Waarvan emissies	70	50	kg CO ₂ -eq.
Vermeden emissies: grondstoffen/brandstoffen	-90	-30	kg CO ₂ -eq.
Vermeden emissies: koolstofvastlegging	-20	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.
Verschil met verbranding in AVI	-70	20	kg CO ₂ -eq.

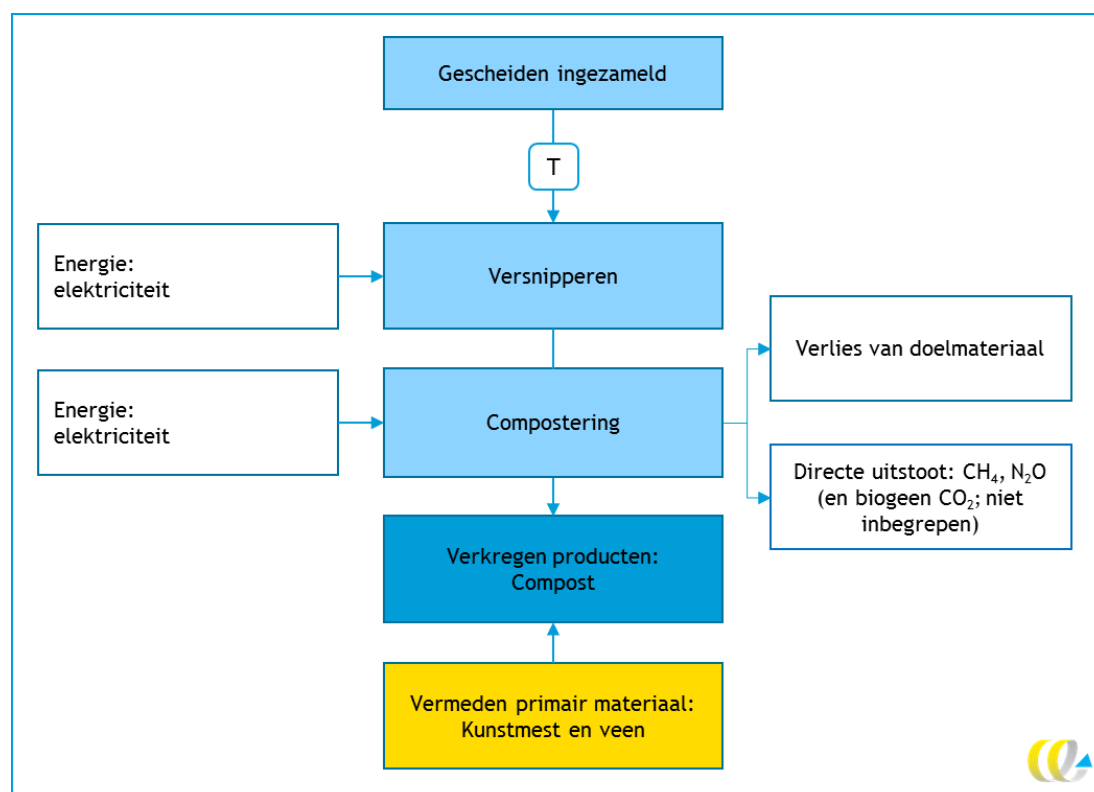
NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

12.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

12.2.1 Recycling van grof tuinafval

Grof tuinafval wordt versnipperd voorafgaand aan compostering (Irado, 2020). Compostering vindt plaats zoals beschreven voor gft in Hoofdstuk 11. Figuur 25 toont de diverse stappen voor opwerking van grof tuinafval tot compost.

Figuur 25 - Processtappen recycling van grof tuinafval compostering



Tabel 37 toont de inputs, outputs en vermeden emissies bij compostering van 1 ton grof tuinafval.

Tabel 37 - In- en outputs van compostering van 1 ton grof tuinafval

Type	Hoeveelheid	Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Diesel voor versnippering	3 liter (30 kWh)	Diesel, burned in building machine {GLO} processing	Bron voor de hoeveelheid: (CE Delft, 2020b).
Elektriciteit voor compostering	5 kWh	Nederlandse elektriciteitsmix	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). Bron voor de hoeveelheid: (CE Delft, 2020b).
Output			
Opbrengst compost	500 kg	Dit vermijdt veen en kunstmest	Bron voor de hoeveelheid: (CE Delft, 2020b). Veen: -850 kg CO ₂ -eq./ton Kunstmest: -50 kg CO ₂ -eq./ton Bron: (CE Delft, 2019a)
Directe emissie: methaan	450 gram	Methaan naar lucht	(Cuhls, et al., 2015)
Directe emissie: Distikstofmonoxide (N ₂ O)	79 gram	N ₂ O naar lucht	Compostering: gesloten composteerinstallatie, opwerking tot vers compost. Vergisting met na-compostering: route vergistingsinstallatie. Mediaanwaarden. Emissiefactor op basis van IPCC 2013 GWP 100a impactassessmentmethode.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5.

12.2.2 Verbranding van grof tuinafval

Als grof tuinafval niet gerecycled wordt, wordt dit verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies en vermeden emissies zijn weergegeven in Tabel 38.

Tabel 38 - In- en outputs van verbranding van grof tuinafval via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Versnippering grof tuinafval	1 ton	Wood chipping, industrial residual wood, stationary electric chipper {RER} processing	Versnipperen tuinafval, op basis van versnippering hout.
Verbranding grof tuinafval	1 ton	Biowaste {GLO} treatment of biowaste, municipal incineration	Verbranding van biologisch afval.
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	-172 MJ	Nederlandse elektriciteit	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van grof tuinafval is 4,1 MJ/kg (CE Delft, 2019b).
Vermeden warmte	-322 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van grof tuinafval is 4,1 MJ/kg (CE Delft, 2019b).

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

13 Frituurvet en olie

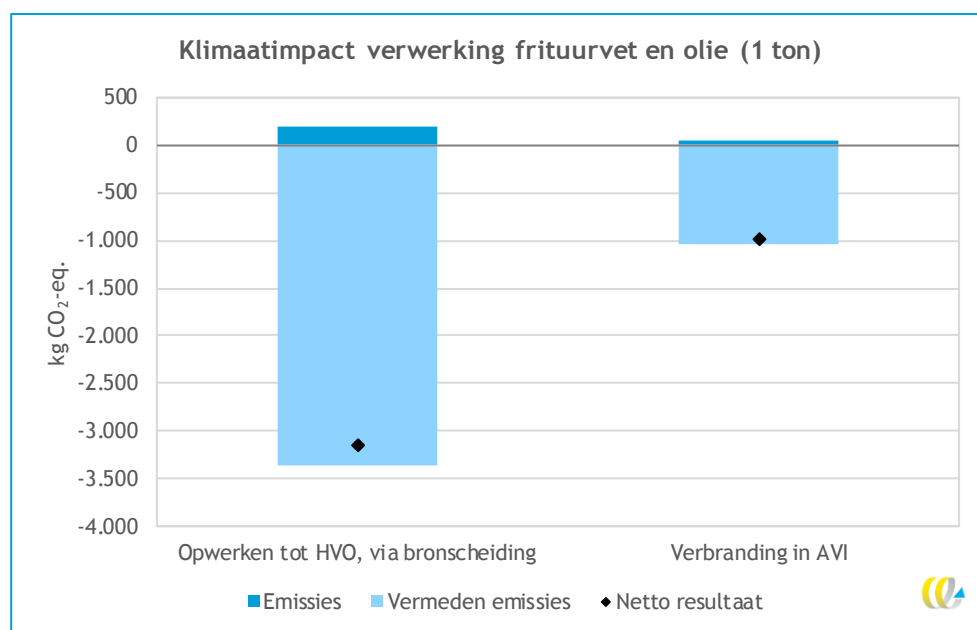
In Nederland wordt frituurvet en olie apart ingezameld via inleverpunten zoals milieu-straten, supermarkten en sportclubs (MVO, 2020). Na inzameling wordt hier de biobrandstof *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO) van gemaakt (MVO, 2020; RWS, 2019e).

Letterlijk genomen is het inzamelen van frituurvet en omzetten tot biobrandstof geen recycling. Het is immers een energietoepassing en geen materiaaltoepassing. Na verbranding van het HVO is de grondstof verdwenen. Het is echter wel de gangbare verwerk-route voor het apart ingezamelde frituurvet, vandaar dat deze route hier is geselecteerd.

13.1 Resultaat

De resultaten worden getoond in Figuur 26 en Tabel 39. Te zien is dat zowel opwerking tot HVO als verbranding tot een klimaatwinst leiden. Het nettoresultaat van opwerking tot biobrandstof is echter een stuk beter dan van verbranding met energierterugwinning. De grotere klimaatwinst bij opwerking tot HVO komt met name doordat het HVO toegepast kan worden als vervanging voor diesel. Hierdoor worden alle fossiele emissies geassocieerd met de productie en verbranding van (petrochemische) diesel 1-op-1 vermeden.

Figuur 26 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton frituurvet en olie



Tabel 39 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton frituurvet en olie

	Opwerking via bronscheiding tot HVO	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-3.150	-980	kg CO ₂ -eq.
Waarvan emissies	200	60	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-3.350	-1.040	kg CO ₂ -eq.
Verskil met verbranding in AVI	-2.170	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

13.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

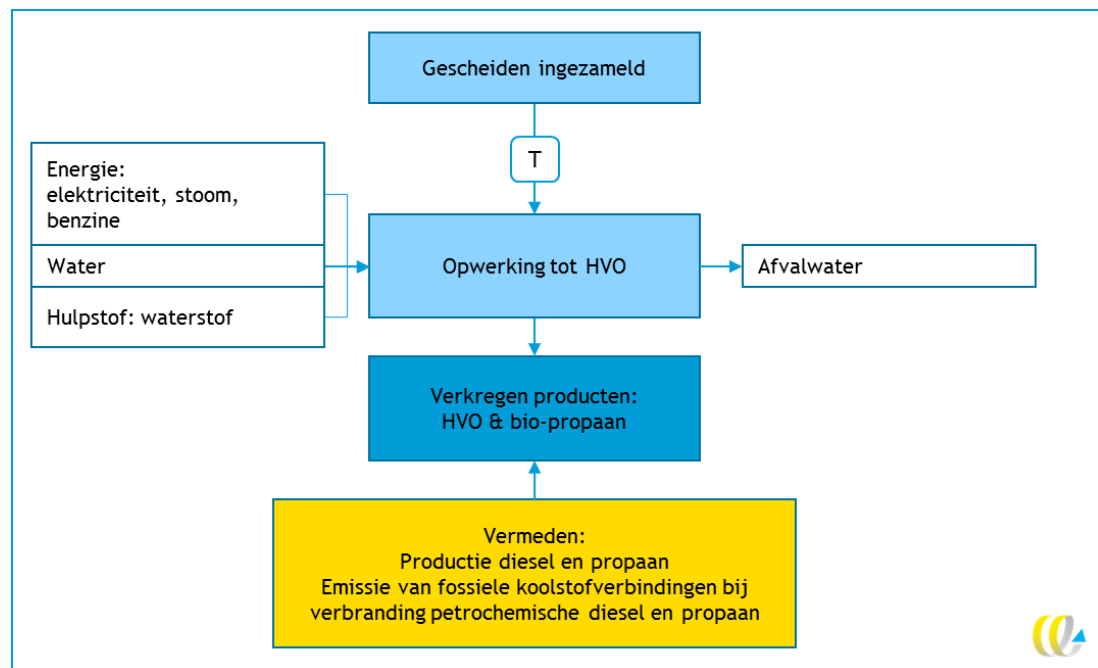
13.2.1 Opwerking van frituurvet en olie

Het opwerkproces voor frituurvet en olie is gebaseerd op de productie van de biobrandstof HVO. Deze tweede generatie biobrandstof wordt volledig uit frituurvet en gebruikte (kook) olie gemaakt. Tijdens het opwerkproces wordt frituurvet en olie met waterstof behandeld en komt HVO en een kleine hoeveelheid bio-propaan vrij. Als vertrekpunt nemen we 100% plantaardige olie⁷, aangezien ingezameld frituurvet en olie van particulieren voor het overgrote deel van plantaardige afkomst is (MVO, 2020).

Voor de modellering maken we gebruik van een studie van TNO (2016). De inventarisatie van inputs en outputs voor opwerking tot HVO en de vermeden brandstof zoals gerapporteerd in TNO (2016) hebben wij overgenomen. Het type elektriciteitsmix en transportafstand zijn aangepast, want deze gelijkgesteld voor alle materiaalstromen (zie Paragrafen 2.3 en 2.4). De resultaten in dit rapport en uit de studie van TNO zijn niet direct vergelijkbaar met elkaar, om bovengenoemde reden, maar ook omdat de scope verschillend is. Dit rapport gaat uit van 'HVO-productie uit 1 ton frituurvet en olie' (opbrengt: ton 0,83 HVO), waar de TNO-studie als scope heeft 'de productie van 1 ton HVO' (benodigd: 1,2 ton frituurvet en olie).

Figuur 27 toont de diverse stappen in het opwerkproces en toont op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyse is inbegrepen.

Figuur 27 - Processtappen HVO-productie van frituurolie en vet



⁷ Bij HVO-productie uit dierlijke vetten is een extra stap nodig (*rendering*). Daarvoor moet het dierlijke vet apart ingezameld zijn.

In Tabel 40 zijn de gehanteerde in- en outputs voor de verwerking van 1,2 ton frituurvet en olie weergegeven, volgens TNO (2016). De resultaten in deze rapportage zijn vervolgens wel berekend per 1 ton verwerkt frituurvet en olie.

Tabel 40 - In- en outputs bij de verwerking van 1,2 ton frituurvet en olie (TNO, (2016))

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Afgewerkt frituurvet en olie	1.200 kg	N.v.t.	Afval-input, geen impact
Water	0,029 m ³	N.v.t.	Onttrekking van water wordt niet gekarakteriseerd binnen de IPCC 2013 GWP 100a impactassessmentmethode, en weegt dus niet mee in de totale impact.
Waterstof	42 kg	Hydrogen, liquid {RoW} market for	Op basis van tabel 17 in de rapportage van TNO (2016).
Elektriciteit	107 MJ	Nederlandse elektriciteit	Hoeveelheid op basis van tabel 17 in de rapportage van TNO (2016). Proceskaart op basis van meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a).
Benzine, laag zwavelgehalte	25 kg	Petrol, low-sulphur {Europe without Switzerland} market for	Verbranding van benzine. Aanpassing van tabel 17 in de rapportage van TNO (2016), waar 25 kg benzine wordt aangegeven. LHV van benzine is 45,3 MJ/kg (Ecoinvent).
Stoom	9 kg	Steam, in chemical industry {RER} production	Op basis van tabel 17 in de rapportage van TNO (2016).
Directe emissies			
Afvalwater	0,11 m ³	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average	Op basis van tabel 17 in de rapportage van TNO (2016). Algemene afvalwaterzuivering als benadering.
CO ₂ naar lucht, biogeen	48 kg	N.v.t.	Biogene CO ₂ -uitstoot wordt niet gekarakteriseerd binnen de IPCC 2013 GWP 100a impactassessmentmethode, en weegt dus niet mee in de totale impact.
Vermeden conventionele brandstoffen			
Productie diesel	-44.000 MJ (1.030 kg)	Diesel {RER} market group for	De productie van HVO vermijdt de productie van petrochemische diesel. De LHV van HVO is 44 MJ/kg (TNO, 2016). De LHV van petrochemische diesel is 42,7 MJ/kg (Ecoinvent).
Productie propaan	-3.303 MJ (72 kg)	Propane {GLO} market for	De productie van bio-propaan vermijdt de productie van petrochemisch propaan. De LHV van bio-propaan is gelijkgesteld aan de LHV van petrochemisch propaan: 46,5 MJ/kg (Ecoinvent).
Verbranding diesel	-44.000 MJ	Emissie van alle fossiele koolstofverbindingen uit Diesel, burned in building machine {GLO} processing	De verbranding van HVO vermijdt uitstoot van fossiele koolstofverbindingen.

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Verbranding bio-propan	-3.300 MJ	Emissie van alle fossiele koolstofverbindingen uit Propane, burned in building machine {GLO} propane, burned in building machine	De verbranding van bio-propan vermijdt uitstoot van fossiele koolstofverbindingen.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

13.2.2 Achtergrondgegevens verbranding van frituurvet en olie

Als frituurvet en olie in het restafval belanden, wordt het verbrand in een AVI. De gebruikte proceskaarten voor de emissies en vermeden emissies zijn weergegeven in Tabel 41.

Tabel 41 - In- en outputs van verbranding van frituurvet en olie via restafval

Type	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input, emissies			
Verbranding frituurvet en olie	1 ton	Biowaste {GLO} treatment of biowaste, municipal incineration	Verbranding van frituurvet en olie, op basis van verbranding van biologisch afval.
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit	-5.670 MJ	Nederlandse elektriciteit	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van frituurvet en olie is 37,8 MJ/kg (Engineering Toolbox, 2020).
Vermeden warmte	-10.580 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden van warmte uit aardgas. De LHV van frituurvet en olie is 37,8 MJ/kg (Engineering Toolbox, 2020).

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

14 Luiers en incontinentiemateriaal

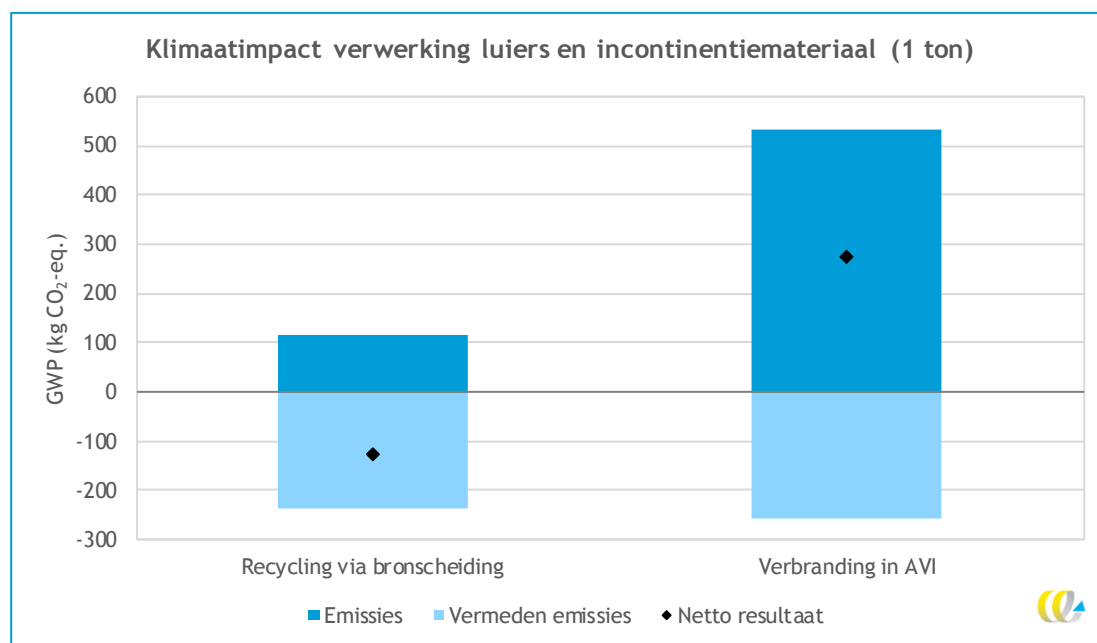
In Nederland worden luiers en incontinentiemateriaal verbrand in een AVI. Recentelijk is een techniek ontwikkeld om de grondstoffen uit luiers en incontinentiemateriaal te recyclen. Met behulp van thermische drukhydrolyse (TDH) kunnen de plastics uit de afvalstroom worden teruggewonnen en de resterende biomassa kan gebruikt worden voor de productie van biogas.

De resultaten in dit rapport zijn gebaseerd op een eerdere LCA-studie van CE Delft naar de klimaatimpact van verbranding en recycling van luiers en incontinentiemateriaal (CE Delft, 2018c). De modellering uit die studie is voor dit rapport op enkele punten geüpdatet, waardoor de resultaten iets zullen verschillen. De resultaten zijn gebaseerd op een afvalstroom van 50% luiers en 50% incontinentiemateriaal.

14.1 Resultaat

De resultaten worden getoond in Figuur 28 en Tabel 42. Te zien is dat de recycling van luiers en incontinentiemateriaal netto zorgt voor het vermijden van emissies, terwijl verbranding leidt tot een netto-emissie. De vermeden emissies van recycling en verbranding zijn ongeveer even groot, maar de emissies van verbranding zijn aanmerkelijk hoger dan de emissies van recycling.

Figuur 28 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton luiers en incontinentiemateriaal



Tabel 42 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton luiers en incontinentiemateriaal

	Recycling via bronscheiding	Verbranding in AVI	Eenheid
Totaal: netto resultaat	-120	280	kg CO₂-eq.
Waarvan emissies	120	540	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-240	-260	kg CO ₂ -eq.
Verschil met verbranding in AVI	-400	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

14.2 Omschrijving en achtergrondgegevens

14.2.1 Recycling van luiers

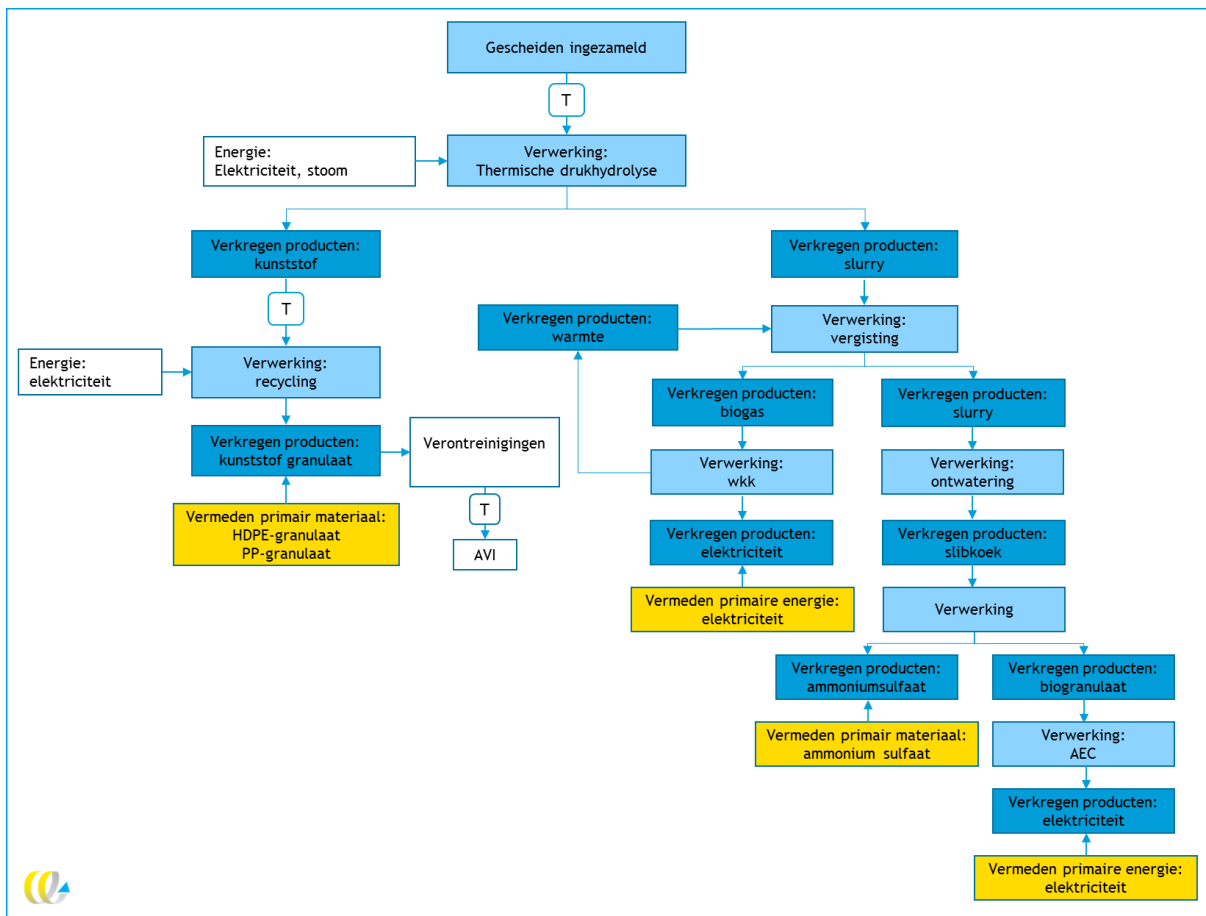
Bij het recyclingproces worden twee reactors gevuld met gebruikt luiermateriaal en vergist digestaat. Vervolgens worden deze reactors afwisselend van elkaar verwarmd met stoom en onder druk gezet.

Gedurende het TDH-proces ondergaat het organische materiaal in de reactor hydrolyse: het cellulair weefsel en lange polymeerketens worden afgebroken door de invloed van water, hitte en druk naar de originele, kleinere moleculaire componenten. Tegelijkertijd smelten de kunststof componenten van het inputmateriaal en vormen deze een drijvende laag bovenop de andere onderdelen. Hierdoor kan dit worden gescheiden van de organische slurry. De kunststof wordt vervoerd naar een granulatiebedrijf en kan worden hergebruikt in nieuwe producten (CE Delft, 2018c).

De slurry die overblijft wordt naar een vergister in een rioolwaterzuiveringsinstallatie gepompt. De vergisting die daar plaatsvindt resulteert in biogas, wat gebruikt wordt in een wkk voor de opwekking van warmte en elektriciteit. Het digestaat van de vergisting wordt verwerkt tot biogranulaat. Bij dit proces wordt ammoniumsulfaat teruggewonnen wat ingezet kan worden als meststof (CE Delft, 2018c).

Figuur 29 toont de diverse stappen in het recycleproces en toont op hoofdlijnen wat in de milieukundige analyse is inbegrepen.

Figuur 29 - Processtappen recycling luiers en incontinentiemateriaal



Aangezien het recyclingproces uit een groot aantal stappen bestaat is de modellering omvangrijk. Om die reden worden hier niet alle in- en outputs van de modellering weergegeven. Deze in- en outputs zijn terug te vinden in het oorspronkelijke rapport van CE Delft (2018c). Zoals hierboven vermeld is de modellering op een aantal punten geüpdatet. De elektriciteit is overal in het model aangepast naar de elektriciteit op basis van de meest recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a), zoals deze ook in voor de andere afvalstromen in dit rapport is gebruikt. Ook voor warmte is de proceskaart gebruikt die voor de andere materiaalstromen gebruikt is, zoals beschreven in Paragraaf 2.5.

14.2.2 Verbranding van luiers

De gebruikte proceskaarten voor de emissies van verbranding van de materialen waaruit luiers en incontinentiemateriaal zijn opgesteld, zijn weergegeven in Tabel 43.

De hoeveelheden zijn gebaseerd op de 50% luiers en 50% incontinentiemateriaal.

Tabel 43 - In- en outputs van verbranding van 1 ton luiers en incontinentiemateriaal via restafval

Materiaalsoort	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Input			
Superabsorberende polymeervezels (SAP)	68 kg	Waste plastic, mixture {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	Voor dit materiaal is geen Ecoinvent-verbrandingsproces beschikbaar. Als proxy is verbranding van mixed plastic afval gekozen. De CO ₂ -emissies zijn aangepast voor het koolstofgehalte in SAP.
Fluff pulp	125 kg	Waste paperboard {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	Er wordt aangenomen dat fluff pulp in luiermateriaal uit cellulosevezels bestaat. Er is geen Ecoinvent-verbrandingsproces voor cellulose beschikbaar. Als proxy is verbranding van (afval) karton gekozen.
Polypropyleen	46 kg	Waste polypropylene {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	-
Elastiek en zelfklevende tape	20,5 kg	Waste rubber, unspecified {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	Elastiek wordt vaak gemaakt van rubber.
Polyethyleen (folie)	16 kg	Waste polyethylene {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	-
Lijm	8,5 kg	Waste plastic, mixture {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	We nemen aan dat dit synthetisch materiaal is. Voor lijm is geen Ecoinvent-verbrandingsproces beschikbaar. Als proxy is daarom gekozen voor verbranding van mixed plastic afval.
Vloeibaar bioafval	675 kg	Raw sewage sludge {CH ₂ } treatment of, municipal incineration	Met 'vloeibaar bioafval' wordt het natte organisch materiaal (inhoud) in het luiermateriaal bedoeld. Omdat de samenstelling vergelijkbaar is met RWZI-slib, is als proxy verbranding van RWZI-slib gekozen.
Anders	1,5 kg	-	Verwaarloosbare hoeveelheid (< 0,2%). Er wordt aangenomen dat dit de resultaten van de LCA niet beïnvloedt, en wordt daarom niet opgenomen in de modellering.
Vermeden elektriciteit en warmte			
Vermeden elektriciteit 500 kg luiers	-575 MJ	Nederlandse elektriciteit	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van luiers is 7,7 MJ/kg.
Vermeden elektriciteit 500 kg incontinentiemateriaal	-500 MJ	Nederlandse elektriciteit	Elektriciteit op basis van de meeste recente emissiekentallen elektriciteit van CE Delft (2020a). De LHV van incontinentiemateriaal is 6,6 MJ/kg.

Materiaalsoort	Hoeveelheid	Emissiefactor/Proceskaart	Aanvullende opmerkingen
Vermeden warmte 500 kg luiers	-1.075 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van luiers is 7,7 MJ/kg.
Vermeden warmte 500 kg incontinentiemateriaal	-925 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {NL} heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100 MW electrical	Vermeden warmte uit aardgas. De LHV van incontinentiemateriaal is 6,6 MJ/kg.

Bron van de emissiefactor/proceskaart is de Ecoinvent-database v.3.5, tenzij anders aangegeven.

NB: het totaal telt niet op tot 1 ton omdat de verwerking van 40 kg vuilniszakken, die oorspronkelijk in het model zaten, buiten beschouwing is gelaten.

15 Afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA)

Onder afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (AEEA) vallen alle afgedankte apparaten waar een stekker aan zit of batterijen in zitten. AEEA is een brede productgroep die in Nederland gescheiden wordt ingezameld. Bij voorkeur wordt AEEA hergebruikt via kringloopwinkels, reparatiecentra of tweedehandshandel, maar indien dit niet mogelijk is wordt dit type afval gerecycled (Rijksoverheid, 2016). Schadelijke stoffen, zoals in koelkasten en elektronica, worden verwijderd en apart verwerkt. Recycling richt zich op de bulkmaterialen (kunststof, glas, staal, aluminium, koper) en waardevolle metalen. Glas van CRT-beeldbuizen wordt in de meeste gevallen gestort in verband met het aanwezige lood (RWS, 2019f).

De analyse betreft een ruwe inschatting, met belangrijke hiaten en aannames. Onderliggende oorzaken hiervan zijn dat elektrische en elektronische apparatuur een diverse categorie is, met veel typen producten en dat er geen goede milieukundige informatie beschikbaar is waarmee wij het AEEA-recyclingsysteem volledig kunnen doorrekenen. Voor een goede milieukundige analyse van recycling van een apparaat is idealiter een goede massabalans bekend – welke materialen in welke mate worden gerecycled –, energieverbruik voor de diverse recyclingstappen, en hoe finale afvalverwerking van de niet-gerecyclede onderdelen in zijn werk gaat.

Er zijn geen milieukundige analyses beschikbaar van gemiddelde AEEA-verwerking in Nederland. Apparaten die vallen onder AEEA zijn verschillend in aard. Dus eventuele klimaatanalyses van (verwerking van) individuele elektrische of elektronische producten, als deze zouden worden uitgevoerd, zouden anders uit kunnen komen dan de resultaten die wij hier presenteren.

De indicatieve resultaten voor recycling per ton AEEA bevatten de volgende aannames:

- Recyclingemissies zijn op basis van proceskaarten in de Ecoinvent-database:
 - in het gunstige geval omvat het handmatige ontmanteling en energie voor versnipperen van onderdelen;
 - het ongunstige geval representeert het opwerken van een accu t.b.v. recycling (onzekere data uit de Ecoinvent-database).
- Vermeden emissies voor recycling zijn op basis van grondstofrecycling van kunststof behuizingen en metalen, met behulp van samenstelling van enkele typische elektronische producten (koelkast, televisie, stofzuiger). Zie Paragraaf 15.2 voor meer details.
- We nemen aan dat niet alle kunststoffen geschikt zijn voor recycling, maar dat de *recycling rate* 80% is, na sortering. Het materiaal dat niet gerecycled wordt, wordt verbrand, zo nemen we aan. Deze impact zit verrekend in de vermeden emissie van recycling.

Recycling bevat dus de volgende hiaten en onzekerheden:

- hiaat: opwerkprocessen zoals wassen en (om)smelten van materialen is niet inbegrepen;
- hiaat: het verwerken van eventuele schadelijke (vloeistof)stoffen is niet inbegrepen;
- onzekerheid: de *recycling rate* is niet bekend.

De emissies van recycling vallen hoogstwaarschijnlijk te laag uit, wat een wat te gunstig beeld geeft.

Ook bij verbranding zijn er onzekerheden en hiaten:

- De resultaten zijn op basis van de samenstelling van enkele typische elektronische producten (koelkast, televisie, stofzuiger). We weten niet of deze drie representatief zijn voor een ‘gemiddelde ton’ AEEA.
- Er is geen opwerking van eventuele metalen uit bodemassen inbegrepen.

Bij AEEA spelen naast het klimaateffect ook andere milieuthema's een rol, zoals toxische emissies, verzuring en grondstofuitputting. Het is goed om te realiseren dat de focus op alleen klimaateffect voor AEEA geen compleet beeld geeft van het verschil tussen recycling en verbranding.

15.1 Resultaat - INDICATIEF

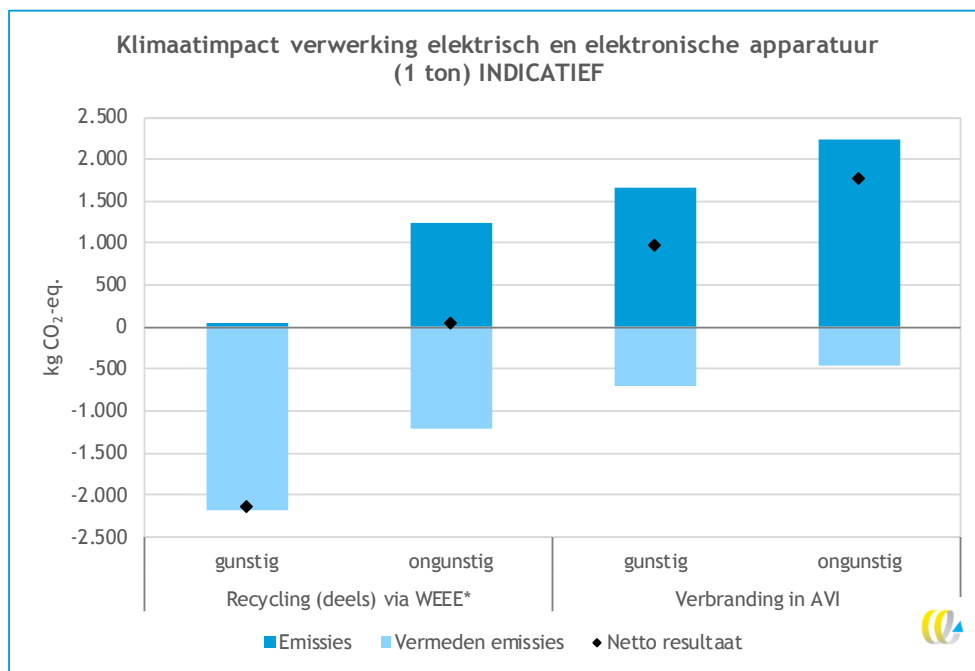
De resultaten worden getoond in Figuur 30 en Tabel 44. Op basis van beschikbare gegevens hebben we een gunstig en een ongunstig scenario opgesteld. Dit wordt toegelicht in Paragraaf 15.2. De onzekere resultaten laten een behoorlijke range zien.

Verbranding leidt tot klimaatimpact, omdat het verbranden van kunststof tot relatief hoge emissies leidt en omdat materialen zoals glas en metalen geen energie opleveren en omdat eventuele opwerking van metalen uit bodemassen niet is inbegrepen.

Bij recycling hangt het sterk af hoeveel materiaal daadwerkelijk wordt opgewerkt tot gerecycled materiaal en hoeveel energie nodig is voor het scheiden van de onderdelen, de materialen en het opwerken ervan. Als dit in balans is en zeker als hernieuwbare energie voor recycling zou worden gebruikt, zal recycling gunstiger uitvallen dan verbranding, vanwege de aard van de materialen: kunststof, glas, metalen. Hoe dan ook is verwerking via WEEE nuttig om juiste de verwerking van toxische stoffen te garanderen.

Vanwege de onzekerheid raden we aan deze resultaten niet zomaar te gebruiken bij milieuberekeningen (bijvoorbeeld voor het beoordelen van beleidsdoelen).

Figuur 30 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton AEEA - INDICATIEF



Tabel 44 - Klimaatimpact van verwerking van 1 ton AEEA - INDICATIEF

	Recycling (deels) via WEEE*		Verbranding in AVI		Eenheid
	Gunstig	Ongunstig	Gunstig	Ongunstig	
Totaal: netto resultaat	-2.100	30	500	1.700	kg CO ₂ -eq.
Waarvan emissies	50	1.200	1.000	2.000	kg CO ₂ -eq.
Waarvan vermeden emissies	-2.200	-1.200	-600	-400	kg CO ₂ -eq.
Verschil met verbranding in AVI	-3.800 (max)	-470 (min)	N.v.t.	N.v.t.	kg CO ₂ -eq.

NB: resultaten zijn afgerond op tientallen.

15.2 Achtergrondgegevens recycling van AEEA

Emissies van recycling per ton product

De Ecoinvent-database bevat twee geschikte datasets die recyclingprocessen representeren van elektrische en/of elektronische apparatuur:

- Waste electric and electronic equipment {GLO} treatment of, shredding;
- Non-Fe-Co-metals, from used Li-ion battery, pyrometallurgical processing {GLO}.

De eerste omvat alleen ontmantelen en versnipperen van een apparaat en zal daarom te beperkt zijn voor volledige opwerking en recycling. Deze dataset leidt tot het gunstige resultaat. De tweede is uitgebreid, maar specifiek voor opwerking van metalen t.b.v. recycling. Deze leidt tot het hoogste resultaat – het ongunstiger maar realistischer scenario.

De Ecoinvent-database bevat daarnaast ook diverse verwerkprocessen voor specifieke apparaten en onderdelen, zoals voor gebruikte desktopcomputers, lcd-schermen en printplaten. Deze proceskaarten handmatige of mechanische ontmanteling van het product, maar daarnaast ook algemene verwerking van de onderdelen. Vaak betreft die algemene verwerking verbranding en stort (mix). Deze datasets zijn dus niet bruikbaar.

Vlak voor oplevering van dit rapport kwam een nieuwe, Franse milieudatabase ter beschikking met daarin informatie over materiaalrecycling via WEEE-systeem (Eco-systèmes/Récyclum, 2020). Ook deze database bevat echter geen gemiddelde informatie voor AEEA-producten. Om de impact en vermeden impact te bepalen moeten de producten, net als wij in deze analyse doen, opgebouwd worden op basis van hun materiaalsamenstelling. Een snelle controle wijst uit dat ook de gegevens uit deze database leiden tot een aanzienlijke range aan impact per materiaal en daarom ook per AEEA-product omdat de AEEA-producten in samenstelling verschillen. Voor dit rapport blijven we daarom de range hanteren zoals berekend met de hier toegelichte methode.

Vermeden emissies door recycling

De vermeden emissies worden ingeschat op basis van de materiaalsamenstelling en aannames over de *recycling rate* per materiaaltipe.

Voor de materiaalsamenstelling (per ton product) maken we gebruik van drie studies waarin de samenstelling van elektrische of elektronische apparatuur is gerapporteerd:

- koelkast; (JEMA, 2014)
- stofzuiger; (Schmid & Mendoza, 2016)
- televisie; (Hischier & Baudin, 2010)

Deze producten staan model voor de breedte AEEA-producten. De koelkast als elektronisch eenvoudig apparaat met voornamelijk kunststof en staal; de stofzuiger staat model voor apparaten met motor (wasmachines, vaatwassers); de televisie staat model voor producten met een beeldscherm en relatief veel elektronica.

Zie Tabel 45 voor de vereenvoudigde samenstelling. In Tabel 46 staat hoe we deze samenstelling hebben gebruikt voor het inschatten van de vermeden emissies. Met de *recycling rate* bedoelen we het aandeel van het materiaal dat daadwerkelijk wordt gerecycled, nadat de productonderdelen van elkaar zijn gescheiden en eventueel versnipperd.

Tabel 45 - Samenstelling enkele apparaten

Onderdeel/materiaal	Koelkast	Stofzuiger	Televisie
Kunststof (niet nader gespecificeerd)	40%	63%	52%
Staal	39%		
Aluminium	1%		
Koper	2%		
'Metalen' (niet nader gespecificeerd). Aanne: 50% ferro, 50% non-ferro		26%	
Glas			28%
Elektronica/printplaten			19%
'Overig'	18%	11%	1%

Tabel 46 - Aanpak modellering vermeden emissies en verwerking

Onderdeel/materiaal	Recycling rate	Aanpak modellering
Kunststof behuizing. Aanname: ABS	80%	Vermeden grondstof: ABS.
Staal, ijzer	100%	Vermeden CO ₂ conform methodiek duurzaam aanbesteden (CE Delft, 2019a).
Koper	100%	
Aluminium	100%	
Glas (tv-scherm)		Verpakkingsglas.
Printplaat	0%	Verwerking conform Ecoinvent 'Used printed wiring boards {RoW} treatment of scrap'.
'Overige materialen'	0%	Aanname: verbranding, conform Ecoinvent 'Hazardous waste, for incineration'.

Verbrandingsemissies van niet-gerecycled kunststof en hierdoor opgewekte energie zijn inbegrepen in de vermeden emissies door recycling. De resultaten van deze drie producten leveren een range op. De hoogste en laagste waarde (per ton product) zijn gebruikt voor het gunstige en ongunstige scenario.

15.2.1 Achtergrondgegevens verbranding van AEEA

De verbrandingsemissies en vermeden emissies per ton AEEA worden ook bepaald op basis van de materiaalsamenstelling van de drie producten (koelkast, stofzuiger, televisie – zie Tabel 45). De resultaten leveren ook hier een range op.

Type materiaal	Emissiefactor/Proceskaart
Kunststof	Waste plastic, consumer electronics {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction
Staal, ijzer	Scrap steel {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction
Koper	Copper in car shredder residue {RoW} treatment of, municipal incineration
Aluminium	Scrap aluminium {CH} treatment of, municipal incineration with fly ash extraction
Glas	Waste glass {Europe without Switzerland} treatment of waste glass, municipal incineration
Printplaat en 'overig'	Hazardous waste, for incineration {CH} treatment of hazardous waste

Type materiaal	Verbrandingswaarde (o.b.v. Ecoinvent)
Kunststof	38,7 MJ/kg; o.b.v. styreen. ABS (behuizing) bestaat voor 50% uit styreen
Staal, ijzer	0
Koper	0
Aluminium	0
Glas	0
'overig'	9,2 MJ/kg; o.b.v. restafval (Ecoinvent 'municipal waste')

Bibliografie

Afvalfonds Verpakkingen, 2019. *Monitoring verpakkingen. Resultaten inzameling en recycling 2018*, sl: sn

Attero, 2020. *Persoonlijk overleg* [Interview] (25 11 2020).

CE Delft, 2011. *LCA : recycling van kunststof verpakkingsafval uit huishoudens*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2017. *Blik: bron- of nascheiden? Afwegingskader voor gemeenten*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018a. *Milieuanalyse recycling van kunststof verpakkingen - update over 2015. In opdracht van KIDV. Resultaten zijn verwerkt in het Kunststofketenproject: https://kidv.nl/media/publicaties/rapportage_kunststofketenproject.pdf?1.1.2-rc.1*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018b. *Afval CO2 factoren voor gemeente Amsterdam*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018c. *LCA afvalverwerking luiermateriaal*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2019a. *Methodiek duurzaam aanbesteden afval : Opgesplitst in basismethodiek en een gedetailleerde methodiek Versie 1.1*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2019b. *Verwerkingsscenario's Vlaams huishoudelijk afval en gelijkaardig bedrijfsafval 2020-2030*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020a. *Emissiekentallen elektriciteit*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020b. *Update aanbestedingsmethodiek groenafval*, Delft: BVOR (Branchevereniging Organische Reststoffen).

Corsten, M., Worrell, E., Duin, A. v. & Rouw, M., 2010. *Saving Materials; Een verkenning van de Potentiele Bijdrage van Duurzaam Afval en Recyclingbeleid aan Broeikasgasemissiereductie in Nederland*, Utrecht: Utrecht University .

CPB, 2019. *Textiel als secundaire grondstof*, Den Haag: Centraal Planbureau (CPB).

Cuhls, C., Mähl, B. & Clemens, J., 2015. *Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

Ecoinvent, 2020. *Ecoinvent Scientific Publications*. [Online]
Available at: <https://www.ecoinvent.org/support/documents-and-files/scientific-publications/scientific-publications.html>

Eco-systèmes/Récyclum, 2020. *WEEE LCI Database*. [Online]
Available at: <http://weee-lci.ecosystem.eco/>
[Geopend 2020].



ECP, sd *ECP technologie beschrijving : Versnipperen*. [Online]
Available at: http://ecp-biomass.eu/sites/ecp-biomass.eu/files/books/ECP%20TF%20Versnipperen_LG_HP_2nd.pdf
[Geopend 7 Juli 2020].

Engineering Toolbox, 2020. *Fuels - Higher and Lower Calorific Values*. [Online]
Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

FFact, 2020. *Massabalans textiel 2018; Onderzoek naar de massabalans van het in Nederland ingezamelde afgedankte textiel en de route en resultaten van de verwerking*, Delft: Rijkswaterstaat en Min.van I&W.

Hischier, R. & Baudin, I., 2010. LCA study of a plasma television device. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Issue 15, pp. 428-438.

Irado, 2020. *Waar laat ik mijn grof tuinafval?*. [Online]
Available at: <https://www.irado.nl/bewoners/afvalsoorten/grof-tuinafval>
[Geopend 2 Juni 2020].

JEMA, 2014. *Report on life cycle inventory (LCI) analyses of refrigerators*, Tokyo: Japanese Electrical Manufacturers' Association (JEMA).

KIDV, 2013. *Resultaten van de Pilot Drankenkartons - vier inzamelsystemen beoordeeld op milieuwinst, kosten en draagvlak*, Den Haag: Kennisinstituut Duurzaam Verpakken.

Maltha Glasrecycling, 2018. *Van afval naar grondstof*. [Online]
Available at: <http://www.maltha.nl/nl-nl>
[Geopend 7 Juli 2020].

Milieucentraal, 2020. *Biomassa*. [Online]
Available at: <https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/energiebronnen/biomassa/>
[Geopend 2 Juni 2020].

MVO, 2020. *Vette Feiten*. [Online]
Available at: <https://mvo.nl/frituurvet>

MVO, 2020. *Waarom inleveren?*. [Online]
Available at: <https://www.frituurvetrecyclehet.nl/waarom-inleveren/>
[Geopend 2020].

NMD, 2020. *Nationale Milieudatabase versie 3.1*, Rijswijk: Nationale Milieudatabase (NMD).

Pachauri, R. K. et al., 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Papier en karton, 2020. *Hoe vaak recycelen?*. [Online]
Available at: <https://papierenkarton.nl/keten-recycling/hoe-werkt-recycling/hoe-vaak-recycelen/>
[Geopend 2 November 2020].



PBL, 2019. *Klimaat- en energieverkenning 2019 (KEV)*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Piegsa, E., 2010. *Ökologische Nachhaltigkeit in der Bekleidungsindustrie*. sl:Diplomica Verlag.

Recycling Platform, sd *Hout*. [Online]
Available at: <https://www.recyclingplatform.nl/recycling-processen/hout>
[Geopend 7 Juli 2020].

Rijksoverheid, 2016. *Wet: Regeling afgedankte elektrische en elektronische apparatuur*. [Online]
Available at: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0034782/2016-02-02>
[Geopend 4 Juni 2020].

RIVM, 2018. *Evaluatie programma Van Afval naar Grondstof (VANG) 2014-2016*, Bilthoven: RIVM.

ROVA, 2020. *Wat is grof tuinafval?*. [Online]
Available at: <https://www.rova.nl/inwoners/faq/329/detail>
[Geopend 2 Juni 2020].

RWS, 2016. *Samenstelling van het huishoudelijk restafval, sorteeranalyses 2015 - Gemiddelde driejaarlijkse samenstelling 2014*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2019a. *LAP3. Sectorplan 04; Gescheiden ingezameld/afgegeven papier en karton*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2019b. *LAP3. Sectorplan 06; Gescheiden ingezameld/afgegeven groente-, fruit- en tuinafval van huishoudens (gft)*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2019c. *LAP3. Sectorplan 08; Groenafval*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2019d. *LAP3. Sectorplan 41; Verpakkingen algemeen*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2019e. *LAP3. Sectorplan 65; Dierlijk afval*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2019f. *LAP3. Sectorplan 71; Afgedankte elektrische en elektronische apparatuur*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2019g. *LAP3. Sectorplan 12; Metalen*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

RWS, 2020. *Afvalverwerking in Nederland, gegevens 2018*, Den Haag: Ministerie van I&W, Rijkswaterstaat (RWS).

SBK, 2014. *Bepalingsmethode Milieuprestatie Gebouwen en GWW-werken*, Rijswijk: Stichting Bouwkwiteit (SBK).

Schmid, A. & Mendoza, J., 2016. *Life cycle environmental impacts of vacuum cleaners and the effects of European regulation*, Manchester: Science of The Total Environment.

Stichting RIONED ; STOWA, 2015. *Huishoudelijke voedselresten in de afvalwaterketen*, sl: Stichting RIONED ; STOWA.

TNO & CE Delft, 2017. *Evaluatie milieu- en kosteneffectiviteit drankenkartonrecycling - Milieuanalyse*, Utrecht: Stichting Afvalfonds.

TNO, 2016. *Milieuprofielen van scheepsbrandstoffen ten behoeve van opname in de Nationale Milieudatabase*, sl: TNO.

Van Werven, 2020. *Puin*. [Online]
Available at: <https://www.vanwerven.nl/afval/afvalstromen/puin>
[Geopend 8 Juli 2020].

VNP, 2017. *VNP Guidelines - LCA data for paper and board products*, Hoofddorp: Koninklijke Vereniging van Nederlandse Papier- en Karton-Fabrieken (VNP).

weycle, 2019. *Jaarverslag 2019 - Recyclen smart & bereikbaar maken*, sl: sn

WUR, 2017. *Recycling of beverage cartons in the Netherlands 2016*, Wageningen: Wageningen University & Research.