



Klimaatimpact Spodofos

Update 2024



CE Delft

Committed to the Environment

Klimaatimpact Spodofos

Update 2024

Dit rapport is geschreven door:
Meis Uijttewaal
Martijn Broeren

Delft, CE Delft, december 2024

Publicatienummer: 24.240402.

Opdrachtgever: ThermusP

Uw kenmerk: STOWA project 432.761

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

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Meis Uijttewaal (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 sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	3
1	Inleiding	5
	1.1 Aanleiding	5
	1.2 Leeswijzer	6
2	Methode	7
	2.1 Doel	7
	2.2 Technologiebeschrijving	8
	2.3 Afbakening	9
	2.4 Data en modellering	11
	2.5 Aanvullende analyses	12
3	Inventarisatie	13
	3.1 Procesdata basisanalyse	13
	3.2 Opwerking producten en vermeden producten	14
	3.3 Klimaatimpact aluminiuminput	16
4	Resultaten klimaatimpact	18
	4.1 Afvalperspectief: verwerking slibas	18
	4.2 Productperspectief: productie van fosfor, ferrofosfor en slak	20
5	Discussie en conclusie	24
	5.1 Conclusies	24
	5.2 Discussie	25
6	Literatuur	27
A	Inventarisatie FeCl ₃ -route	28

Samenvatting

Spodofos is een nieuwe technologie waarmee witte fosfor kan worden teruggewonnen uit de assen van rioolwaterzuiveringsslib met behulp van aluminium. Naast witte fosfor worden ook slakken en ferrofosfor geproduceerd. Deze bijproducten kunnen (na eventuele opwerking) ook nuttig toegepast worden. Spodofos wordt ontwikkeld door ThermusP.

CE Delft heeft de klimaatimpact bepaald van het Spodofosproces. De analyse laat zien dat de verwerking van 1 ton slibas met Spodofos een klimaatimpact heeft van ongeveer -1,4 ton CO₂-eq. Dit komt doordat de producten uit het Spodofos-proces, met name de fosfor, conventionele producten vervangen. Daarnaast hebben alle producten uit het Spodofos-proces een lagere klimaatimpact dan de conventionele producten die ze kunnen vervangen.

Methode

De klimaatimpact van het Spodofosproces is bepaald met een levenscyclusanalyse (LCA). Dit is een ex ante LCA, aangezien het proces nog niet grootschalig operationeel is.

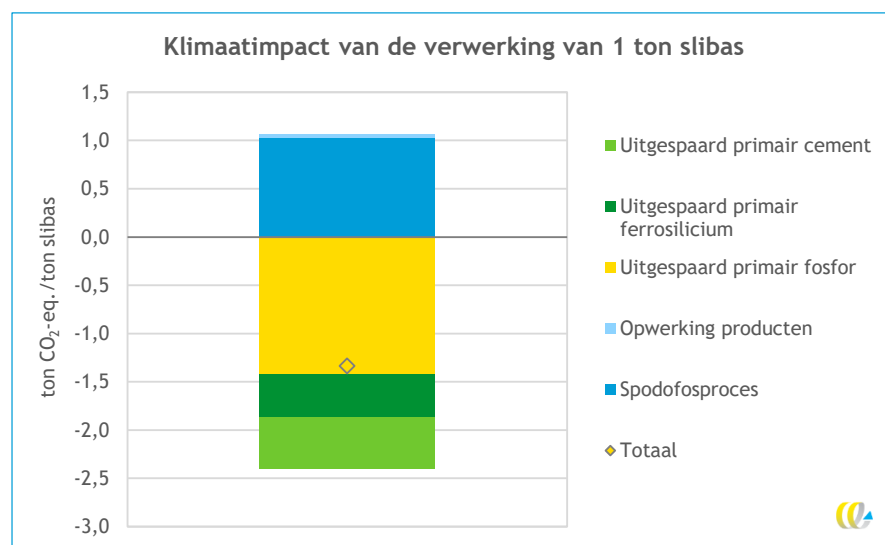
De LCA is uitgevoerd vanuit twee perspectieven, die verschillende vragen beantwoorden:

- Afvalperspectief: wat is de klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofosproces?
- Productperspectief: wat is de klimaatimpact van de producten (fosfor, ferrofosfor en slak) die met het Spodofosproces geproduceerd worden?

De LCA is gebaseerd op Spodofosprocesdata aangeleverd door ThermusP. Deze is afkomstig van metingen en berekeningen op basis van proefnemingen en representatief voor het proces met een verwerkingscapaciteit van 50 kton slibas per jaar.

Resultaten en conclusies

Figuur 1 - Klimaatimpact van het verwerken van 1 ton slibas met het Spodofosproces, ton CO₂-eq./ton slibas



Afvalperspectief

Figuur 1 geeft de klimaatimpact weer van de verwerking van 1 ton slibas met het Spodofos-proces. De netto klimaatimpact van het Spodofos-proces komt uit op ongeveer -1,4 ton CO₂-eq. per ton slibas. De negatieve klimaatimpact betekent dat er door het Spodofos-proces netto-uitstoot van broeikasgassen vermeden wordt. Dit komt doordat het credit voor vermeden primaire productie groter is dan de klimaatimpact van het Spodofosproces zelf. De klimaatimpact van het Spodofosproces zelf is ongeveer 1,0 ton CO₂-eq./ton slibas (donkerblauwe balk). Dit komt met name door het gebruik van (secundair) aluminium.

Productperspectief

Tabel 1 geeft de klimaatimpact weer van de drie producten uit Spodofos bij verschillende toepassingen en van de referentieproducten die vervangen worden. De klimaatimpact van de producten is bepaald door de klimaatimpact van het Spodofosproces door middel van economische allocatie over de drie producten te verdelen.

Bij vrijwel alle toepassingen van de drie producten ligt de klimaatimpact lager dan de klimaatimpact van het referentieproduct. Alleen bij slak dat wordt ingezet als vuurvast isolatiemateriaal is de klimaatimpact vergelijkbaar met de referentie.

Tabel 1 - Klimaatimpact van de producten uit het Spodofos-proces bij verschillende toepassingen, en de klimaatimpact van de referentieproducten, in ton CO₂-eq./ton

Product	Toepassing	Klimaatimpact product		Klimaatimpact referentieproduct
		Maximaal ^a	Minimaal ^a	
Fosfor	Vervangen primaire fosfor	8,5	4,4	15,1
Ferrofosfor	Hogedichtheidsmedium	1,2	0,7	3,8
	FeCl ₃ coagulant	0,9	0,7	2,0
Slak	Cementvervanger	0,12	0,10	0,5
	Vuurvast granulaat	0,25	0,21	0,5
	Vuurvast isolatiemateriaal	0,51	0,45	0,5

a) De berekende klimaatimpact hangt af van de aangenomen economische waarde van alle outputs uit het proces (economische allocatie). We geven hier de hoogste en laagste waardes.

Discussie

Deze studie kent een aantal aannames en beperkingen:

- Deze studie betreft een ex ante LCA van het Spodofosproces omdat het proces nog niet op industriële schaal operationeel is. De procesdata voor de verwachte bedrijfsvoering bij de verwerking van 50 kton slibas is met name gebaseerd op proeven op labschaal/TRL5 bij de verwerking van 10 kg slibas. We raden aan de analyse nogmaals uit te voeren wanneer gegevens van het opgeschaalde proces beschikbaar zijn.
- Spodofos maakt gebruik van secundair aluminium uit bodemassen. We berekenen de klimaatimpact hiervan met behulp van de Circular Footprint Formula (CFF) uit de Product Environmental Footprint methode van de EU. De CFF heeft als voordeel dat er voor alle partijen in de keten een sterke stimulans is om materiaal zo hoogwaardig mogelijk beschikbaar te houden/maken voor volgende levenscycli. Dit is daarmee een conservatieve en (gezien de ontwikkelingen van de LCA-methodologie in Europa) robuuste manier om de klimaatimpact van secundair aluminium te berekenen.
- In de analyse vanuit productperspectief wordt economische allocatie toegepast om de klimaatimpact van het Spodofosproces te verdelen over de drie producten. Aangezien de economische waarde van de producten kan variëren, dienen de werkelijke prijzen van de co-producten gemonitord te worden als Spodofos operationeel wordt.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Spodofos is een nieuwe technologie waarmee witte fosfor kan worden teruggewonnen uit de assen van rioolwaterzuiveringsslib met behulp van aluminium. Naast witte fosfor worden ook slakken en ferrofosfor geproduceerd. Deze bijproducten kunnen (na eventuele opwerking) ook nuttig toegepast worden. ThermusP is het bedrijf achter de ontwikkeling van het Spodofosproces.

In 2021 heeft CE Delft een milieuanalyse uitgevoerd van het Spodofos-proces. De analyse is verwerkt in een STOWA-rapport over het Spodofosproces (CE Delft, 2021a). In de tussentijd is de ontwikkeling van het Spodofosproces verdergegaan. Er is inmiddels nauwkeurigere procesdata beschikbaar en ThermusP heeft meer inzicht in de mogelijke toepassingen van de bijproducten. De ontwikkelingen van en nieuwe inzichten in het Spodofosproces worden weer verwerkt in een STOWA-rapport.

In dit rapport voeren we een ex ante levenscyclusanalyse (LCA) uit om de klimaatimpact van het Spodofosproces te bepalen. We analyseren het proces vanuit zowel afval- als productperspectief. Voor de analyse maken we gebruik van procesdata afkomstig van metingen en berekeningen op basis van proefnemingen voor het proces met een verwerkingscapaciteit van 50 kton slibas per jaar. Deze analyse van de klimaatimpact wordt opgenomen in het nieuwe STOWA-rapport over Spodofos.

De belangrijkste wijzigingen in de analyse en resultaten ten opzichte van de milieuanalyse van het Spodofosproces uit 2021 zijn:

- De nieuwe procesdata is verwerkt in het LCA-model. De grootste veranderingen in de procesdata zijn de hogere input aan aluminium, de hogere output van fosfor en ferrofosfor en het gebruik van elektriciteit in plaats van aardgas bij het voorbereiden van het aluminium.
- De klimaatimpact van de aluminiuminput is op een andere, conservatievere manier berekend. Deze nieuwe methode is meer in lijn met de nieuwste inzichten over LCA-methodes op EU-niveau. In de analyse uit 2021 werd aangenomen dat post-consumer aluminium uit bodemassen vrijwel geen milieu-impact had¹. In de huidige analyse gebruiken we de principes uit de Europese Circular Footprint Formula om de impact van het aluminium te berekenen. Hierdoor heeft secundair aluminium een hogere klimaatimpact. In deze formule wordt ook meegewogen dat het aluminium in het Spodofosproces wordt omgezet in aluminiumoxide en niet meer direct als aluminium te recycleren is.
- We kijken naar andere toepassingen van ferrosilicium en slak.
- De milieukundige achtergronddata zijn geüpdatet. Hierdoor is de klimaatimpact van sommige processen hoger geworden (bijvoorbeeld primaire witte fosfor productie) en van sommige processen lager geworden (bijvoorbeeld elektriciteitsproductie).
- De analyse uit 2021 bestond uit twee onderdelen: een analyse van de klimaatimpact en een schaarste analyse. In dit rapport analyseren we alleen de klimaatimpact.

¹ In deze studie is alleen de klimaatimpact van het proces waarmee aluminium uit bodemas wordt teruggewonnen meegenomen. Voor het aluminium zelf werd aangenomen dat deze milieukundig 'gratis' was, oftewel beschikbaar zonder klimaatimpact.

1.2 Leeswijzer

Dit rapport bevat de volgende onderdelen:

- Hoofdstuk 2: geeft een beschrijving van de methodologie die we gebruikt hebben. Onder andere het doel, de afbakening, de functionele eenheid en allocatie komen hier aan bod.
- Hoofdstuk 3: bevat een overzicht van de gebruikte data en details over de modellering. Ook wordt beschreven hoe de klimaatimpact van secundair aluminium bepaald is.
- Hoofdstuk 4: hierin worden de resultaten weergegeven en beschreven, zowel van de analyse vanuit afvalperspectief als van de analyse vanuit productperspectief.
- Hoofdstuk 5: hierin gaan we in op de conclusies en beperkingen van deze studie.
- Bijlage A: data-inventarisatie van de aanvullende analyse van de alternatieve FeCl₃-route van het Spodofosproces.



2 Methode

In dit hoofdstuk beschrijven we het doel, de functionele eenheid, de afbakening, allocatie, de dataverzameling en modellering van deze LCA-studie.

2.1 Doel

Het doel van deze studie is het bepalen van de klimaatimpact van het Spodofosproces door middel van een levenscyclusanalyse (LCA). De LCA is uitgevoerd conform de ISO-standaarden 14040 en 14044.

We bepalen de klimaatimpact vanuit twee perspectieven:

- Afvalperspectief: wat is de klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofosproces? De resultaten van deze analyse kunnen gebruikt worden om te bepalen of de Spodofos-technologie een voordeel biedt op het gebied van klimaatimpact ten opzichte van andere verwerkingsmethoden van slibas.
- Productperspectief: wat is de klimaatimpact van de producten die met het Spodofosproces geproduceerd worden? De resultaten van deze analyse geven aan hoe de producten zich verhouden tot andere, conventionele productieroutes.

Tabel 2 geeft een samenvatting van de scope van de analyse en de verschillen daarin tussen het afvalperspectief en productperspectief.

Tabel 2 - Samenvatting scope

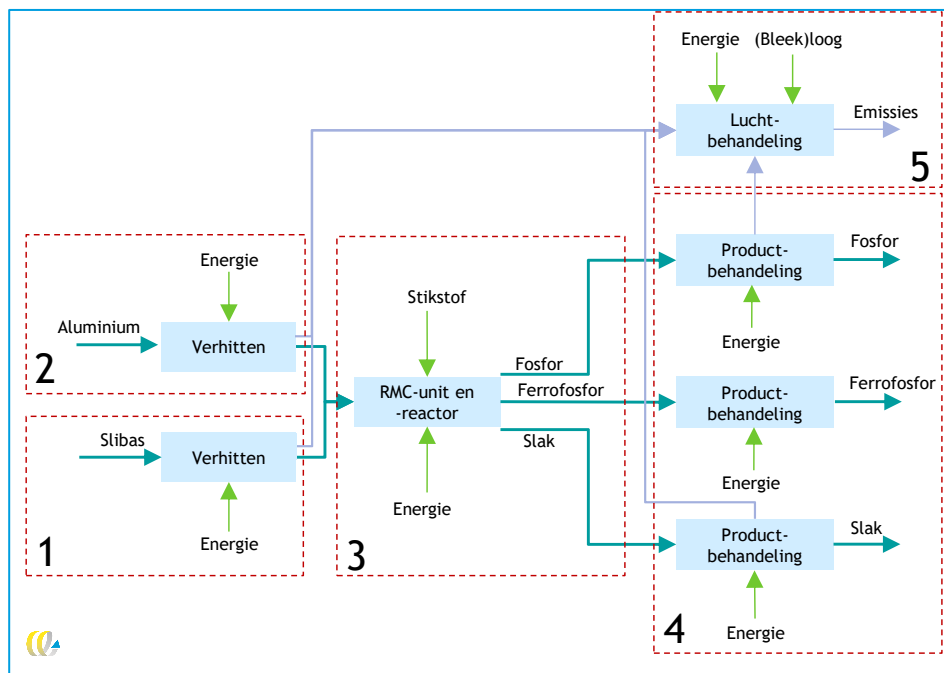
	Afvalperspectief	Productperspectief
Functionele eenheid	Verwerking van 1 t slibas	Productie van 1 t fosfor, 1 t ferrofosfor of 1 t slak
Geografisch	Nederland	
Temporeel	2024	
Technologisch	Verwerkingscapaciteit van 50 kt slibas per jaar	
Modellering	– Slibas: cut-off (geen milieu-impact) – Aluminium: PEF CFF, zie Paragraaf 3.3 – Rest: Ecoinvent, CE Delft	
Multifunctionaliteit	Naast slibverwerking (hoofdfunctie) worden fosfor, ferrofosfor en slak geproduceerd. Credits berekend voor vermeden conventionele productie van fosfor, ferrofosfor en slak	Fosfor, ferrofosfor en slak zijn co-producten. Economische allocatie is toegepast om de klimaatimpact te verdelen. Allocatiefactor op basis van economische waarde bij verschillende toepassingen
Indicator	Klimaatimpact	
Aanvullende analyses	1 Alternatieve toepassingen ferrofosfor en slak 2 Duurzame elektriciteit 3 Warmteterugwinning 4 Samenstelling aluminium	N.v.t.

Verdere toepassingen van de producten uit het Spodofosproces vallen buiten scope van deze analyse.

2.2 Technologiebeschrijving

In het Spodofosproces wordt met behulp van aluminium fosfor teruggewonnen uit slibas. Bijproducten zijn ferrofosfor en slak. Het proces kan onderverdeeld worden in vijf sub-processen, zoals weergegeven in Figuur 2. We gaan in deze analyse uit van een verwerkingscapaciteit van 50 kton slibas per jaar. Per ton slibas wordt 94 kg fosfor, 119 kg ferrofosfor en 1.024 kg slak geproduceerd.

Figuur 2 - Schematisch overzicht van het Spodofosproces



1. Voorbewerken slibas

Voordat de slibas met het aluminium gemengd wordt, wordt het verhit tot een temperatuur van (maximaal) 700°C.

2. Voorbewerken aluminium

In het Spodofosproces wordt aluminium gebruikt om de fosfor terug te winnen. ThermusP gaat uit van het gebruik van aluminium teruggewonnen uit bodemassen afkomstig van afvalverbranding.

Afhankelijk van onder andere de fosforconcentratie in de slibas wordt een bepaalde hoeveelheid aluminium toegevoegd. Het aluminium wordt verhit tot een temperatuur van ongeveer 700°C.

3. RMC-unit en -reactor

In de ReactieMix Conditioneer (RMC)-unit worden de juiste hoeveelheden as en aluminium samengebracht en wordt het aluminium gedispergeerd in de as. Het reactiemengsel van de aluminium en as wordt gedoseerd in de reactor via een doseerbuffer. De doseerbuffer wordt met behulp van stikstof op lichte overdruk gehouden ten opzichte van de reactor. In de reactor vindt de reactie plaats waarbij fosforgas, vloeibare slak en vloeibaar ferrofosfor ontstaan, zonder toevoeging van externe energie.

4. Productbehandeling

Via een scheidingsvat vloeit de ferrofosfor naar de gietmallen en de slak naar het slakkenbad. De slak koelt af en wordt bij hoge temperatuur met water geschrokken waardoor het snel stolt naar geëxpandeerde vorm.

Het fosforgas wordt gecondenseerd tot vloeibaar fosfor, dat, na filtratie in een tank onder een laag water wordt opgeslagen.

5. Lucht- en afvalbehandeling

In het proces ontstaan drie luchtstromen die behandeld moeten worden. De rookgassen van de as- en aluminiumverhitters worden ontdaan van stof en enkele vervluchtigde bestanddelen. Met een bleekloogwassing wordt fosfor uit de niet-condenseerbare gassen in de fosforcondensatie en de ademplucht van de opslagen gewassen. Tot slot wordt de ventilatielucht uit de slakbewerking met een alkalische scrubber van waterstofsulfide ontdaan.

2.3 Afbakening

2.3.1 Systeemgrenzen en functionele eenheid

Het Spodofos-proces wordt vanuit twee perspectieven geanalyseerd: een afvalperspectief (de verwerking van slibas met Spodofos) en een productperspectief (de productie van verschillende producten met Spodofos). De twee perspectieven hebben verschillende systeemgrenzen en functionele eenheden. Deze worden hieronder per perspectief besproken.

Afvalperspectief

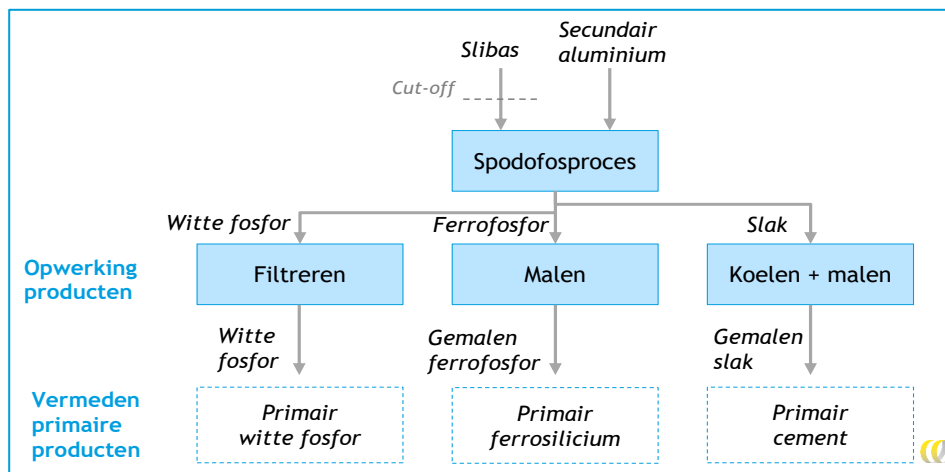
Figuur 3 geeft de systeemgrenzen weer van de basisanalyse² vanuit het afvalperspectief. De functionele eenheid van deze analyse is: de verwerking van 1 ton slibas.

Het startpunt van de analyse is slibas afkomstig uit de verbranding van zuiveringsslib. Voor de samenstelling van de slibas die in het Spodofosproces verwerkt wordt, gaan we uit van een gewogen gemiddelde van SNB- en HVC-verbrandingsassen. Deze as bevat 10,1% fosfor. Slibas is een afvalproduct en wordt toegepast als vulstof in zoutmijnen. De processtappen om tot de slibas te komen vallen daarom buiten de scope van deze analyse en de klimaat-impact hiervan wordt dus niet meegenomen.

Het Spodofosproces produceert witte fosfor, ferrofosfor en slak uit de slibas en aluminium. Voor het afvalperspectief is, op basis van de afzetmogelijkheden en -prijzen, ervoor gekozen dat deze producten de primaire productie van witte fosfor, ferrosilicium (15%) en cement vervangen (substitutiemethode).

² Naast de basisanalyse voeren we ook een aanvullende analyse uit waarin we kijken naar alternatieve toepassingen van de producten uit het Spodofosproces. Zie Paragraaf 2.5.

Figuur 3 - Systeemgrenzen van de analyse vanuit afvalperspectief



Productperspectief

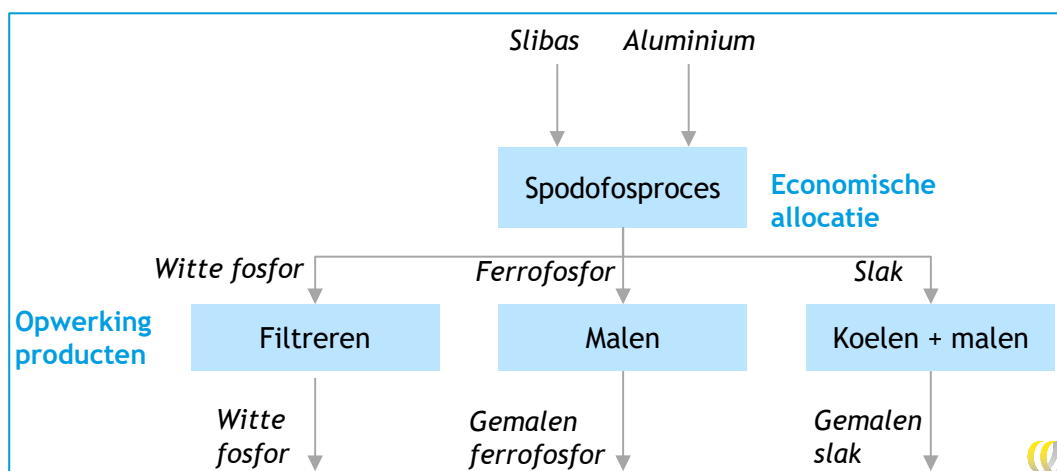
Figuur 4 geeft de systeemgrenzen weer van de analyse vanuit productperspectief. De functionele eenheid van deze analyse is: de productie van 1 ton witte fosfor, 1 ton ferrofosfor of 1 ton slak.

Ook van deze analyse is het startpunt slibas afkomstig uit de verbranding van zuiveringsslib met 10,1% fosfor. De processtappen om tot de slibas te komen vallen buiten de scope van deze analyse en de klimaatimpact hiervan wordt dus niet meegenomen.

Het Spodofosproces produceert witte fosfor, ferrofosfor en slak uit de slibas en aluminium. We passen economische allocatie toe om de klimaatimpact van het Spodofos-proces te verdelen over de drie producten. Vervolgens wordt de klimaatimpact van de opwerkingsstap daar nog bij opgeteld. De economische waarde van de producten hangt af van de toepassing en het product dat ze vervangen.

In de productperspectiefanalyse wordt de klimaatimpact van de producten uit het Spodofos-proces vergeleken met de klimaatimpact van primaire producten die ze vervangen.

Figuur 4 - Systeemgrenzen van de analyse vanuit productperspectief



We kijken in de productperspectiefanalyse naar verschillende toepassingen van de drie producten uit het Spodofosproces. Tabel 3 geeft weer hoe die verschillende toepassingen gecombineerd worden en de prijs die het product bij die toepassing heeft.

Tabel 3 - Combinaties van producttoepassingen in de analyse vanuit productperspectief

Analyse	Witte fosfor			Ferrofosfor			Slak		
	Vermeden product	Prijs product (€/ton)	Allocatief actor	Vermeden product	Prijs product (€/ton)	Allocatie factor	Vermeden product	Prijs product (€/ton)	Allocatie factor
Basisanalyse	Witte fosfor	3.650	79%	Ferrosilicium (15%)	500	12%	Cement	40	9%
Aanvullend ferrofosfor	Witte fosfor	3.650	65%	FeCl3	230	27%	Cement	40	7%
Aanvullend slak	Witte fosfor	3.650	66%	Ferrosilicium (15%)	500	10%	Chamotte (granulaat)	130	23%
Aanvullend slak	Witte fosfor	3.650	44%	Ferrosilicium (15%)	500	7%	Chamotte (isolatiemateriaal)	400	49%

De productie van kapitaalgoederen, zoals de procesinstallaties zelf, wordt niet meegenomen in de analyse. Dit is gebruikelijk in LCA's van industriële processen, omdat de milieu-impact van kapitaalgoederen doorgaans zeer klein is ten opzichte van andere factoren (energiegebruik, hulpmiddelen).

De allocatiefactor is de fractie van de opbrengst van het product ten opzichte van de gesommeerde opbrengsten van alle producten per ton slibas.

2.3.2 Geografische, technologische en tijdsafbakening

In de analyse gebruiken we de volgende geografische locatie en tijdsafbakening:

- **Geografische locatie:** We kijken naar de verwerking van slibas met het Spodofosproces in Nederland. Dit betekent dat we uitgaan van de Nederlandse elektriciteitsmix en laagcalorisch aardgas. Voor de vermeden producten gaan we uit van gemiddelde Europese of globale productieprocessen.
- **Technologische afbakening:** De procesdata is van toepassing op een Spodofos-installatie met een verwerkingscapaciteit van 50 kton slibas (met 10,1% fosfor) per jaar.
- **Tijdsafbakening:** De analyse richt zich op de klimaatimpact van slibasverwerking rond 2024. De klimaatimpact van de achterliggende processen, zoals elektriciteitsproductie, is bepaald voor deze periode. Toekomstige veranderingen in de achterliggende systemen kunnen ervoor zorgen dat de klimaatimpact zoals deze nu berekend is, dan niet meer up-to-date is.

2.4 Data en modellering

De gebruikte gegevens zijn verkregen van ThermusP en gebaseerd op literatuur. ThermusP heeft de procesdata bepaald op basis van testen op TRL-niveau 5 en berekeningen. In het tekstkader hieronder staat een toelichting van ThermusP op de bepaling van de procesdata.

Tekstkader 1 - Toelichting ThermusP op de procesdata

De gehanteerde procesdata zijn gebaseerd op de massabalans die afgeleid is uit de experimenten in TRL5. Gezien de sterke verbetering, zonder enige vorm van optimalisatie, van het fosforgehalte in de ferrofosfor ten opzichte van ferrofosfor uit traditionele ovens, is de massabalans getuned op een haalbaar geacht fosforgehalte van 5% bij een hoger siliciumgehalte. De overige procesdata zijn in lijn met de berekeningen in de haalbaarheidsstudie STOWA 2021-57 met enkele wijzigingen: gebruik van een lagere kwaliteit aluminium, gebruik van de maximale voorverhittingstemperatuur (700°C in plaats van 600°C), inductieve verhitting van het aluminium en stolling van de slak in een slakkenbad. De warmte inhoud van gesmolten slak op de reactietemperatuur is experimenteel door afkoeling in een waterbad bepaald.

De gebruikte procesdata is te vinden in Hoofdstuk 3.

Voor de meeste milieukundige achtergronddata hebben we de LCA-database ecoinvent (Versie 3.10) gebruikt. Daarnaast is voor sommige achtergrondprocessen gebruik gemaakt van datasets ontwikkeld door CE Delft.

De processen zijn gemodelleerd in de LCA-software SimaPro (Versie 9.6). In SimaPro wordt de voorgronddata over het Spodofos-proces gekoppeld aan de milieukundige achtergrond-data.

De klimaatimpact is berekend met de IPCC 2021 GWP100-methode (Versie 1.03).

2.5 Aanvullende analyses

Naast de basisanalyses vanuit afvalperspectief en productperspectief bevat de studie ook een aantal aanvullende analyses. Deze zijn alleen uitgevoerd voor het afvalperspectief. Het gaat om de volgende aanvullende analyses:

- **Alternatieve toepassingen:** De ferrofosfor en slak uit het Spodofos-proces kunnen verschillende primaire producten vervangen. In deze aanvullende analyse kijken we naar de klimaatimpact van het Spodofosproces bij het toepassen van slak in vuurvast granulaat, waarbij gebrande chamotte vervangen wordt.
- **Duurzame elektriciteit:** Het is mogelijk om het Spodofosproces volledig te elektrificeren. Voor het voorbereiden van de slibas wordt dan gebruik gemaakt van elektriciteit in plaats van aardgas. Daarnaast gaan we er in deze aanvullende analyse van uit dat alle elektriciteit die in het Spodofosproces gebruikt wordt hernieuwbaar is.
- **Warmteterugwinning:** Bij het afkoelen van de slak kan warmte worden teruggewonnen. Het gaat om 2.340 MJ warmte per ton slibas. In deze aanvullende analyse kijken we naar het effect op de klimaatimpact als deze warmte nuttig kan worden toegepast en daarmee de verbranding van aardgas vervangt. We nemen aan dat er bij transport van de warmte nog 25% verlies optreedt.
- **Samenstelling aluminium:** In de basisanalyse gaan we uit van de input van secundaire aluminium uit bodemas met een aluminiumgehalte van 88%. Het is technisch mogelijk om laagwaardig aluminium uit bodemas met een aluminiumgehalte van 20% bij te mengen en hiermee een deel van het hoogwaardigere secundaire aluminium te vervangen. In deze aanvullende analyse kijken we naar het effect van het toepassen van 20% laagwaardig secundair aluminium (met een aluminiumgehalte van 20%) en 80% hoogwaardig secundair aluminium (met een aluminiumgehalte van 88%). We nemen aan dat het laagwaardige aluminium een afvalproduct is en dus vrijwel geen economische waarde heeft.

De resultaten worden besproken in Paragraaf 4.1.2 tot 4.1.5.

3 Inventarisatie

3.1 Procesdata basisanalyse

In Tabel 4 zijn alle gegevens voor het Spodofosproces samengevat. Hierbij kan opgemerkt worden dat de gebruikte data gebaseerd is op proeven en berekeningen en dus minder zeker zijn dan data voor een operationele fabriek.

Tabel 4 - Datainventarisatie van het Spodofosproces, per ton slibas

	Eenheid	Hoeveelheid	Opmerkingen en modellering <i>Ecoinvent-processen in cursief</i>
Vorbewerking slibas			
Slibas	kg	1.000	Geen klimaatimpact
Elektriciteit	kWh	5,1	Gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2022 (CE Delft, 2023)
Aardgas	Nm ³	24	Productie: <i>Natural gas, high pressure {NL} market for</i> Verbranding: 1,78 kg CO ₂ /Nm ³ (RVO, 2024)
Vorbewerking aluminium			
Aluminium	kg	269	Input is secundair aluminium met een aluminiumgehalte van 88%. De hoeveelheid puur aluminium is dus 237 kg. <i>20% Aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting {RER} treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing</i> <i>39% Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for</i> Zie Paragraaf 3.2 voor toelichting
Elektriciteit	kWh	87	Zie vorbewerking slibas
RMC-unit en -reactor			
Stikstof	kg	2	<i>Nitrogen, atmospheric</i> en 0,21 kWh elektriciteit/kg N voor de productie (Parker Hannifin Corporation, 2013)
Elektriciteit	kWh	28	Zie vorbewerking slibas
Productbehandeling			
Elektriciteit	kWh	2	Zie vorbewerking slibas
Slakbehandeling	kg	1.026	SBK Breken steenachtig MRPI (NMD 3.9), de klimaatimpact is 0,0015 kg CO ₂ -eq./kg
Dieselolie	ltr	1,4	<i>Diesel, burned in building machine {GLO} market for</i> Stookwaarde: 43,2 MJ/kg (RVO, 2024); Dichtheid: 0,84 kg/ltr (Wikipedia, 2021)
Koelwater	ltr	750	<i>Water, cooling, unspecified natural origin, NL</i>
Luchtbehandeling en afvalbehandeling			
Elektriciteit	kWh	8	Zie vorbewerking slibas
Water	ltr	750	<i>Water, completely softened {RER} market for</i>

	Eenheid	Hoeveelheid	Opmerkingen en modellering <i>Ecoinvent-processen in cursief</i>
Loog (35%)	kg	0,5	<i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for</i> Gecorrigeerd voor de concentratie
Bleekloog (12,5%)	kg	1	<i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RER} market for</i> Gecorrigeerd voor de concentratie
Kopersulfaat	g	6	<i>Copper sulfate {GLO} market for</i>
Stof naar stort	kg	30	<i>Inert waste {RER} treatment of inert waste, sanitary landfill</i>
Outputs			
Fosfor	kg	94	Naar opwerking, zie Paragraaf 3.2
Ferrofosfor	kg	119	Naar opwerking, zie Paragraaf 3.2
Slak	kg	1.026	Naar opwerking, zie Paragraaf 3.2

3.2 Opwerking producten en vermeden producten

Fosfor

De witte fosfor uit het Spodofosproces wordt gefiltreerd. Voor de opwerkingsstap zijn geen energie of materialen nodig. Na de filtratiestap kan de witte fosfor verkocht worden. De economische waarde van het product zal ongeveer € 3.650 per ton zijn.

De geproduceerde fosfor is chemisch gelijk aan conventionele witte fosfor. We gaan er dan ook vanuit dat het vermeden product conventionele witte fosfor is. Witte fosfor wordt momenteel geproduceerd in de Verenigde Staten, China, Kazachstan en Vietnam. In de analyse uit 2021 werd aangenomen dat de fosfor die in het Spodofosproces geproduceerd wordt, witte fosfor uit Kazachstan (50%) en Vietnam (50%) zal vervangen. We gaan ervan uit dat deze aanname nog steeds geldig is. De geproduceerde witte fosfor zal in Europa toegepast worden en dus zal ook het transport van conventionele witte fosfor van Kazachstan (per trein) en Vietnam (per vrachtschip) naar Europa vermeden worden. Tabel 5 geeft weer hoe de primaire productie van witte fosfor gemodelleerd is.

Tabel 5 - Model van de vermeden primaire productie van 1 ton witte fosfor

	Eenheid	Hoeveelheid	Opmerkingen en modellering <i>Ecoinvent-processen in cursief</i>
Witte fosfor	ton	1	<i>Phosphorus, white, liquid {RoW} phosphorus production</i>
Transport per trein	tkm	50% * 5.000	5.000 km, middellange dieseltrein (CE Delft, 2021b)
Transport per vrachtschip	tkm	50% * 17.650	17.650 km, bulkcarrier (CE Delft, 2021b)

Ferrofosfor

De ferrofosfor uit het Spodofosproces kan waarschijnlijk op verschillende manieren toegepast worden. Voor deze toepassingen verschillen de benodigde opwerkstappen, de economische waarde van de ferrofosfor en het vermeden product. Tabel 6 geeft een

overzicht van deze factoren bij de verschillende toepassingen die in deze studie zijn meegenomen.

In de basisanalyse kijken we naar toepassing van ferrofosfor als hogedichtheidsmedium in drijf-zinkscheiding. Het vervangt dan ferrosilicium met siliciumgehalte van 15%. De database met milieukundige achtergronddata bevat alleen een dataset voor productie van ferrosilicium met een siliciumgehalte van 72%. We hebben op basis van literatuur zelf het productieproces voor 15% ferrosilicium gemodelleerd met de dataset voor 72% ferrosilicium als input (Schmitz & Trauzeddel, 2016); zie de details in Tabel 6.

Het is ook mogelijk om ferrofosfor om te zetten naar FeCl₃ (38%) en calciumfosfaat. Het calciumfosfaat kan dan worden teruggevoerd naar het Spodofosproces om de productie van witte fosfor te verhogen. Bij deze route verandert alle procesdata van het Spodofos-proces. In Tabel 9 in Bijlage A is de data-inventarisatie voor deze route te vinden. De energie en grondstoffen die nodig zijn voor de productie van FeCl₃ en calciumfosfaat uit ferrofosfor staan hieronder in Tabel 6 en in meer detail in Tabel 10 in Bijlage A. Deze FeCl₃-route is alleen meegenomen in de analyse vanuit productperspectief.

Tabel 6 - Mogelijke toepassingen van ferrofosfor, met de inputs voor opwerking, de economische waarde en het vermeden primaire product, per ton ferrofosfor

Analyse	Toepassing	Inputs voor opwerking (per ton ferrofosfor)	Economische waarde (€/ton)	Vermeden product
Basisanalyse	Hoge dichtheid medium in drijf-zinkscheiding	Elektriciteit: 40 kWh	500	1 ton Ferrosilicium 15% Gemodelleerd als: – 0,21 ton <i>Ferrosilicon {GLO} market for</i> – 0,79 ton Steel, unalloyed {GLO} market for – 500 kWh Electricity, high voltage {GLO} market group for (Schmitz & Trauzeddel, 2016)
Aanvullende analyse	Productie van FeCl ₃ (38%) coagulant	Elektriciteit: 25 kWh Aardgas: 140 Nm ³ Gebluste kalk: 580 kg Soda: 770 kg Zoutzuur (30%): 5.200 kg	230 (per ton FeCl ₃)	0,95 ton FeCl ₃ (40%), gemodelleerd als: 0,38 ton <i>Iron(III) chloride, without water, in 40% solution state {GLO} market for</i>

Slak

De slak uit het Spodofosproces kan op verschillende manieren toegepast gaan worden. Voor deze toepassingen verschillen de benodigde opwerkstappen, de economische waarde van de slak en het vermeden product. Tabel 7 geeft een overzicht van deze factoren bij de verschillende toepassingen die in deze studie zijn meegenomen.

In de basisanalyse kijken we naar de toepassing van slak als cementvervanger. Hiervoor moet de slak fijn gemalen worden. In de aanvullende analyse nemen we ook de toepassing van slak als granulaat in vuurvast materiaal (vervangt gebrande chamotte) en als isolatiemateriaal in vuurvast materiaal (vervangt geëxpandeerde chamotte) mee. Voor de klimaatimpact van gebrande chamotte en geëxpandeerde chamotte gebruiken dezelfde bron, omdat er geen aparte klimaatimpacts beschikbaar zijn voor deze materialen.

Als de slak toegepast kan worden als isolatiemateriaal in vuurvast materiaal ligt de economische waarde van de slak wel aanzienlijk hoger dan als het kan worden toegepast als granulaat in vuurvast materiaal.

Tabel 7 - Mogelijke toepassingen van slak, met de inputs voor opwerking, de economische waarde en het vermeden primaire product, per ton slak

Analyse	Inputs voor opwerking (per ton slak)	Toepassing	Economische waarde (€/ton)	Vermeden product
Basisanalyse	Elektriciteit: 80 kWh	Cement vervanger	40	1 ton Cement, CEM IV/B {Europe without Switzerland} market for
Aanvullende analyse	Elektriciteit: 10 kWh	Granulaat in vuurvast materiaal	130	1 ton gebrande chamotte met een klimaatimpact van 0,513 kg CO ₂ -eq./kg (Imerys, 2021)
Aanvullende analyse	Elektriciteit: 10 kWh	Isolatiemateriaal in vuurvast materiaal	400	1 ton geëxpandeerde chamotte met een klimaatimpact van 0,513 kg CO ₂ -eq./kg (Imerys, 2021)

3.3 Klimaatimpact aluminiuminput

In het Spodofosproces wordt aluminium uit bodemassen afkomstig van afvalverbranding gebruikt als inputmateriaal. Dit aluminium wordt in het proces gereduceerd tot aluminiumoxide dat in de slak belandt.

In de analyse uit 2021 is voor de berekening van de klimaatimpact van aluminium uit bodemassen alleen de impact van het terugwinnen van het aluminium meegenomen. In deze manier van berekenen werd niet meegewogen dat aluminium in het Spodofosproces verloren gaat en er ergens anders extra primair aluminium geproduceerd moet worden om aan de gestegen vraag naar aluminium te voldoen.

Sinds 2021 zijn er grote ontwikkelingen geweest rond de methodologie van het berekenen en toerekenen van de milieu-impact van secundair materiaal. De Europese Commissie heeft de Product Environmental Footprint (PEF) ontwikkeld. Dit is een LCA-methodologie die moet zorgen voor meer uniforme en vergelijkbare LCA's.

Onderdeel van de PEF-methode is de Circular Footprint Formula (CFF), zie Vergelijking 1. Met de CFF kan de milieu-impact van zowel de input van materialen voor het produceren van een product, als de verwerking van deze materialen aan het einde van de levensduur van het product worden berekend. Hierbij wordt het voordeel van recycling van materialen verdeeld over de partij die gerecycled materiaal inzet en de partij die ervoor zorgt dat gerecycled materiaal weer beschikbaar komt aan het eind van de levensduur.

Het tweede deel van de formule (met het blauwe kader) geeft de milieu-impact van input van secundair materiaal. We gebruiken dit deel van de formule voor het berekenen van de klimaatimpact van aluminium uit bodemassen.

Vergelijking 1 - Volledige Circular Footprint Formula (CFF) uit de PEF methode (EC, 2021).

Material

$$(1 - R_1)E_V + R_1 \times \left(A \times E_{\text{recycled}} + (1 - A)E_V \times \frac{Q_{\text{Sin}}}{Q_p} \right) + (1 - A)R_2 \times \left(E_{\text{recyclingEoL}} - E_V \times \frac{Q_{\text{Sout}}}{Q_p} \right)$$

Energy

$$(1 - B)R_3 \times (E_{\text{ER}} - \text{LHV} \times X_{\text{ER,heat}} \times E_{\text{SE,heat}} - \text{LHV} \times X_{\text{ER,elec}} \times E_{\text{SE,elec}})$$

Disposal

$$(1 - R_2 - R_3)E_D$$

In Vergelijking 2 is alleen het blauw omkaderde deel uit Vergelijking 1 weergegeven, waarbij de namen van sommige variabelen zijn aangepast.

Vergelijking 2 - Formule voor het berekenen van de klimaatimpact van gerecycled input materiaal

$$E_{\text{gerecyclede input}} = R_1 * A * E_{\text{gerecycled materiaal}} + (1 - A) * E_{\text{primair materiaal}} * \frac{Q_{\text{Sin}}}{Q_p}$$

Waarbij in het geval van aluminium uit bodemassen geldt dat:

- R_1 is het aandeel gerecycled materiaal dat gebruikt wordt. In het geval van het Spodofos-proces is 100% van de aluminiuminput afkomstig uit bodemassen en is de waarde van R_1 dus 1.
- $E_{\text{gerecyclede input}}$ is de klimaatimpact van het aluminium uit bodemassen die gebruikt wordt in het Spodofos-proces.
- A is de allocatiefactor waarmee de impact en het voordeel van gerecycled materiaal verdeeld wordt tussen de gebruiker en leverancier van het gerecyclede materiaal. Voor aluminium heeft A de waarde 0,2 (EC, 2022).
- $E_{\text{gerecycled materiaal}}$ is de klimaatimpact van het recyclen van aluminium uit bodemassen.
- $E_{\text{primair materiaal}}$ is de klimaatimpact van primair aluminium.
- Q_{Sin} is de kwaliteit van aluminium uit bodemassen.
- Q_p is de kwaliteit van primair aluminium.

De kwaliteitsfactoren Q_{Sin} en Q_p worden bepaald aan de hand van de economische waarde van de materialen. Voor primair aluminium (Q_p) gaan we uit van een prijs van € 2.350 per ton aluminium, voor aluminium uit bodemassen (Q_{Sin}) gaan we uit van een prijs van € 1.136 per ton aluminium³.

De klimaatimpact van de gerecyclede input wordt dan:

Vergelijking 3 - Versimpelde formule voor het berekenen van de klimaatimpact van aluminium uit bodemassen

$$E_{\text{gerecyclede input}} = 0,2 * E_{\text{gerecycled materiaal}} + 0,39 * E_{\text{primair materiaal}}$$

³ € 1.000 per ton aluminium uit bodemassen met een aluminiumgehalte van 88%.

4 Resultaten klimaatimpact

In dit hoofdstuk presenteren we de resultaten van de LCA van het Spodofosproces. In Paragraaf 4.1 staan de resultaten van de analyse vanuit afvalperspectief, en in Paragraaf 4.2 de resultaten van de analyse vanuit productperspectief.

4.1 Afvalperspectief: verwerking slibas

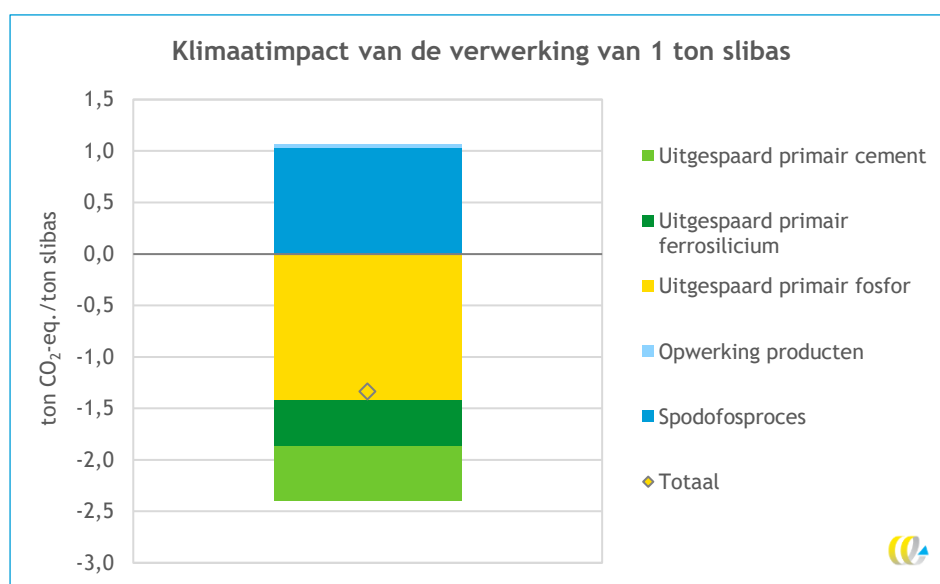
4.1.1 Basisanalyse

Figuur 5 geeft de klimaatimpact weer van de verwerking van 1 ton slibas met het Spodofosproces inclusief de credits voor vermeden producten. De klimaatimpact van het Spodofosproces zelf is weergegeven met de donkerblauwe balk. Daarbovenop komt nog een kleine klimaatimpact van de opwerking van de producten (in lichtblauw). Het deel van de balk onder de x-as geeft de vermeden klimaatimpact weer doordat de producten uit het Spodofosproces primaire producten vervangen.

De netto klimaatimpact van het Spodofosproces komt uit op ongeveer -1,4 ton CO₂-eq. per ton slibas. De negatieve klimaatimpact betekent dat er door het Spodofosproces-netto uitstoot van broeikasgassen vermeden wordt. Dit komt doordat de credit voor vermeden primaire productie groter is dan de klimaatimpact van het Spodofosproces zelf.

Met name de credit voor uitgespaard primair fosfor is aanzienlijk. Dit komt door de hoge klimaatimpact van de productie van primair fosfor (ongeveer 15 ton CO₂-eq./ton fosfor). De credits voor uitgespaard primair ferrosilicium en uitgespaard primair cement zijn vergelijkbaar. Primair ferrosilicium heeft een hogere klimaatimpact dan primair cement, maar er wordt een veel grotere hoeveelheid cement vervangen.

Figuur 5 - Klimaatimpact van het verwerken van 1 ton slibas met het Spodofosproces (met voordeel voor vermeden producten), in ton CO₂-eq./ton slibas

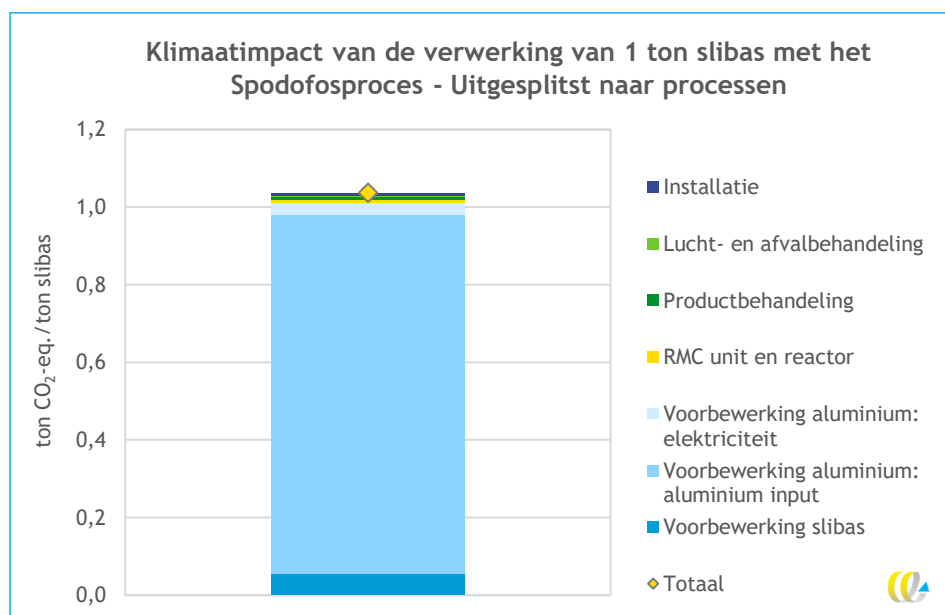


Figuur 6 geeft de klimaatimpact weer van alleen het Spodofosproces, zonder de opwerking van de producten en credits voor uitgespaarde producten. De klimaatimpact is uitgesplitst in de verschillende processtappen waaruit het Spodofosproces bestaat.

De klimaatimpact van het Spodofosproces zelf is ongeveer 1,0 ton CO₂-eq. per ton slibas. Er zit een kleine foutmarge op de resultaten ($\pm 0,01$ ton CO₂-eq./ton slibas) door de onzekerheid in de inputs, maar deze is niet terug te zien in de grafiek.

De klimaatimpact wordt vooral veroorzaakt door de voorbereiding van aluminium. De klimaatimpact van dit proces bestaat uit de impact van aluminium (97%) en de impact van elektriciteit (3%). De aluminiuminput heeft een grote invloed op de totale klimaatimpact doordat een deel van de impact van de productie van primair aluminium is toegerekend aan secundair aluminium uit bodemassen (zie Paragraaf 3.3 voor uitleg).

Figuur 6 - Klimaatimpact van het verwerken van 1 ton slibas met het Spodofos-proces (zonder voordeel voor vermeden producten), in ton CO₂-eq./ton slibas

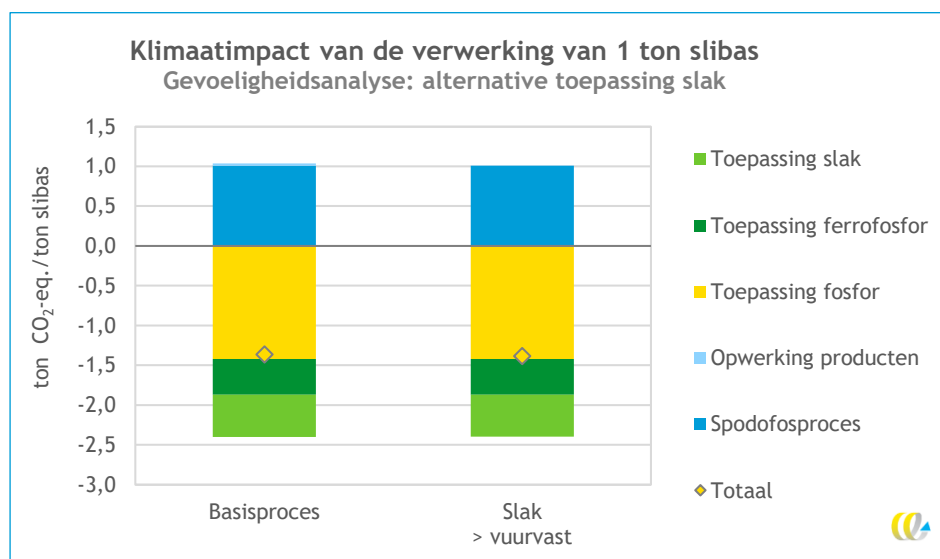


4.1.2 Aanvullende analyse: alternatieve toepassingen

In deze aanvullende analyse kijken we naar de klimaatimpact van het Spodofosproces bij het toepassen van slak in vuurvast granulaat, waarbij gebrande chamotte vervangen wordt.

Figuur 7 geeft de klimaatimpact van deze analyse weer. Bij het toepassen van slak in vuurvast materiaal (rechterbalk) is de klimaatimpact van het Spodofosproces ongeveer -1.4 ton CO₂-eq. per ton slibas. De credit voor uitgespaard primair product bij toepassing van slak blijft ongeveer gelijk, doordat de klimaatimpact van de productie van gebrande chamotte (0,5 kg CO₂-eq./kg) vergelijkbaar is met de klimaatimpact van de productie van cement (0,5 kg CO₂-eq./kg).

Figuur 7 - Klimaatimpact van het verwerken van 1 ton slibas met het Spodofosproces bij een alternatieve toepassing van slak, in ton CO₂-eq./ton slibas



4.1.3 Aanvullende analyse: duurzame elektriciteit

Bij volledige elektrificatie van het Spodofos-proces en het gebruik van duurzame elektriciteit voor alle processtappen, neem de klimaatimpact van het Spodofos-proces af van 1,04 ton CO₂-eq./ton slibas naar 0,96 ton CO₂-eq./ton slibas. De totale klimaatimpact, inclusief vermeden primaire producten, neemt hierdoor af van -1,36 ton CO₂-eq./ton slibas naar -1,42 ton CO₂-eq./ton slibas.

4.1.4 Aanvullende analyse: warmteterugwinning

Als warmte wordt teruggewonnen uit de slakken en deze warmte nuttig wordt ingezet, kan hiermee de verbranding van aardgas vermeden worden. Dit levert een aanvullende vermeden klimaatimpact op van -0,12 ton CO₂-eq./ton slibas. Hiermee komt de totale klimaatimpact uit op -1,49 ton CO₂-eq./ton slibas.

4.1.5 Aanvullende analyse: samenstelling aluminiuminput

Bij het gebruik van laagwaardige secundaire aluminium neemt de klimaatimpact van de aluminiuminput af van 0,93 ton CO₂-eq./ton slibas naar 0,89 ton CO₂-eq./ton slibas. Daarnaast neemt ook de slakproductie en daarmee de vermeden primaire productie van cement toe. Hierdoor neemt de totale klimaatimpact van het Spodofosproces inclusief vermeden primaire productie af van -1,36 ton CO₂-eq./ton slibas naar -1,42 ton CO₂-eq./ton slibas.

4.2 Productperspectief: productie van fosfor, ferrofosfor en slak

In de analyse vanuit productperspectief hebben we de klimaatimpact berekend van de verschillende outputs die met het Spodofosproces geproduceerd worden. De klimaatimpact van het Spodofosproces is door middel van economische allocatie over de verschillende producten verdeeld. De klimaatimpact van de producten hangt daardoor af van de

economische waarde, die weer afhangt van de toepassing. De toegepaste economische allocatiefactoren zijn besproken in Tabel 3.
In de subparagrafen hieronder bespreken we per product wat de klimaatimpact is bij de verschillende toepassingen.

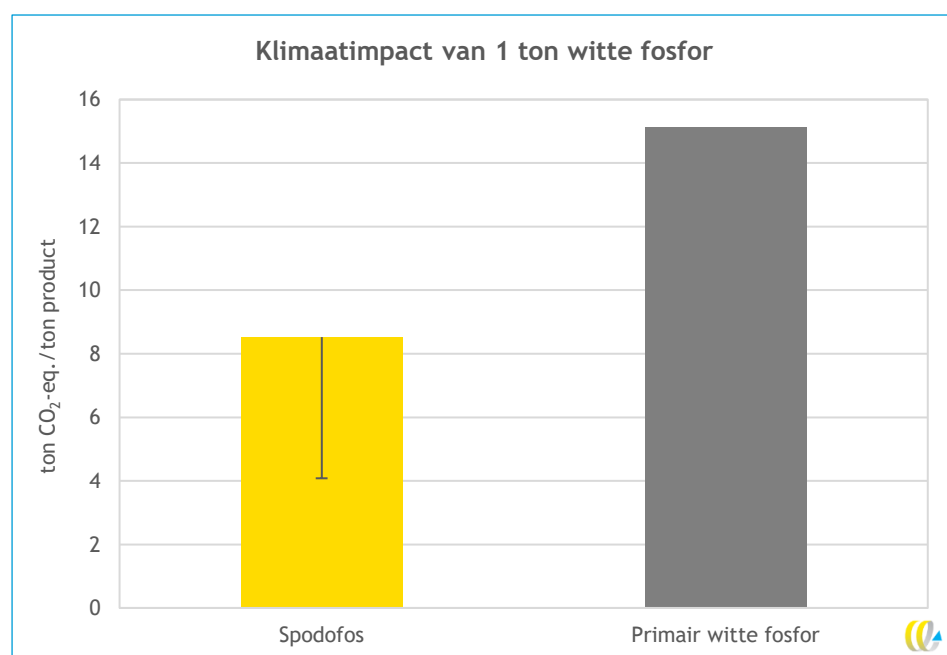
4.2.1 Fosforproduct

Figuur 8 geeft de klimaatimpact weer van 1 ton witte fosfor geproduceerd met Spodofos en 1 ton primaire witte fosfor. De gele balk geeft de klimaatimpact van de witte fosfor uit het Spodofosproces weer zoals berekend in de basisanalyse: ferrofosfor vervangt dan ferrosilicium en slak vervangt cement. De klimaatimpact van witte fosfor is dan ongeveer 8,5 ton CO₂-eq./ton.

De spreiding bij Spodofos geeft aan hoe de klimaatimpact van witte fosfor verandert bij andere toepassingen van ferrofosfor en slak. Bij een hogere economische waarde van ferrofosfor en slak, wordt een kleiner deel van de klimaatimpact van het Spodofosproces aan de witte fosfor toegerekend. De klimaatimpact van het witte fosfor is het laagst (4,4 ton CO₂-eq./ton) bij de FeCl₃-route, waarbij ferrofosfor wordt omgezet in FeCl₃ en de slak wordt toegepast als vuurvast isolatiemateriaal.

In alle scenario's heeft witte fosfor uit Spodofos een aanzienlijk lagere klimaatimpact dan primair witte fosfor (ongeveer 15 ton CO₂-eq./ton).

Figuur 8 - Klimaatimpact van witte fosfor geproduceerd met het Spodofos-proces en primair witte fosfor, in ton CO₂-eq./ton product



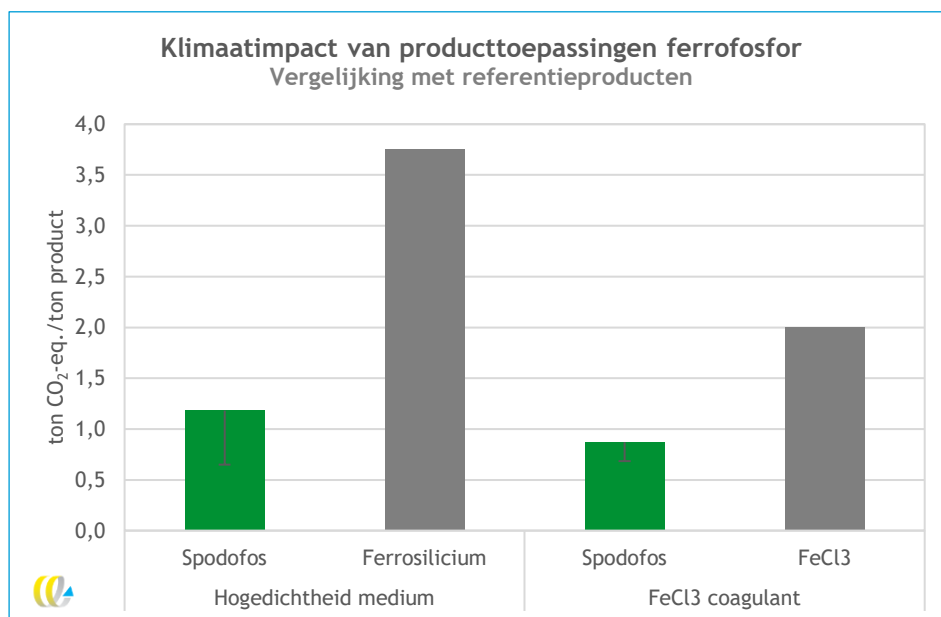
4.2.2 Ferrofosforproducten

Figuur 9 geeft de klimaatimpact van ferrofosfor uit Spodofos weer in drie verschillende toepassingen (in donkergroen), met daarnaast het primaire product dat vervangen wordt (in grijs).

Bij toepassing van ferrofosfor als hogedichtheidsmedium in drijf-zinkscheiding ligt de klimaatimpact tussen de 1,2 t CO₂-eq./t (bisisanalyse) en 0,7 t CO₂-eq./t (bij toepassing van slak als vuurvast isolatiemateriaal). Deze klimaatimpact is lager dan de klimaatimpact van de primaire ferrosilicium die vervangen wordt in deze toepassing (3,8 t CO₂-eq./t).

Bij opwerking van ferrofosfor naar FeCl₃ ligt de klimaatimpact van de FeCl₃ uit het Spodofosproces tussen de 0,9 t CO₂-eq./t (bisisanalyse) en 0,7 t CO₂-eq./t (bij toepassing van slak als vuurvast isolatiemateriaal). Deze klimaatimpact is lager dan de klimaatimpact van primair FeCl₃ dat vervangen wordt (2,0 t CO₂-eq./t).

Figuur 9 - Klimaatimpact van ferrofosforproducten geproduceerd met het Spodofos-proces en primaire referentieproducten, in ton CO₂-eq./ton product



4.2.3 Slakproducten

Figuur 10 geeft de klimaatimpact van slak uit Spodofos weer in drie verschillende toepassingen (in lichtgroen), met daarnaast het primaire product dat vervangen wordt (in grijs).

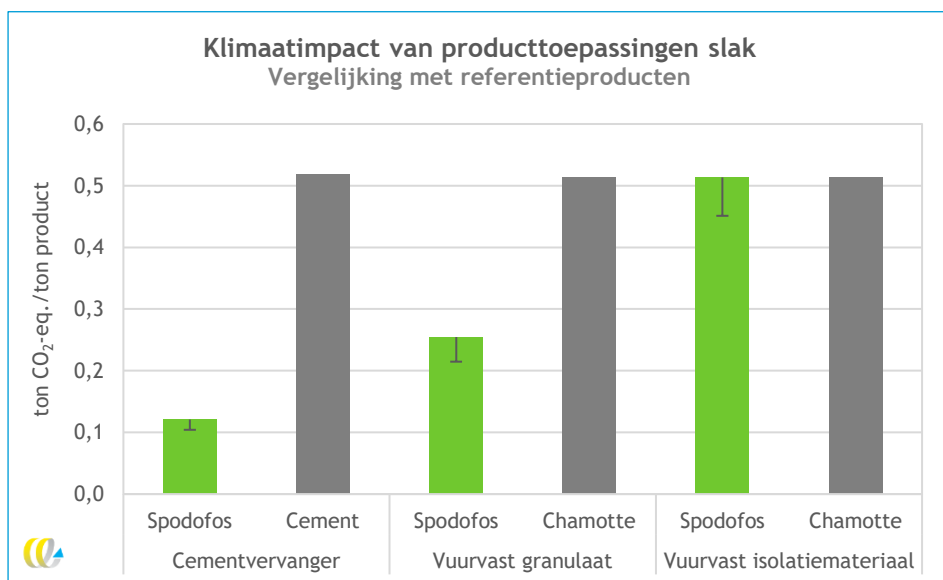
Bij toepassing van slak als cementvervanger is de klimaatimpact van de slak ongeveer 0,1 t CO₂-eq./t. De verschillende toepassingen van ferrofosfor hebben in dit geval weinig invloed op de klimaatimpact van de slak. De klimaatimpact van de slak is lager dan de klimaatimpact van de cement die vervangen wordt (0,5 t CO₂-eq./t).

Bij toepassing van slak als vuurvast granulaat is de klimaatimpact van de slak ongeveer 0,2 t CO₂-eq./t. Ook hier is de klimaatimpact van de slak lager dan de klimaatimpact van de chamotte die vervangen wordt (0,5 t CO₂-eq./t).

Als de slak wordt toegepast als vuurvast isolatiemateriaal is de klimaatimpact ongeveer 0,5 kg CO₂-eq./kg. De klimaatimpact van de slak is in dit geval vergelijkbaar met de klimaatimpact van het product dat vervangen wordt (0,5 t CO₂-eq./t). Bij het te vervangen product

gaat het hier om een conservatieve aanname. Het is ook mogelijk dat de slak hoogwaardige chamotte vervangt, dit heeft een klimaatimpact van ongeveer 1,0 t CO₂-eq./t.

Figuur 10 - Klimaatimpact van slakproducten geproduceerd met het Spodofosproces en primaire referentieproducten, in ton CO₂-eq./ton product



5 Discussie en conclusie

Deze ex ante LCA bepaalt de klimaatimpact van het Spodofosproces vanuit twee perspectieven:

- Afvalperspectief: wat is de klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofosproces? De resultaten van deze analyse kunnen gebruikt worden om te bepalen of de Spodofostechnologie een voordeel biedt op het gebied van klimaatimpact ten opzichte van andere verwerkingsmethoden van slibas.
- Productperspectief: wat is de klimaatimpact van de producten (fosfor, ferrofosfor en slak) die met het Spodofosproces geproduceerd worden? De resultaten van deze analyse geven aan hoe de producten zich verhouden tot andere, conventionele productieroutes.

5.1 Conclusies

Afvalperspectief

De klimaatimpact van het verwerken van slibas met het Spodofosproces is ongeveer -1,4 ton CO₂-eq./ton slibas. De klimaatimpact bestaat uit de impact van het Spodofosproces (1,0 ton CO₂-eq./ton slibas) en de vermeden impact door het vervangen van primaire producten (-2,4 ton CO₂-eq./ton slibas). Met name de productie van fosfor en het daardoor vermijden van primaire fosfor draagt veel bij aan de vermeden klimaatimpact.

Productperspectief

Tabel 8 geeft de klimaatimpact weer van de drie producten uit Spodofos bij verschillende toepassingen en van de referentieproducten die vervangen worden. De klimaatimpact van de producten is bepaald door de klimaatimpact van het Spodofosproces door middel van economische allocatie over de drie producten te verdelen. De klimaatimpact van de producten hangt daardoor af van de economische waarde van alle drie de producten. Als de economische waarde van een van de producten verandert, doordat het voor een andere toepassing wordt ingezet, verandert de klimaatimpact van alle drie de producten. Vandaar dat voor elk product een maximale en een minimale klimaatimpact is weergegeven.

Bij vrijwel alle toepassingen van de drie producten ligt de klimaatimpact lager dan de klimaatimpact van het referentieproduct. Alleen bij slak dat wordt ingezet als vuurvast isolatiemateriaal is de klimaatimpact vergelijkbaar met de klimaatimpact van het referentieproduct.

Tabel 8 - Klimaatimpact van de producten uit het Spodofosproces bij verschillende toepassingen, en de klimaatimpact van de referentieproducten, in ton CO₂-eq./ton

Product	Toepassing	Klimaatimpact product		Klimaatimpact referentieproduct
		Maximaal ^a	Minimaal ^a	
Fosfor	Vervangen primaire fosfor	8,5	4,4	15,1
Ferrofosfor	Hogedichtheidsmedium	1,2	0,7	3,8
	FeCl ₃ coagulant	0,9	0,7	2,0
Slak	Cementvervanger	0,12	0,10	0,5
	Vuurvast granulaat	0,25	0,21	0,5
	Vuurvast isolatiemateriaal	0,51	0,45	0,5

- b) De berekende klimaatimpact hangt af van de aangenomen economische waarde van alle outputs uit het proces (economische allocatie, zie Tabel 3). We geven hier de hoogste en laagste waarden.

5.2 Discussie

Onzekerheid in de resultaten

Deze studie betreft een ex-ante LCA van het Spodofosproces. In een ex ante LCA worden gegevens gebruikt die gebaseerd zijn op proeven op labschaal, verwachtingen en aannames, omdat een proces nog niet op de uiteindelijk gewenste schaal in bedrijf is. Hierbij zijn drie specifiekere opmerkingen van belang:

- Voor het Spodofosproces zijn de gebruikte gegevens afkomstig uit labschaalproeven op TRL5, bij verwerking van 10 kg slibas. We raden aan de analyse nogmaals uit te voeren wanneer gegevens van het opgeschaalde proces beschikbaar zijn.
- Het resultaat van de studie wordt voor een groot deel bepaald door de klimaatimpact van de vermeden producten. Hierbij wordt aangenomen dat de witte fosfor uit Spodofos een een-op-een vervanger is voor primaire witte fosfor, en idem voor de gemalen ferrofosfor (vervangt primair ferrosilicium) en gemalen slak (vervangt cement). Deze primaire producten zijn gemodelleerd met generieke datasets uit LCA-databases. ThermusP geeft aan dat er een onzekerheid van ongeveer 10% in het elektriciteits- en aardgasgebruik van Spodofos zit. De onzekerheid in de inputs van overige hulpstoffen (zonder aluminium) is ongeveer 20%. Deze onzekerheden zijn meegenomen in de analyse, maar de foutmarge op het totaalresultaat is zo klein dat deze niet zichtbaar is in de figuren.

Klimaatimpact secundair aluminium

De klimaatimpact van het Spodofosproces wordt vooral veroorzaakt door de klimaatimpact van de aluminiuminput. Spodofos maakt gebruik van secundair aluminium uit bodemassen. We berekenen de klimaatimpact van het secundair aluminium met behulp van de Circular Footprint Formula (CFF) uit de Product Environmental Footprint methode van de EU. Met deze formule wordt een deel van de impact van de productie van primair aluminium (dat ooit nodig was in een eerdere levenscyclus van het secundaire aluminium) toegerekend aan het secundaire aluminium⁴.

De voordelen en klimaatimpact van recycling kunnen ook op andere manieren verdeeld worden over de recycler en de gebruiker van het gerecyclede materiaal. De CFF heeft echter als voordeel dat er voor alle partijen in de keten een sterke stimulans is om materiaal zo hoogwaardig mogelijk beschikbaar te houden/maken voor volgende levenscycli. Dit is daarmee een conservatievere en (gezien de ontwikkelingen van de LCA-methodologie in Europa) robuustere manier om de klimaatimpact van secundair aluminium te berekenen ten opzichte van de eerdere Spodofos LCA.

Economische allocatie

In de analyse vanuit productperspectief wordt economische allocatie toegepast om de klimaatimpact van het Spodofosproces te verdelen over de drie producten. Hierbij is aangenomen dat de economische waarde van het tussenproduct (bijvoorbeeld ferrofosfor

⁴ We passen de CFF hier alleen toe op het secundair aluminium dat als input wordt gebruikt in het Spodofos-proces, voor het maken van verschillende producten. Deze producten worden vervolgens gebruikt en zullen aan het eind van de levensduur weer worden afgedankt. Als ze dan gerecycled worden, kan er conform de PEF CFF een credit worden toegerekend voor de vermeden primaire productie.

voordat het gemaal wordt) gelijk is aan de economische waarde van het eindproduct (bijvoorbeeld gemalen ferrofosfor).

Door het toepassen van economische allocatie is de klimaatimpact van de producten afhankelijk van de economische waarde van alle drie de producten. Als de economische waarde van één van de producten verandert (bijvoorbeeld door een andere toepassing, of door veranderingen in de markt), zorgt dit voor een verandering van de klimaatimpact van alle drie de producten. Dit maakt de klimaatimpact van de producten uit het Spodofos-proces minder zeker, omdat de prijzen van de producten over tijd kunnen variëren.

Een alternatief voor economische allocatie is massa-allocatie. Hierbij wordt de klimaat-impact van het Spodofosproces over de producten verdeeld op basis van de massa-verhoudingen van de producten. Bij deze vorm van allocatie zou het grootste deel van de klimaatimpact (ongeveer 80%) worden toegekend aan de slak en een veel kleiner deel aan de fosfor en ferrofosfor (beide ongeveer 10%). Het voordeel van deze vorm van allocatie is dat de klimaatimpact van de producten niet afhankelijk is van de toepassing. Het nadeel is echter dat massa allocatie in dit geval niet reflecteert dat het doel van het Spodofosproces is om fosfor terug te winnen en dat ferrofosfor en slak daarvan bij-producten zijn.

Gezien de onzekerheid in de economische waarde van de producten, is het aan te bevelen de werkelijke prijzen van de co-producten in de gaten te houden als Spodofos operationeel wordt. Indien de prijzen afwijken van de hier aangenomen prijzen zou het goed zijn de analyse vanuit productperspectief te updaten. Bij de analyse vanuit afvalperspectief speelt deze onzekerheid niet.

6 Literatuur

- CE Delft. (2021a). *Milieuanalyse Spodofos-proces. Voor de verwerking van slibas; klimaatimpact en schaarste.*
- CE Delft. (2021b). *STREAM Goederenvervoer 2020 (versie 2).*
- CE Delft. (2023). *Ketenemissies elektriciteit, actualisatie elektriciteitsmix 2021.*
- EC. (2021). *Annex 1 to 2 to the Commision Recommendation on the use of the Environmental Footprint methods.*https://environment.ec.europa.eu/publications/recommendation-use-environmental-footprint-methods_en
- EC. (2022). *Annex C, Default application-specific and material-specific values for the parameters to be used in the application of the Circular Footprint Formula when performing a PEF or OEF study.*<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>
- Imerys. (2021). *Cradle-to-gate Ecoprofile data sheet: low grade kiln-run - mullite.*
- Parker Hannifin Corporation. (2013). *Sustainable approach to nitrogen.*
- RVO. (2024). *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren, versie januari 2024.*
- Schmitz, W., & Trauzeddel, D. (2016). *The Melting, Holding and Pouring Process - Energy and Process-Related aspects.*

A Inventarisatie FeCl3-route

Tabel 9 - Data inventarisatie van het Spodofos-proces bij de FeCl3-route, per ton slibas

	Eenheid	Hoeveelheid	Opmerkingen en modellering <i>Ecoinvent-processen in cursief</i>
Vorbewerking slibas			
Slibas	kg	1.000	Geen klimaatimpact
Elektriciteit	kWh	5,6	Gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2022 (CE Delft, 2023)
Aardgas	Nm ³	26,4	Productie: <i>Natural gas, high pressure {NL} market for</i> Verbranding: 1,78 kg CO ₂ /Nm ³ (RVO, 2024)
Vorbewerking aluminium			
Aluminium	kg	283	20% Aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting {RER} treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing 33% Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA} market for Zie Paragraaf 3.2 voor toelichting
Elektriciteit	kWh	92	Zie vorbewerking slibas
RMC-unit en -reactor			
Stikstof	kg	2,2	Nitrogen, atmospheric en 0,21 kWh elektriciteit/kg N voor de productie (Parker Hannifin Corporation, 2013)
Elektriciteit	kWh	31	Zie vorbewerking slibas
Productbehandeling			
Elektriciteit	kWh	2,2	Zie vorbewerking slibas
Slakbehandeling	kg	1.127	SBK Breken steenachtig MRPI (NMD 3.9), de klimaatimpact is 0,0015 kg CO ₂ -eq./kg
Dieselolie	ltr	1,4	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Stookwaarde: 43,2 MJ/kg (RVO, 2024); Dichtheid: 0,84 kg/ltr (Wikipedia, 2021)
Koelwater	ltr	829	Water, cooling, unspecified natural origin, NL
Luchtbehandeling en afvalbehandeling			
Elektriciteit	kWh	9	Zie vorbewerking slibas
Water	ltr	824	Water, completely softened {RER} market for
Loog (35%)	kg	0,5	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for Correction for concentration
Bleekloog (12,5%)	kg	1	Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RER} market for Correction for concentration
Kopersulfaat	g	6,6	Copper sulfate {GLO} market for
Stof naar stort	kg	33	Inert waste {RER} treatment of inert waste, sanitary landfill
Outputs			

	Eenheid	Hoeveelheid	Opmerkingen en modellering <i>Ecoinvent-processen in cursief</i>
Fosfor	kg	99	
Ferrofosfor	kg	0	De 119 kg fosfor uit dit proces wordt omgezet in FeCl3 en calcium fosfaat. Het calcium fosfaat wordt teruggevoerd als input voor Spodofosproces.
Slak	kg	1.127	

Tabel 10 - Data inventarisatie van de opwerking van ferrofosfor tot FeCl3, per ton ferrofosfor

	Eenheid	Hoeveelheid	Opmerkingen en modellering <i>Ecoinvent-processen in cursief</i>
Inputs			
Ferrofosfor	kg	1.000	
Elektriciteit	kWh	25	Gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2022 (CE Delft, 2023)
Aardgas	Nm3	140	Productie: <i>Natural gas, high pressure {NL} market for</i> Verbranding: 1,78 kg CO ₂ /Nm ³ (RVO, 2024)
Gebliste kalk	kg	580	<i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for</i>
Watervrije soda	kg	770	<i>Sodium bicarbonate {RER} market for</i>
Zoutzuur (30%)	kg	5.200	<i>Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER} market for</i>
Outputs			
FeCl3 (28%)	kg	6.000	
Ca3(PO4)2	kg	830	Deze stroom gaat terug het Spodofosproces in