

# SPODOFOS: WITTE FOSFOR PRODUCTIE UIT SLIBVERBRANDINGSASSEN



RAPPORT

2021  
57

SPODOFOS:

WITTE FOSFOR PRODUCTIE UIT SLIBVERBRANDINGSASSEN:  
EERSTE EVALUATIE VAN DE DUURZAAMHEID EN  
TECHNOLOGISCHE EN ECONOMISCHE HAALBAARHEID

**RAPPORT**

2021

**57**

ISBN 978.90.5773.934.7



[stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl) [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Frans Horstink, ThermusP  
Roel Keursten, ThermusP  
Willem Schipper, Willem Schipper Consulting  
Szymon Adamczyk Doradztwo, Szymon Adamczyk Doradztwo Consulting  
Ingrid Odegard, CE Delft  
Meis Uijttewaai, CE Delft  
Jessica de Koning, CE Delft  
Leon Korving, Aiforo

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Saskia Hanneman, Waterschapsbedrijf Limburg  
Leonie Hartog, Waterschap Brabantse Delta,  
Dirk Koot, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier,  
Luc Sijstermans, Slibverwerking Noord-Brabant,  
Josien Ruijter, HVC  
Cora Uijterlinde, STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv  
STOWA STOWA 2021-57  
ISBN 978.90.5773.934.7

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.  
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

# TEN GELEIDE

## **NIEUW PROCEDÉ SPODOFOS® WINT FOSFOR TERUG UIT SLIB-AS MET HOOG RENDEMENT EN NEGATIEVE CO<sub>2</sub>-FOOTPRINT**

Dit rapport bevat de resultaten van een studie naar de technologische en financiële haalbaarheid, alsook de duurzaamheid, van Spodofos®. De conclusie is dat het procedé technologisch plausibel is, economisch hoog rendeert met een negatieve CO<sub>2</sub>-footprint. Met deze methode kunnen mono slibverbranders en indirect ook de waterschappen bijdragen aan de terugwinning van fosfor en de duurzaamheidsagenda. Met de resultaten van het onderzoek is de weg vrij om lab- en pilotontwikkelingen vorm te gaan geven.

Spodofos beantwoordt aan zeker een drietal doelen en thema's van de waterschappen: fosfaat-terugwinning, verregaande nuttige toepassing van reststoffen en duurzaamheid. Mono slibverbranders zijn met Spodofos in staat negentig procent van hun fosfor uit slibassen terug te winnen. Ervan uitgaande dat zeventig procent van het slib in ons land wordt verbrand, kan circa 65 procent van alle fosfor in het zuiveringsslib teruggewonnen worden. Hierbij ontstaan eindproducten die bijna volledig nuttig toepasbaar zijn.

Het nieuwe procedé (onder de naam Spodofos®) is een nog niet eerder onderkende chemische route voor fosforterugwinning uit fosfaathoudende verbrandingsassen. Hiervoor komen in aanmerking de assen van zuiveringsslib, struviet en vivianiet. De fosfor wordt teruggewonnen in de vorm van het basis-chemicalie witte fosfor (P4). In vergelijking met andere thermische methoden voor het terugwinnen van fosfor uit slibassen, is het rendement hoger omdat de conversietemperatuur aanzienlijk hoger ligt. Thermodynamische modelleringen en een expertbeoordeling van de resultaten van labproeven laten zien dat het proces plausibel en uitvoerbaar is.

Bij het Spodofos® procedé wordt een waardevolle (maar ruim beschikbare) secundaire stof - aluminium schroot - gebruikt. De kosten die hiermee gepaard gaan, vallen echter weg tegen de opbrengsten van de fosfor. Voor elke ton verwerkte as produceert het proces ongeveer één ton slak. Vanwege het hoge aluminiumgehalte van de slak wordt verwacht dat deze toegepast kan worden als grondstof voor vuurvast materiaal (bijvoorbeeld cement, keramiek, steen). Afhankelijk van de toepassing van de slak varieert de terugverdiensijd tussen de 2 en 5 jaar bij grootschalige toepassing.

De levenscyclusanalyse laat zien dat het Spodofosproces een gunstige klimaat impact heeft van -1.007 tot wel -2.328 kg CO<sub>2</sub>-eq per ton as afhankelijk van de mogelijke toepassing van de slak.

De resultaten van deze haalbaarheidsstudie laten veel perspectief zien, en verdere opschaling van het procedé wordt nader verkend.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

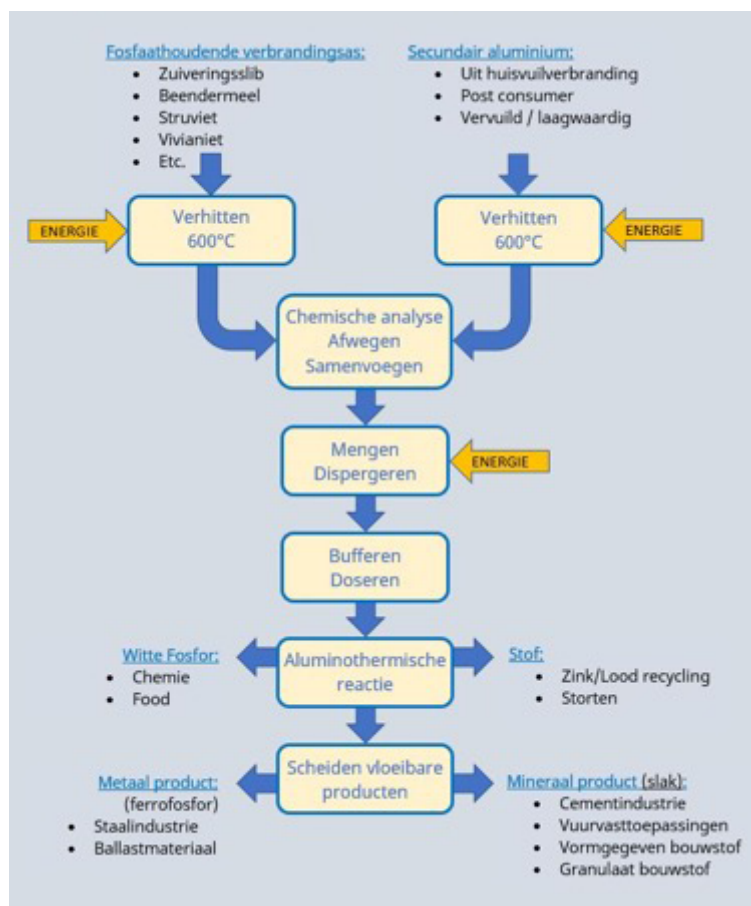
# SAMENVATTING

In Nederland en wereldwijd is er veel aandacht voor mogelijkheden om fosfaat terug te winnen uit zuiveringsslib. Een belangrijke route is het terugwinnen van fosfaat uit de as die overblijft na de monoverbranding van zuiveringsslib. Deze as bevat tot wel 10% P, komt in grote volumes vrij op een beperkt aantal locaties en biedt daarom een interessant terugwin perspectief. De verst ontwikkelde technieken voor winning van fosfaat uit as zijn gebaseerd op een zure uitloging waardoor een ruwe fosforzuur oplossing ontstaat die daarna opgewerkt wordt als grondstof voor kunstmestproductie en ook hoogwaardigere technische toepassingen.

Dit rapport beschrijft de haalbaarheid van een hele nieuwe manier van fosfor terugwinning uit as: Spodofos. Het Spodofos proces beoogt witte fosfor uit slibverbrandingsas te produceren via een thermiet reactie met aluminium. Witte fosfor is, afhankelijk van de kwaliteit, een hoogwaardige grondstof voor brandvertragers, smeermiddeladditieven, gewasbeschermingsmiddelen, elektrolyten voor lithiumaccu's, katalysatorliganden en nog veel meer specialis-tische toepassingen. Sinds het einde van de bedrijfsvoering van Thermphos in Vlissingen beschikt Europa niet meer over eigen productiecapaciteit voor witte fosfor en is het afhanke-lijk van import uit onder andere Kazachstan en China.

Een thermiet reactie is een vastestofreactie tussen een metaalpoeder en een fijnverdeeld metaaloxide. Daarbij moet het metaalpoeder minder edel zijn dan het metaal in het metaal-oxide. De meest bekende thermietreactie is die tussen aluminiumpoeder en ijzeroxide. Deze reactie geeft extreem veel energie en wordt bijvoorbeeld gebruikt bij exothermisch lassen (bijvoorbeeld bij spoorrails). Het vloeibare ijzer dat ontstaat in de reactie vormt dan de lasver-binding.

De onderstaande figuur geeft een schematisch overzicht van de belangrijkste proces stappen en de mogelijke ingangsmaterialen, hulpstoffen en producten. Dit rapport gaat vooral in op de kansen voor fosforwinning van slibverbrandingsas, maar andere fosfaathoudende stoffen als beendermeel, struviet en vivianiet kunnen in principe ook in het proces worden verwerkt.



Het Spodofos proces heeft overeenkomsten met de thermische productie van witte fosfor zoals dat bij Thermphos in Vlissingen gebeurde tot aan 2012. Er zijn echter enkele belangrijke verschillen. In het Spodofos proces wordt aluminium gebruikt als reductor terwijl bij de normale witte fosfor productie een combinatie van cokes en elektriciteit wordt gebruikt. Door aluminium te gebruiken kan de reactie veel eenvoudiger verlopen in een compactere reactor en wordt de productie van koolmonoxide gas uit de cokes voorkomen zodat de gasreiniging veel kleiner kan zijn. Vanwege de hogere temperatuur bij het Spodofos proces is de fosforproductie minder gevoelig voor ijzer in de grondstoffen. Een belangrijke stap bij Thermphos was ook de sinterfabriek waarin bolletjes van de fosfaaterts werden gemaakt die vervolgens gevoed werden aan de fosforoven. Juist deze sinterfabriek zorgde voor veel luchtmissies waardoor Thermphos in opspraak kwam en is juist niet nodig voor Spodofos.

Dit rapport omvat een eerste technologisch-economische evaluatie van het Spodofos principe. Daarnaast is de duurzaamheid van het proces beoordeeld via een levenscyclusanalyse.

Thermodynamische modelleringen en een expert beoordeling van de resultaten van labproeven laten zien dat het proces plausibel en uitvoerbaar is. Voor verschillende samenstellingen levert de reactie voldoende energie om deze volledig te laten verlopen en de gewenste producten te produceren. Wel zullen aanvullende proeven nodig zijn om meer specifieke kwaliteit gerelateerde vragen te kunnen beantwoorden (bijvoorbeeld fosfor en koper gehalte in de ferrofosfor, arseen in de witte fosfor).

Een Spodofos installatie kan gerealiseerd worden met grotendeels bekende techniek. De belangrijkste nieuwe elementen die ontwikkeld moeten worden zijn de RMC (reaction mixture conditioning) unit en de reactor. Hiervoor kan weliswaar aangesloten worden bij bekende principes, maar de uitvoering voor Spodofos is uniek. Met name voor deze installatie onderdelen is ontwikkeling nodig, eerst op laboratoriumschaal en vervolgens op pilot en demonstratieschaal. Voor de technische ontwikkeling is theoretisch 6-7 jaar nodig om tot een full scale installatie te komen, zonder rekening te houden met wachttijden voor besluitvorming, financiering en regelgeving (zoals bijvoorbeeld einde-afval status). Ervaringen bij andere ontwikkelingen laten zien dat hierdoor de praktische doorlooptijd kan oplopen.

Het Spodofos proces gebruikt aluminiumschroot voor het uitvoeren van de reactie. Hiervoor kan een lage kwaliteit worden gebruikt, zoals die bijvoorbeeld gewonnen wordt uit bodemas van huisvuilverbranding. De inkoopkosten voor dit aluminium zijn niettemin significant en ongeveer in balans met de opbrengsten van de geproduceerde witte fosfor. De financiële winst voor het Spodofos proces zit hem daarom vooral in de omzetting van slibverbrandingsas met een negatieve waarde in een slak met een positieve waarde. Dit is onder andere mogelijk omdat het proces van versmelten eventuele verontreinigingen immobiliseert in de slakken. Ook zal het proces de eventueel met aangevoerde grondstoffen organische verontreinigingen (bijvoorbeeld PFAS) naar verwachting volledig afbreken.

Voor elke ton verwerkte as produceert het proces ongeveer één ton slak. De afzetmogelijkheden van de Spodofos slak bepalen daarom in hoge mate de financiële rentabiliteit van het proces. Vanwege het hoge aluminiumgehalte van de slakken wordt verwacht dat de slak toegepast kan worden als grondstof voor vuurvast materiaal. In dat scenario is er sprake van een zeer korte terugverdientijd (investering gedeeld door netto opbrengsten) van 2 jaar bij een interne rentabiliteit (IRR) van 38%. In het midden scenario is de slak bruikbaar als grondstof voor bouwstoffen en is de terugverdientijd 5 jaar en is de IRR 13%. In het pessimistische scenario is de slak slechts bruikbaar als grindervanger en dan ligt de terugverdientijd van het totale project op 8 jaar bij een IRR van 6%. Toepassing van de as in vormgegeven bouwstoffen leidt tot een scenario die tussen deze uitersten in ligt. Daarbij is steeds uitgegaan van een poorttarief van de slibverbrandingsas van 90 €/ton (excl. BTW). In de gunstigere scenario's kan zelfs betaald worden voor de as in combinatie met een acceptabele terugverdientijd van 6 jaar.

Voor de duurzaamheid van het Spodofos proces zijn twee aspecten van belang: de manier waarop de inzet van aluminium wordt afgewogen tegen de productie van witte fosfor en de aannames die worden gedaan over de afzet van de geproduceerde slakken.

De levenscyclusanalyse laat zien dat het Spodofos proces een gunstige klimaat impact heeft van -1.007 kg CO<sub>2</sub>-eq per ton as als secundair aluminium wordt gebruikt.

Het kental voor de klimaatimpact houdt geen rekening met aspecten zoals schaarste van grondstoffen. De duurzaamheidsanalyse laat zien dat de huidige methodieken die wel rekening houden met schaarste geen eenduidig antwoord geven op het relatieve belang van productie van fosfor versus aluminium. Wel lijkt het belang van de productie van witte fosfor groter omdat de Europese Unie dit als een kritische grondstof beoordeelt en aluminium niet. Bovendien is het eenvoudiger om aluminium in een kringloop te houden dan fosfor her te gebruiken.

Ook de afzetmogelijkheden voor de slakken hebben een grote invloed op de duurzaamheidsafweging. Als de slakken bruikbaar blijken voor vuurvast materiaal dan voorkomt deze hoogwaardige toepassing de inzet van alumina en ontstaat een gunstig klimaatteffect van -1.130 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas (ten opzichte van toepassing als grindvervanger). Als ook de ferrofosfor toegepast kan worden in de staalindustrie ontstaat een extra voordeel van -192 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas. Daardoor loopt de gunstige klimaat impact op tot wel 2.239 kg CO<sub>2</sub>-eq per ton as.

Voor zowel de economische rentabiliteit als de duurzaamheidsafweging is het van doorslaggevend belang dat de geproduceerde slakken een zo hoogwaardig mogelijke afzet vinden (bijvoorbeeld als vuurvast materiaal). Daarom moet hier in de ontwikkeling al op ingezet worden en een belangrijk onderdeel zijn van verder onderzoek.

Het Spodofos proces heeft grote asvolumes nodig voor een voldoende economische rentabiliteit. Voor de huidige asproductie zijn in Nederland en Duitsland momenteel ook plannen in ontwikkeling om fosfaat via een zure extractie terug te winnen uit deze as. Vermoedelijk zullen dergelijke installaties binnen enkele jaren worden gerealiseerd. Omdat ook deze installaties een bepaalde afschrijving hebben bestaat het risico op een lock-in en dit kan invloed hebben op de ontwikkeling van Spodofos. Hoe groot dit risico is hangt, naast het ontwikkelingsstadium, vooral ook af van de economische en duurzaamheidsaspecten.

Het resultaat van de technologische evaluatie, de economische evaluatie en de duurzaamheidsafweging laat zien dat er voldoende kans is op een succesvolle ontwikkeling die leidt tot een economisch rendabele en duurzame productie van witte fosfor.



# DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

*Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.*

# SPODOFOS: WITTE FOSFOR PRODUCTIE UIT SLIBVERBRANDINGSASSEN: EERSTE EVALUATIE VAN DE DUURZAAMHEID EN TECHNOLOGISCHE EN ECONOMISCHE HAALBAARHEID

## INHOUD

|          |                                              |          |
|----------|----------------------------------------------|----------|
|          | TEN GELEIDE                                  |          |
|          | SAMENVATTING                                 |          |
|          | DE STOWA IN HET KORT                         |          |
| <b>1</b> | <b>INLEIDING</b>                             | <b>1</b> |
| 1.1      | Achtergrond                                  | 1        |
| 1.2      | Spodofos                                     | 2        |
| 1.3      | Opzet van het rapport                        | 2        |
| <b>2</b> | <b>UITGANGSPUNTEN</b>                        | <b>4</b> |
| 2.1      | Inleiding                                    | 4        |
| 2.2      | Verwerkingscapaciteit                        | 4        |
| 2.3      | Assamenstelling                              | 4        |
| <b>3</b> | <b>TECHNOLOGISCHE EVALUATIE</b>              | <b>7</b> |
| 3.1      | Inleiding                                    | 7        |
| 3.2      | Het Spodofos proces                          | 7        |
| 3.3      | Massa- en energiebalans                      | 8        |
| 3.3.1    | Uitgangspunten thermodynamische berekeningen | 8        |
| 3.3.2    | Resultaten simulatie massa- en energiebalans | 10       |
| 3.4      | Producten                                    | 11       |
| 3.4.1    | Witte fosfor                                 | 11       |
| 3.4.2    | Ferrofosfor                                  | 12       |
| 3.4.3    | Slakken                                      | 12       |
| 3.4.4    | Overige aandachtspunten                      | 17       |
| 3.5      | Technologie en apparatuur                    | 17       |
| 3.5.1    | Inleiding                                    | 17       |
| 3.5.2    | Algemene beschouwing                         | 17       |
| 3.6      | Doorontwikkeling Spodofos                    | 18       |
| 3.6.1    | Inleiding                                    | 18       |
| 3.6.2    | Technologieontwikkeling                      | 19       |
| 3.6.3    | Doorkijk naar first-of-a-kind installatie    | 23       |
| 3.6.4    | Showstoppers                                 | 24       |
| 3.6.5    | Organisatie van de ontwikkeling              | 25       |

|            |                                                                   |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b>   | <b>TECHNISCH ONTWERP VAN EEN SPODOFOS INSTALLATIE</b>             | <b>28</b> |
| <b>4.1</b> | Inleiding                                                         | 28        |
| <b>4.2</b> | Uitgangspunten                                                    | 28        |
| 4.2.1      | Capaciteit en assamenstelling                                     | 28        |
| 4.2.2      | Materiaalstromen                                                  | 28        |
| 4.2.3      | Continu-productie                                                 | 29        |
| <b>4.3</b> | Basisontwerp verwerkingsproces                                    | 29        |
| 4.3.1      | Toelichting op de procesdelen                                     | 30        |
| 4.3.2      | Onderhoud                                                         | 35        |
| 4.3.3      | Veiligheidsvoorzieningen                                          | 35        |
| 4.3.4      | Energie- en grondstoffenverbruik                                  | 35        |
| 4.3.5      | Opties voor het verder verduurzamen van de procesgang             | 36        |
| 4.3.6      | Organisatie                                                       | 36        |
| <b>4.4</b> | Concept locatie-ontwerp                                           | 37        |
| <b>4.5</b> | Vestiging                                                         | 41        |
| 4.5.1      | Bestemmingsplan                                                   | 41        |
| 4.5.2      | Locatiekeuze                                                      | 41        |
| 4.5.3      | Vergunningen                                                      | 42        |
| <b>4.6</b> | Investering en operationele kosten                                | 42        |
| <b>5</b>   | <b>ECONOMISCHE EVALUATIE</b>                                      | <b>44</b> |
| <b>5.1</b> | Inleiding                                                         | 44        |
| <b>5.2</b> | Beschikbaarheid van aluminium                                     | 44        |
| 5.2.1      | Introductie aluminiummarkt                                        | 44        |
| 5.2.2      | Aluminiumschroot in de Europese Unie                              | 47        |
| 5.2.3      | Commerciële aspecten                                              | 52        |
| 5.2.4      | Kwaliteit van aluminiumschroot – beoordelingssysteem              | 54        |
| 5.2.5      | Samenvatting                                                      | 55        |
| <b>5.3</b> | Markt voor Spodofos producten                                     | 56        |
| 5.3.1      | Inleiding                                                         | 56        |
| 5.3.2      | Witte fosfor                                                      | 56        |
| 5.3.3      | Spodofos slakken                                                  | 58        |
| 5.3.4      | Ferrofosfor                                                       | 59        |
| 5.3.5      | Stofresidu                                                        | 61        |
| <b>5.4</b> | Business case                                                     | 61        |
| <b>6</b>   | <b>LEVENSCYCLUSANALYSE</b>                                        | <b>65</b> |
| <b>6.1</b> | Inleiding                                                         | 65        |
| <b>6.2</b> | Methode                                                           | 65        |
| 6.2.1      | Doel                                                              | 65        |
| 6.2.2      | Afbakening                                                        | 66        |
| 6.2.3      | LCA-methodiek en milieu-indicatoren                               | 68        |
| 6.2.4      | Datagebruik en datakwaliteit                                      | 69        |
| <b>6.3</b> | Inventarisatie                                                    | 69        |
| <b>6.4</b> | Resultaten klimaatimpact                                          | 70        |
| 6.4.1      | Introductie                                                       | 70        |
| 6.4.2      | Klimaatimpact verwerking slibas                                   | 71        |
| 6.4.3      | Gevoelighedsanalyse uitgespaarde producten                        | 72        |
| 6.4.4      | Gevoelighedsanalyse voor aluminiuminput                           | 73        |
| 6.4.5      | Gevoelighedsanalyse voor duurzame elektriciteit en elektrificatie | 75        |
| 6.4.6      | Gevoelighedsanalyse voor verschillende fosforconcentraties        | 77        |
| 6.4.7      | Klimaatimpact van de producten                                    | 79        |
| 6.4.8      | Conclusies                                                        | 80        |

|            |                                                                                      |     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>6.5</b> | Schaarste-analyse                                                                    | 81  |
| 6.5.1      | Overzichtstabel vergelijking aluminium en witte fosfor                               | 82  |
| 6.5.2      | Mondiale aanwezigheid van de grondstoffen                                            | 82  |
| 6.5.3      | Toegankelijkheid                                                                     | 83  |
| 6.5.4      | Hoe gaat LCA om met deze aspecten van schaarste, en wat zeggen de modelberekeningen? | 86  |
| <b>6.6</b> | Discussie en conclusie                                                               | 89  |
| 6.6.1      | Klimaatimpact                                                                        | 89  |
| 6.6.2      | Schaarste-analyse                                                                    | 90  |
| 6.6.3      | Risico's en kansen                                                                   | 91  |
| <b>7</b>   | DISCUSSIE                                                                            | 92  |
| 7.1        | Technologische evaluatie                                                             | 92  |
| 7.2        | Economische afweging                                                                 | 93  |
| 7.3        | Duurzaamheidsafweging                                                                | 94  |
| 7.4        | Verdere ontwikkeling                                                                 | 96  |
| <b>8</b>   | CONCLUSIES & AANBEVELINGEN                                                           | 96  |
| 8.1        | Conclusies                                                                           | 97  |
| 8.2        | Aanbevelingen                                                                        | 98  |
| <b>9</b>   | REFERENTIES                                                                          | 100 |

# 1

## INLEIDING

### 1.1 ACHTERGROND

Terugwinning van het element fosfor uit zuiveringsslib is een belangrijk aandachtspunt voor de Nederlandse waterschappen. De verwijdering van nutriënten uit rioolwater, zoals fosfor, is een kerntaak voor de rioolwaterzuiveringen. In het rioolwater is fosfor vooral aanwezig in de vorm van fosfaat en dit fosfaat wordt verwijderd en geconcentreerd in het zuiveringsslib en slibverbrandingsas (na monoverbranding). In de huidige verwerkingsroutes voor dit slib gaat dit fosfaat echter nog grotendeels verloren. Enerzijds biedt terugwinning van fosfaat uit het slib kansen om het volume aan afvalstoffen van de verwerking van slib te reduceren en bij de lokale winning van struviet worden onderhoudsproblemen voorkomen. Anderzijds is fosfaat een eindige grondstof. Fosfor is naast stikstof en kalium een essentieel ingrediënt voor kunstmest en daarmee voor onze voedselproductie. Hiervoor wordt nu voornamelijk fosfaaterts gebruikt als grondstof.

Terugwinning van fosfaat uit zuiveringsslib kan helpen om fosfaat meer circulair te gebruiken en daarom is er in Nederland en wereldwijd veel aandacht naar mogelijkheden om fosfaat terug te winnen uit zuiveringsslib. Hierbij zijn er grofweg twee hoofdroutes. Allereerst kan het fosfaat op rioolwaterzuiveringen selectief worden neergeslagen in slib of rejectiewater van de slibontwatering als een slecht oplosbaar fosfaat-zout. Struviet (magnesiumammoniumfosfaat) is hiervan het bekendste voorbeeld en hiervoor zijn ook al diverse installaties in Nederland gerealiseerd. Struviet vindt voornamelijk toepassing als kunstmest. Daarnaast zijn er ook andere mogelijkheden in ontwikkeling zoals bijvoorbeeld de winning van vivianiet (ijzer(II)fosfaat). Vivianiet kan gebruikt worden als (ijzer)kunstmest en kleurstof in bouwproducten.

Een tweede belangrijke route voor de terugwinning van fosfaat is het terugwinnen van fosfaat uit de as die overblijft na de monoverbranding van zuiveringsslib. Deze as bevat tot wel 10% P, komt in grote volumes vrij op een beperkt aantal locaties en biedt daarom een interessant terugwin perspectief. De meeste en verst ontwikkelde technieken voor winning van fosfaat uit as zijn gebaseerd op een zure uitloging van de as waardoor een ruwe fosforzuur oplossing ontstaat die na opwerking geschikt is als grondstof voor kunstmestproductie. De verkregen fosforzuur oplossing bevat minder zware metalen dan wanneer deze uit fosfaaterts gemaakt wordt en is daarom ook bruikbaar voor hoogwaardigere, technische fosforzuur toepassingen [Hanßen 2016].

## 1.2 SPODOFOS

Dit rapport beschrijft de haalbaarheid van een hele andere manier van fosfor terugwinning uit as: Spodofos. Het Spodofos proces maakt het mogelijk om bij hoge temperatuur witte fosfor te produceren uit slibverbrandingsas via een thermiet reactie met aluminium.

Een thermiet reactie is een vastestofreactie tussen een metaalpoeder en een fijnverdeeld metaaloxide. Daarbij moet het metaalpoeder minder edel zijn dan het metaal in het metaaloxide. De meest bekende thermietreactie is die tussen aluminiumpoeder en ijzeroxide. Deze reactie geeft extreem veel energie en wordt bijvoorbeeld gebruikt bij exothermisch lassen (bijvoorbeeld bij spoorrails). Het vloeibare ijzer dat ontstaat in de reactie vormt dan de lasverbinding.

Het proces heeft overeenkomsten met de thermische productie van witte fosfor zoals dat bij Thermphos in Vlissingen gebeurde tot aan 2012. Er zijn echter enkele belangrijke verschillen. In het Spodofos proces wordt aluminium gebruikt als reductor terwijl dit bij de normale witte fosfor productie een combinatie van cokes en elektriciteit wordt gebruikt. Door aluminium te gebruiken kan de reactie veel eenvoudiger verlopen in een compactere reactor en wordt de productie van koolmonoxide gas uit de cokes voorkomen zodat de gasreiniging veel kleiner kan zijn. Vanwege de hogere temperatuur bij het Spodofos proces is de reactie minder gevoelig voor ijzer in de grondstoffen. Een belangrijke stap bij Thermphos was ook de sinterfabriek waarin bolletjes van de fosfaaterts werden gemaakt die vervolgens gevoed werden aan de fosforoven. Juist deze sinterfabriek zorgde voor veel luchtmissies waardoor Thermphos in opspraak kwam en is juist niet nodig voor Spodofos. Daarnaast gaf de witte fosfor productie zoals die door Thermphos gebeurde ook enkele andere problemen zoals de productie van radioactieve bijproducten. Deze aspecten hingen grotendeels samen met het gebruik van fosfaaterts als grondstof.

Witte fosfor is afhankelijk van de kwaliteit een hoogwaardige grondstof voor brandvertragers, smeermiddeladditieven, gewasbeschermingsmiddelen, elektrolyten voor lithiumaccu's, katalysatorliganden en nog veel meer specialistische toepassingen. Sinds het einde van de bedrijfsvoering van Thermphos beschikt Europa momenteel zelf niet meer over productiecapaciteit voor witte fosfor en is afhankelijk van import uit onder andere Kazachstan en China. Voor de terugwinning van elementaire fosfor uit slibverbrandingsas is voor zover bekend maar één andere techniek (FlashPhos/RecoPhos) in ontwikkeling, die zich ook nog in een vroeg ontwikkelstadium bevindt<sup>1</sup>.

## 1.3 OPZET VAN HET RAPPORT

Dit rapport omvat een eerste technologisch-economische evaluatie van het Spodofos principe. Dit principe is door de initiatiefnemers (ThermusP) op labschaal aangetoond. Deze resultaten en de thermodynamica achter de chemische reacties is beoordeeld en het resultaat van deze technologische analyse is opgenomen hoofdstuk 3 op basis van een aantal uitgangspunten voor de assamenstelling en capaciteit van een toekomstige installatie (hoofdstuk 2). Vervolgens is onderzocht hoe het reactieprincipe kan worden vertaald in een technisch ontwerp voor een full scale installatie en de daarmee gemoeide investeringen en operationele kosten (hoofdstuk 4).

1 Zie FlashPhos (<https://www.mitechnology.at/flashphos-en/>). Dit project lijkt voort te bouwen op her eerdere RecoPhos project ([www.recophos.eu](http://www.recophos.eu)).

Het Spodofos proces zet aluminium en slibverbrandingsas om in witte fosfor, ferrofosfor en een aluminiumrijke slak. Deze omzetting moet waarde toevoegen, zowel vanuit economisch oogpunt als vanuit milieuoogpunt. Hoofdstuk 5 geeft daarom een analyse van de aluminiummarkt en de mate van beschikbaarheid van secundair aluminium voor het Spodofos proces. Daarnaast geeft dit hoofdstuk een beschouwing over de markt voor witte fosfor, ferrofosfor en aluminiumrijke slak. Dit resulteert uiteindelijk in de business case voor Spodofos. Tenslotte beschrijft hoofdstuk 6 de resultaten van een levenscyclus analyse. In hoofdstuk 7 volgt vervolgens een discussie waarbij kansen voor de Spodofos ontwikkeling in zijn geheel worden beschouwd die uiteindelijk leidt tot conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 8.

# 2

## UITGANGSPUNTEN

### 2.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk beschrijft de belangrijkste uitgangspunten die gebruikt zijn voor de evaluatie van het Spodofos proces. Voor de warmte/massabalansen, de terugwinningsrendementen, de business case en de LCA berekeningen zijn de assamenstelling en de capaciteit van een installatie van grote invloed op de resultaten. Een vaste referentie is van belang voor een zo goed mogelijke onderlinge vergelijkbaarheid van de resultaten van deze en toekomstige analyses op het gebied van fosfaatrecyclings- en asverwerkingstechnologieën.

### 2.2 VERWERKINGSCAPACITEIT

Voor de verwerkingscapaciteit van een toekomstige Spodofos installatie is een capaciteit van 50.000 ton as van de verbranding van zuiveringsslib per jaar als basis aangehouden. Dit komt ongeveer overeen met de gezamenlijke asproductie van SNB en HVC. Voor de gevoeligheidsanalyse is 25.000 en 75.000 ton aangehouden.

### 2.3 ASSAMENSTELLING

Als uitgangspunt voor dit onderzoek is een gewogen gemiddelde assamenstelling genomen van de assen van SNB en HVC op basis van beschikbare data voor 2020. In een Duits sector overkoepelend onderzoek van 2014 [UBA 2014] hebben 24 van 26 monoverbrandingsinstallaties in Duitsland meegewerkt. Hiermee is van het jaar 2013 van 305.000 ton slib as de kwaliteit (2012-2013) in kaart gebracht. Ook de askwaliteit van de vier grootste monoverbranders in Duitsland uit dit rapport is in kaart gebracht. De kwaliteit blijkt duidelijk anders te liggen. De bulkcomponenten, de bekende zware metalen en arseen en chloride worden hier in beschouwing genomen.

Kwik en Cadmium zijn steeds dermate laag (ordegrootte respectievelijk 0,1 en 2 mg/kg) dat deze buiten beschouwing worden gelaten. Deze basisgegevens zijn in tabel 1 zonder omrekening (met uitzondering van het gewogen gemiddelde) weergegeven. In tabel 2 is de bulk-samenstelling gegeven in "XRF-format", als oxiden. Het vochtgehalte (steeds lager dan 1%) is op 0 gesteld. Het gaat dus steeds om droge as. Ook gloeiverliezen van o.a. niet verbrande kool worden niet aanwezig verondersteld. Vanwege de doelstelling van het onderzoek (terugwinning grondstoffen) is in bovengenoemd Duitse rapport chloride niet gerapporteerd, maar het gehalte zal naar verwachting niet veel anders zijn dan voor de Nederlandse assen. De resultaten van deze analyse zijn samengevat in Tabel 1.



TABEL 1 OVERZICHT GEWOGEN GEMIDDELDE SAMENSTELLINGEN EN VOLUMES VAN VERSCHILLENDE ASSOORTEN

|                                                   | Basis<br>SNB + HVC gewogen | SNB 2020 | HVC 2017 | Alle Duitse assen<br>2013 | 4 grootste Duitse<br>verbranders 2013 |
|---------------------------------------------------|----------------------------|----------|----------|---------------------------|---------------------------------------|
| Tonnage                                           | 55.812                     | 33.812   | 22.000   | 304.791                   | 144.500                               |
| <b>Hoofdbestanddelen</b>                          |                            |          |          |                           |                                       |
| Aluminium (Al)                                    | 3,62%                      | 3,62%    | 3,60%    | 4,96%                     | 5,15%                                 |
| Calcium (Ca)                                      | 11,74%                     | 13,31%   | 9,31%    | 14,13%                    | 14,74%                                |
| IJzer (Fe)                                        | 9,72%                      | 9,40%    | 10,21%   | 9,78%                     | 8,96%                                 |
| Kalium (K)                                        | 1,33%                      | 1,14%    | 1,62%    | 0,74%                     | 0,67%                                 |
| Magnesium (Mg)                                    | 2,56%                      | 2,05%    | 3,34%    | 1,38%                     | 1,46%                                 |
| Natrium (Na)                                      | 0,83%                      | 0,64%    | 1,12%    | 0,81%                     | 1,03%                                 |
| Fosfor (P)                                        | 10,01%                     | 9,12%    | 11,39%   | 6,29%                     | 4,64%                                 |
| Zwavel (S)                                        | 1,14%                      | 1,55%    | 0,50%    | 2,01%                     | 2,49%                                 |
| Silicium (Si)                                     | 10,22%                     | 9,40%    | 11,49%   | 12,85%                    | 14,96%                                |
| Titaan (Ti)                                       | 0,66%                      | 0,83%    | 0,39%    | 0,43%                     | 0,53%                                 |
| <b>Hoofdbestanddelen (omgerekend naar oxides)</b> |                            |          |          |                           |                                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | 6,8%                       | 6,8%     | 6,8%     | 9,4%                      | 9,7%                                  |
| CaO                                               | 16,4%                      | 18,6%    | 13,0%    | 19,8%                     | 20,6%                                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | 13,9%                      | 13,4%    | 14,6%    | 14,0%                     | 12,8%                                 |
| K <sub>2</sub> O                                  | 2,4%                       | 2,1%     | 2,9%     | 1,4%                      | 1,2%                                  |
| MgO                                               | 4,2%                       | 3,4%     | 5,5%     | 2,3%                      | 2,4%                                  |
| Na <sub>2</sub> O                                 | 2,0%                       | 1,5%     | 2,7%     | 1,9%                      | 2,5%                                  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                     | 22,9%                      | 20,9%    | 26,1%    | 14,4%                     | 10,6%                                 |
| S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 2,8%                       | 3,9%     | 1,3%     | 5,0%                      | 6,2%                                  |
| SiO <sub>2</sub>                                  | 21,9%                      | 20,1%    | 24,6%    | 27,5%                     | 32,0%                                 |
| TiO <sub>2</sub>                                  | 1,1%                       | 1,4%     | 0,7%     | 0,7%                      | 0,9%                                  |
| Rest <sup>1)</sup>                                | 5,5%                       | 7,8%     | 1,8%     | 3,7%                      | 1,0%                                  |
| <b>Sporen [mg/kg]</b>                             |                            |          |          |                           |                                       |
| Chloride (Cl)                                     | 1.068                      | 1.243    | 800      | 1)                        | 1)                                    |
| Chroom (Cr)                                       | 134                        | 109      | 172      | 354                       | 433                                   |
| Lood (Pb)                                         | 263                        | 187      | 380      | 205                       | 280                                   |
| Nikkel (Ni)                                       | 68                         | 61       | 79       | 191                       | 306                                   |
| Koper (Cu)                                        | 1.095                      | 929      | 1.352    | 1.306                     | 1.697                                 |
| Zink (Zn)                                         | 2.672                      | 2.446    | 3.019    | 2.538                     | 2.706                                 |
| Arseen (As)                                       | 33                         | 19       | 56       | 22                        | 24                                    |

1) In de SNB as is 1,6% CO<sub>2</sub> gemeten (derhalve 1,0% CO<sub>2</sub> in de basisas).

De Duitse assen van de vier grootste verbranders (ondergrens 30.000 ton as/a) hebben een laag P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gehalte (Tabel 2). De reden hiervan moet gezocht worden in het co-verbranden van industrieel zuiveringsslib bij deze vier (mono) verbranders (zie tabel 1 pag. 45 in [UBA 2014] voor de Anlagen 7, 12, 21 en 22). De overige, met name communaal slibverbranders, leveren dus een duidelijk hoger dan gemiddeld P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in de as (t.w. ca. 19%). T.a.v. de P-terugwinningspotentie zijn met name de Nederlandse assen gunstiger.

**TABEL 2** **SAMENVATTING FOSFOR GEHALTES VAN DE VERSCHILLENDE ASSEN EN MOLVERHOUDING FE/P**

|                | <b>Basis<br/>SNB + HVC gewogen</b> | <b>SNB 2020</b> | <b>HVC 2017</b> | <b>Alle Duitse assen<br/>2013</b> | <b>vier grootste Duitse<br/>verbranders 2013</b> |
|----------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| P [kg/ton as]  | 101                                | 91              | 114             | 63                                | 46                                               |
| Fe/P [mol/mol] | 0,54                               | 0,57            | 0,50            | 0,86                              | 1,07                                             |

In dit rapport is steeds als referentie uitgegaan van het gewogen gemiddelde van de SNB en HVC- verbrandingsassen. In gevoeligheidsanalyses zijn ook effecten berekend voor de afzonderlijke assen van SNB en HVC, eventueel ook in andere verhoudingen als dat significant andere uitkomsten oplevert en het gemiddelde van de Duitse as.

# 3

## TECHNOLOGISCHE EVALUATIE

### 3.1 INLEIDING

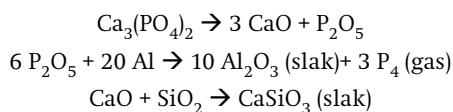
Dit hoofdstuk geeft een technologische evaluatie van het Spodofos proces. De plausibiliteit van de omzetting en de invloed van een wisselende assamenstelling is onderzocht via een thermodynamische modellering van het proces. Op basis hiervan zijn de massa en energiebalansen gevalideerd en voorspellingen gedaan over de verwachte samenstelling en kwaliteiten van de producten. Tenslotte is een eerste inschatting gemaakt van de proces stappen die nodig zijn om het Spodofos proces op praktijkschaal te realiseren en is een beoordeling gemaakt van de belangrijkste technologische uitdagingen.

### 3.2 HET SPODOFOS PROCES

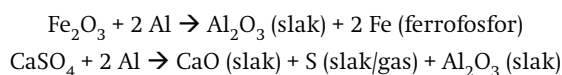
Het Spodofos proces maakt gebruik van een aluminothermische omzetting van fosfaten naar elementair fosfor. Een fosfaatbron, meer in het bijzonder zuiveringsslibas, wordt met aluminium gemengd en voorverhit tot ca 600 °C. In een reactor komt het mengsel vervolgens tot reactie, waarbij het aluminium de aanwezige fosfaten reduceert tot fosfor onder vorming van aluminiumoxide. Tevens wordt het aanwezige ijzeroxide (deels gebonden aan fosfaat, al naar gelang de soort) gereduceerd tot ijzer.

De ontstane fosfordamp wordt aan het proces onttrokken en gecondenseerd. Het ontstane vloeibaar ijzer zal naar gelang de omstandigheden een smelt van ferrofosfor of (fosforarm) ijzer vormen. Deze wordt samen met de ontstane minerale slak uit de reactor getapt en afgekoeld.

De belangrijkste reacties die plaatsvinden zijn:



Daarnaast vindt ijzer- en sulfaatreductie plaats:



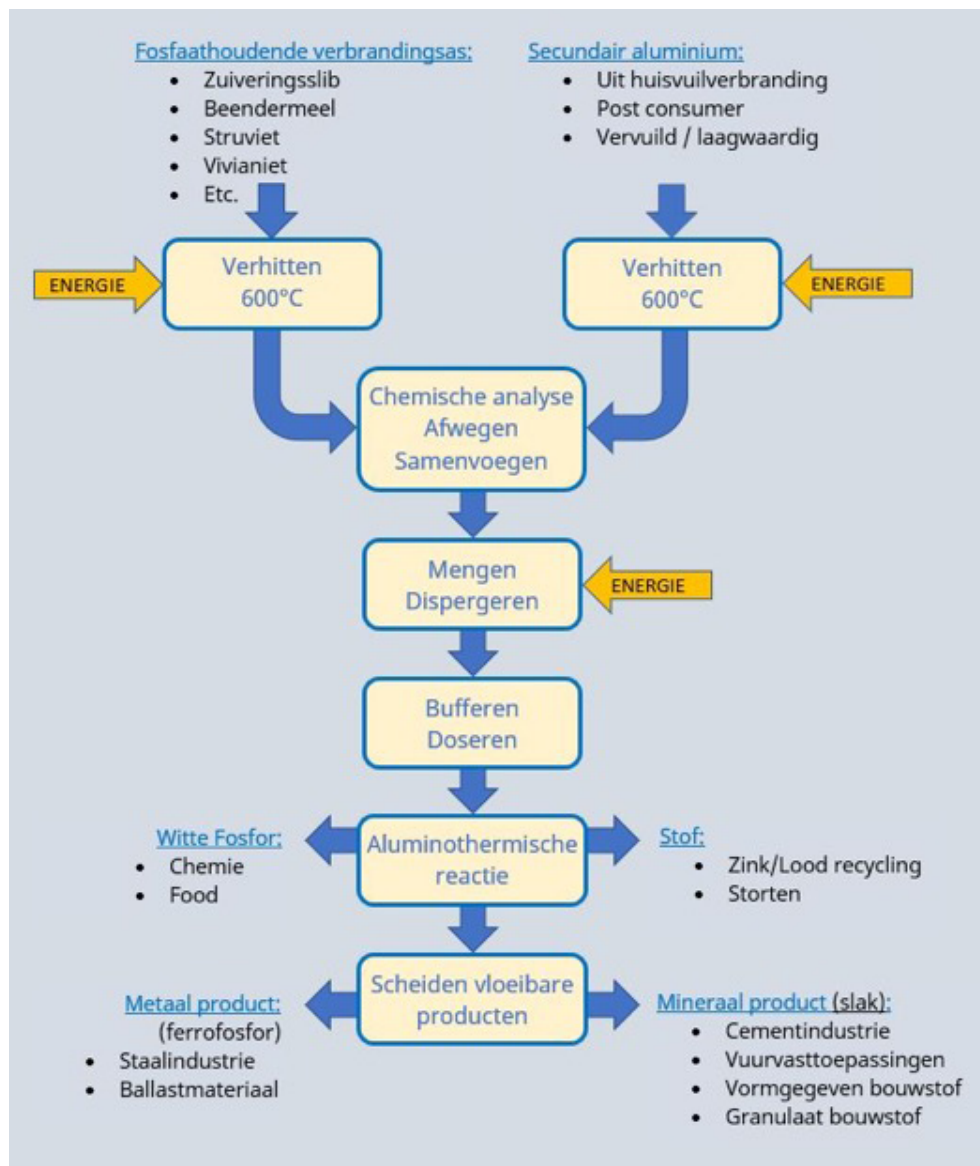
Een deel van de fosfor lost op in het vloeibare ijzer:



Figuur 1 geeft in een vereenvoudigd processchema de belangrijkste stappen weer van het proces en welke materialen het proces in en uitgaan. Paragraaf 3.3 gaat nader in op de achterliggende chemische principes en de massa- en energiebalans. Paragraaf 3.4 gaat vervolgens in op de kwaliteit van de producten die het Spodofos proces zal maken. Paragraaf 3.5 geeft een beschouwing van de technologische aspecten en uitdagingen die samenhangen met het realiseren van het proces op praktijk schaal. Tenslotte beschrijft paragraaf 3.6 de benodigde ontwikkelstappen voor de technologie.

FIGUUR 1

PROCESSCHEMA OP HOOFDLIJNEN VOOR HET SPODOFOS PROCES



### 3.3 MASSA- EN ENERGIEBALANS

#### 3.3.1 UITGANGSPUNTEN THERMODYNAMISCHE BEREKENINGEN

In dit eerste deel worden de uitgangspunten gevalideerd op basis van een energie- en massa-balans die bepaald is op basis van een thermodynamische berekening. Uitgangspunten voor deze berekening waren:

1. De vijf assamenstellingen zoals beschreven in paragraaf 2.3.
2. De thermodynamische basis is een Hess-cyclus, waarbij standaard vormingsenthalpieën van ingaande en uitgaande stromen worden vergeleken bij 25 C, waaruit een energie-overschot berekend wordt.
3. Hiermee is ook de massabalans vastgelegd.
4. Vormingsenthalpieën, warmtecapaciteiten, en andere relevante constanten zijn uit diverse literatuur en bestaande modellen gehaald (o.a. NIST) en waar nodig uit meerdere bronnen gevalideerd
5. De assamenstelling wordt door de asleveranciers als losse oxides opgegeven. De toekenning van de elementen aan reëel aanwezige minerale fasen wordt gedaan op basis van zuur-base-

affiniteit en met inachtneming van bekende XRD-data; in het kort: fosfaat wordt aan MgO en CaO toegekend (tri-Mg/Ca-fosfaat/whitlockiet, aanwezig volgens XRD-data), eventueel nog overschietend fosfaat aan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; sulfaat aan daarna nog beschikbaar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; overschietend  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en evt. CaO worden als vrij beschikbare fasen in het model gestopt, zoals ook door XRD wordt bevestigd; er wordt aangenomen dat silica en deze oxides in het verbrandingsproces bij de slibverbranders niet reageren tot silicaten.

6. Berekening van de Al-behoefte gebeurt o.b.v. blikchroot (95% Al, 3,5% Mg, 1,5% aluminium-oxide).
7. Twee nauw verwante berekeningen worden gedaan, één waarbij aanwezig sulfaat tot zwavel wordt gereduceerd (ervaring fosforindustrie), één waarbij aluminiumsulfide wordt gevormd. Deze berekeningen verschillen alleen in detail.
8. De slak wordt in de berekening samengesteld uit calciumsilicaat ( $\text{CaSiO}_3$ ) waarvan bekend is dat de vorming sterk exotherm is; vorming van verdere mengfasen met bv.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  of overschietend silica wordt weggelaten omdat dit nauwelijks warmte-effecten met zich meebrengt, dit verhoogt vooral de entropie. Magnesium volgt calcium in het model.
9. De overschietende proceswarmte wordt toegekend aan de ontstane fasen: ferrofosfor, slak, en fosfor. Hierbij worden de getabelleerde en geïntegreerde warmtecapaciteiten gebruikt, de relevante smeltwarmtes, en in het geval van fosfor ook de verdampingswarmte en dimerisatiewarmte (fosfor is als  $\text{P}_2$ -gas aanwezig in de reactie)
10. Er worden geen warmteverliezen berekend, maar het model biedt wel de mogelijkheid dit in te voeren.
11. Alle reacties worden als 100% aflopend beschouwd.
12. Het fosforgehalte in ferrofosfor wordt op 15% gefixeerd. Dit kan in het model worden aangepast. Doel is een lager fosforgehalte: de gekozen 15% is afgeleid op basis van de meer gunstige condities bij Spodofos. Het gebruikelijke fosforgehalte in ferrofosfor bij de normale witte fosfor productie bedraagt 22-25%.
13. Het model biedt gelegenheid voor het toevoegen van gips als temperatuurbooster, deze staat bij de huidige exercitie op nul.
14. De inkomende materiaalstroom wordt voorverwarmd tot 600 °C (in het model aanpasbaar).
15. Hieruit volgt de temperatuur van de uittredende producten; er wordt geen rekening gehouden met eventueel in tegenstroom recupereren van deze latente warmte (d.w.z. worst case voor de energiebalans).
16. De gevormde massa's van producten worden berekend evenals de samenstelling van de slak (als samenstellende oxides), het kopergehalte in de ferrofosfor, en het arseengehalte van de gevormde fosfor.

### 3.3.2 RESULTATEN SIMULATIE MASSA- EN ENERGIEBALANS

De resultaten van de thermodynamische simulatie van het Spodofos proces op basis van de eerder beschreven uitgangspunten voor vijf verschillende assen is weergegeven in Tabel 3.

TABEL 3 RESULTAAT THERMODYNAMISCHE BEREKENING VOOR DE MASSA EN ENERGIEBALANS

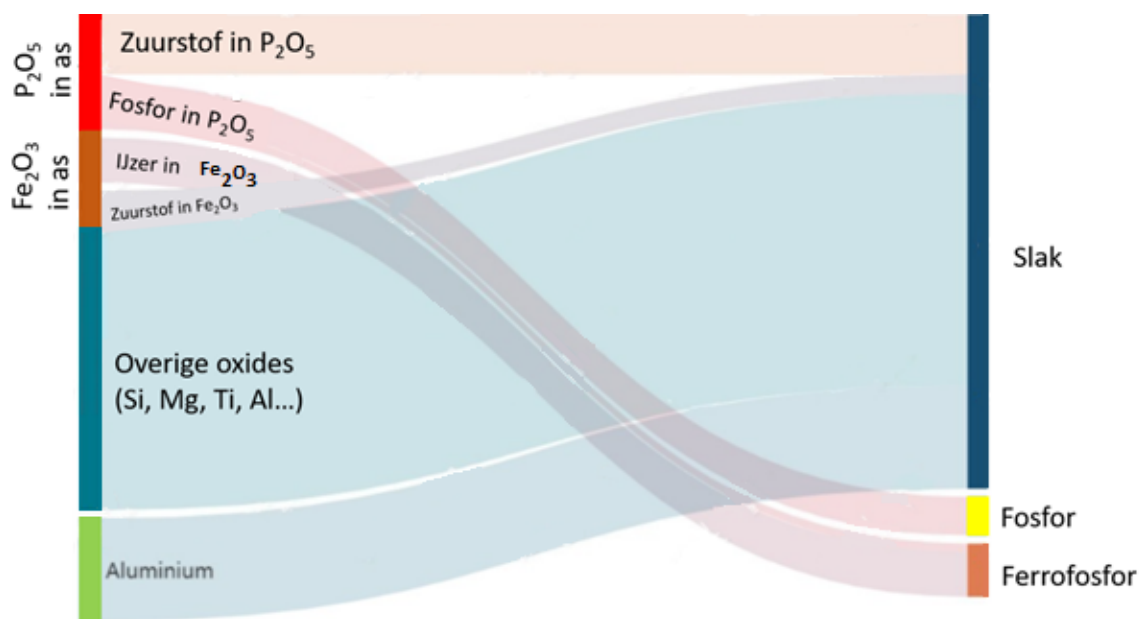
| Assoort                                                  |             | SNB   | HVC   | Mix SNB-HVC | DE top4 | DE alle |
|----------------------------------------------------------|-------------|-------|-------|-------------|---------|---------|
| Slaktemperatuur (sulfaat wordt zwavel)                   | (°C)        | 1.680 | 1.765 | 1.705       | 1.710   | 1.695   |
| Slaktemperatuur (sulfaat wordt $Al_2S_3$ )               | (°C)        | 1.750 | 1.790 | 1.755       | 1.830   | 1.785   |
| Aluminium behoefte per ton as (sulfaat wordt zwavel)     | kg/kg as    | 0,207 | 0,227 | 0,214       | 0,154   | 0,175   |
| Aluminium behoefte per ton as (sulfaat wordt $Al_2S_3$ ) | kg/kg as    | 0,216 | 0,23  | 0,22        | 0,169   | 0,186   |
| Witte fosfor productie                                   | kg/kg as    | 0,075 | 0,096 | 0,083       | 0,03    | 0,045   |
| Slak productie                                           | kg/kg as    | 1,024 | 1,013 | 1,02        | 1,02    | 1,015   |
| Ferrofosfor productie                                    | kg/kg as    | 0,11  | 0,12  | 0,115       | 0,105   | 0,115   |
| Koper in Ferrofosfor $Cu Fe_x P$ %                       | gew%        | 0,8%  | 1,1%  | 0,9%        | 1,6%    | 1,10%   |
| Arseen in witte fosfor                                   | mg/kg $P_4$ | 254   | 580   | 400         | 790     | 485     |
| <b>Slaksamenstelling</b>                                 |             |       |       |             |         |         |
| $Al_2O_3$                                                | gew%        | 47,3% | 48,5% | 47,7%       | 37,6%   | 42,2%   |
| CaO                                                      | gew%        | 19,7% | 13,1% | 17,0%       | 20,4%   | 20,2%   |
| MgO                                                      | gew%        | 4,9%  | 6,9%  | 5,7%        | 3,3%    | 3,4%    |
| $SiO_2$                                                  | gew%        | 21,3% | 24,7% | 22,7%       | 31,7%   | 28,1%   |
| S                                                        | gew%        | 1,6%  | 0,5%  | 1,2%        | 2,5%    | 2,0%    |
| $K_2O$                                                   | gew%        | 2,2%  | 2,9%  | 2,5%        | 1,2%    | 1,4%    |
| $Na_2O$                                                  | gew%        | 1,6%  | 2,7%  | 2,1%        | 2,5%    | 1,9%    |
| $TiO_2$                                                  | gew%        | 1,5%  | 0,7%  | 1,1%        | 0,9%    | 0,7%    |

Het proces blijkt inderdaad sterk exotherm, zoals verwacht. In alle gevallen ligt bovendien de temperatuur van de minerale slak boven het verwachte smeltpunt (1.550 °C). Hiermee is het proces onder de genoemde uitgangspunten in de praktijk uitvoerbaar en is er geen booster-toeslag nodig. Opvallend genoeg is dit ook het geval voor de Duitse assen, waar minder fosfaat in voorkomt en meer zand. Door de aanwezigheid van duidelijk meer sulfaat, dat als een booster werkt, en veel vrij calciumoxide, dat warmte produceert bij de reactie met silica, komt de slaktemperatuur in deze modellering toch hoog genoeg uit.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat de berekende slaktemperatuur enkele tientallen graden varieert al naar gelang welke parameters uit literatuurbronnen worden gebruikt. Zo zijn er verschillende waarden in omloop voor bijvoorbeeld de warmtecapaciteit van diverse oxides (CRC Handbook, NIST, datatabellen Wikipedia). Ook treden geringe warmteverliezen op in de installatie die op dit punt van de verkenning lastig te voorspellen zijn. De geprojecteerde slaktemperaturen hebben typisch een onzekerheid van enkele tientallen graden. Dit heeft geen invloed op de conclusies.

Figuur 2 geeft de massastromen van de Spodofos omzetting weer in de vorm van een Sankey diagram. Dit diagram is gebaseerd op de gewogen gemiddelde assamenstelling van SNB en HVC. De figuur laat zien dat de slakproductie in massa een groot aandeel heeft in de producten.

FIGUUR 2 SANKEY DIAGRAM VOOR DE SPODOFOS OMZETTING VAN AS EN ALUMINIUM NAAR WITTE FOSFOR, FERROFOSFOR EN SLAK (VOOR GEWOGEN GEMIDDELTE SAMENSTELLING AS VAN SNB EN HVC)



### 3.4 PRODUCTEN

#### 3.4.1 WITTE FOSFOR

Uit film- en fotomateriaal van labproeven dat door ThermusP is aangeleverd kan met grote waarschijnlijkheid worden geconcludeerd dat er witte fosfor is gevormd. Dit blijkt uit het direct heftig ontbranden van het reactieproduct na blootstelling aan lucht; er treedt tegelijk een karakteristieke, sterke vorming op van witte rook. Ook de beschreven roodbruine aanslagen in apparatuur waar het productgas doorheen is gevoerd zijn een duidelijke aanwijzing; deze zijn door de auteur van dit rapport veelvuldig waargenomen bij laboratoriumexperimenten met witte fosfor in laboratoriumbuisovens. Het betreft fosforsuboxides die onvermijdelijk op deze schaal ontstaan door intrede van enige zuurstof.

Arseen zal naar verwachting integraal in de fosfor belanden. Zuiveringsslibassen bevatten relatief veel arseen t.o.v. fosfaaterts, zeker in verhouding tot het fosfaatgehalte. Dit komt onder andere door de samenstelling van het grondwater in het beheersgebied van de rioolwaterzuivering. De fosfor bevat voor vier van de vijf askwaliteiten meer arseen dan de arseenrijkste fosfor die in de markt verkrijgbaar is (Kazachse fosfor, 230 mg As/kg). Dit beperkt de toepassingsmogelijkheden voor enkele derivaten, maar is niet ernstig.

Het gehalte organische (teer)bestanddelen in fosfor is relevant voor de toepassing in een aantal derivaten (producten), met name sulfides. Er wordt niet verwacht dat dit een punt van zorg zal zijn in het Spodofosproces, maar het dient wel éénmalig te worden vastgesteld. Zuiveringsslibas bevat tot 1% onverbrand materiaal waarvan niet direct duidelijk is of dit totaal carboniseert en in de slak belandt, dan wel CO vormt en een geringe rol in de reductiereactie speelt en of eventueel gevormde teerachtige bestanddelen belanden in de fosfor de kwaliteit daarvan nadelig beïnvloeden.

### 3.4.2 FERROFOSFOR

Ferrofosfor is een bijproduct van de reguliere fosforindustrie. Er is een beperkte markt voor in Europa, die momenteel vanuit China en Kazachstan bediend wordt. Het fosforgehalte dient 22-26% te zijn, daarnaast is een wens dat het siliciumgehalte <5% is. Indien dit hoger is, is de waarde geringer. Sowieso is de waarde van ferrofosfor niet hoog, en verlies van  $P_4$  naar ferrofosfor heeft een duidelijke invloed op de economie van het proces. Marktverkenningen geven aan dat ferrofosfor met <22% fosfor slecht verkoopbaar is, ook niet tegen lagere prijzen (in een toch al door aanbod beheerste markt). Aan de andere kant is maximale opbrengst aan witte fosfor een hoofddoel van dit project, waarbij het gehalte P in ferrofosfor juist omlaag dient te worden gebracht – er is immers ruimschoots ijzer aanwezig in de as, waarbij zoveel mogelijk moet worden voorkomen dat eenmaal gevormd fosfor daarin terecht komt. Hiermee is een hoofddoel van het project geïdentificeerd: er moet worden gepoogd om goeddeels fosforvrij ijzer te produceren, dat niet in de beperkte ferrofosformarkt moet worden verkocht. Het maximale fosforgehalte is nader te bepalen. ThermusP geeft aan dat de temperatuur van de ijzerslak hier een belangrijke sturende rol in speelt en dat deze met bijvoorbeeld de toevoeging van boosters zoals gips te sturen is.

Van koper wordt voorspeld dat dit volledig naar de ferrofosfor zal gaan. Bij de vigerende kopergehalten in de as (900-1.700 mg/kg as) zal de ferrofosfor rond 1,0 – 1,2% koper bevatten. Dit zal het marktpotentiaal beïnvloeden. Er zijn geen specificaties voor koper in ferrofosfor, omdat er gewoonlijk <0,1% in voorkomt, echter, de staalindustrie die het product inzet geeft aan dat koper een bezwaar is vanaf bepaalde hoeveelheden (informatiestand 2012, destijds niet gekwantificeerd). Dit is een aandachtspunt voor het project.

### 3.4.3 SLAKKEN

De verkregen slak is een aluminiumrijk mineraal, wat over het algemeen door experts op het gebied van cement en bouwstoffen als een positief aspect wordt beoordeeld voor wat toepasbaarheid en waarde betreft. De samenstelling ligt dicht bij grondstoffen voor vuurvast beton en keramiek (chamotte). Het maximaal valoriseren van de slak is een hoofddoel van het project. Omdat qua massa de slak verreweg het grootste product is van het proces heeft dit sterke invloed op de rentabiliteit.

Om deze reden is het interessant om te onderzoeken in wat voor kwaliteit de verkregen as heeft en hoe bijvoorbeeld de uitloogbaarheid van zware metalen zich verhoudt tot de oorspronkelijke kwaliteit van de slibverbrandingsas. Omdat de as in het Spodofos proces volledig gesmolten wordt zijn er overeenkomsten met het verglazen van slibverbrandingsas. Van deze techniek is bekend dat het leidt tot immobilisatie van de zware metalen.

#### 3.4.3.1 VERGLAASDE AS VERSUS SLAK VAN SPODOFOS

Het verglazen van (assen van) zuiveringsslib was begin jaren 90 actueel. Op dat moment was de slibverwerking nog in de groeifase. De nadruk lag met name op de verwerkingsprijs, minder op de uitloogkwaliteit. De stukken van een symposium uit 1992 leveren veel informatie over deze materie. Latere en additionele referenties zijn ondertussen beschikbaar. Deze informatie en de huidige kennis van het Spodofosproces zijn de basis voor deze paragraaf.

De voorhanden literatuur behandelt de kwaliteit van verglaasde as. Vermeld wordt dat dit steeds gaat om een samenstelling die vrijwel onveranderd is t.o.v. de as vóór verglazing; alleen enkele meer vluchtige componenten (chloriden, zink etc.) zullen (gedeeltelijk) uit de matrix ontsnappen. Teneinde het energieverbruik te beperken zal de temperatuur niet



hoger moeten zijn dan waarbij de smelt goed vloeibaar is. Vergaande “destillatie” is dan niet aan de orde.

Bij het Spodofos proces worden sulfaten, fosfaten en ijzer gereduceerd waarbij het gehalte aluminiumoxide sterk toeneemt. Zwavel, fosfor en ijzer worden aan de slak onttrokken (zwavel als onderdeel van een mineraal). Er zijn dan nog slechts vier hoofdcomponenten aanwezig. Tabel 4 vergelijkt de samenstelling van de uitgangsas met de Spodofos as. Hierbij is aangenomen dat er geen hoofdbestanddelen vervluchtigen.

**TABEL 4** VERGELIJKING SAMENSTELLING (VERGLAASDE) AS IN VERGELIJKING MET DE SLAK VAN DEZE AS NA HET SPODOFOS PROCES

|                                | (Verglaasde) slibverbrandingsas | Slak Spodofos |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------|
| <b>Hoofdbestanddelen</b>       |                                 |               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6,8%                            | 45,8%         |
| CaO                            | 16,4%                           | 16,0%         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,9%                           | 14,6%         |
| MgO                            | 4,2%                            | 5,4%          |
| SiO <sub>2</sub>               | 21,9%                           | 20,4%         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 22,9%                           | 0 %           |
| SO <sub>3</sub>                | 2,8%                            | 0 %           |
| Rest <sup>1)</sup>             | 11,1%                           | 12,5%         |
| Smelttemp.                     | Ca. 1.350°C                     | 1.590°C       |

1) Rest is: K<sub>2</sub>O en Na<sub>2</sub>O beide ca 2,5%, TiO<sub>2</sub> 1,1% en overig 5,5%

### 3.4.3.2 STOORSTOFFEN

De belangrijkste stoffen zijn de zeven zware metalen en arseen, hier kortweg: de zware metalen. Kwik is na verbranding van slib vrijwel niet meer in de as aanwezig. PFAO's, indien aanwezig, zullen bij verglazing en zeker in het Spodofosproces onschadelijk worden gemaakt (>1.100 °C, [van Houten 2019]) Naast de hoofdcomponenten zijn ook de stoffen niet direct vergelijkbaar.

De zware metalen worden bij verglazing niet verwijderd, hooguit dat er enige vervluchtiging plaatsvindt. Bij Spodofos zijn er drie productstromen (damp (fosfor), slak, metaal (ferrofosfor)) die elk een outlet voor de al of niet met aluminium gereageerde stoffen vormen (Tabel 5):

**TABEL 5** LOT VAN STOORSTOFFEN IN HET SPODOFOS PROCES

| Stoffen | Lot in Spodofos                     | Verwachte route Spodofos |
|---------|-------------------------------------|--------------------------|
| Arseen  | Reductie en verdamping              | damp                     |
| Koper   | Reductie                            | metaal                   |
| Zink    | Gedeeltelijke vervlieging als oxide | slak / damp              |
| Lood    | Reductie, gedeeltelijke vervlieging | slak / damp              |
| Cadmium | Reductie, gedeeltelijke vervlieging | metaal en damp           |
| Chroom  | Blijft als oxide                    | slak                     |
| Nikkel  | Reductie                            | metaal                   |
| Kwik    | Vrijwel niet aanwezig in as         | n.v.t.                   |

De weg van een stof is niet 100% naar één van de fasen. De mate waarin de stoffen zich verdelen over de fasen is beschreven in [Wang 2005] waarbij overigens geen fosfor wordt teruggewonnen en de metaalfase aanzienlijk kleiner is. Tabel 6 geeft ter indicatie de globale verdelingen met de volgende kanttekeningen:

- de verdelingen zijn gebaseerd op een aluminothermische reactie met huishoudelijk afvalvlieggas [Wang 2005];
- voor kwik en arseen geeft de referentie geen data;
- de reactiecondities voor Spodofos zijn niet 100% vergelijkbaar met de gebruikte referentie;
- er is niet steeds een sluitende balans kunnen maken.

In het algemeen zullen de concentraties stoorstoffen in de Spodofosslak lager zijn dan in het geval van verglaasde as. Er wordt namelijk ca 1 kg slak per kg as geproduceerd. Dit is gunstig voor een mindere uitloging.

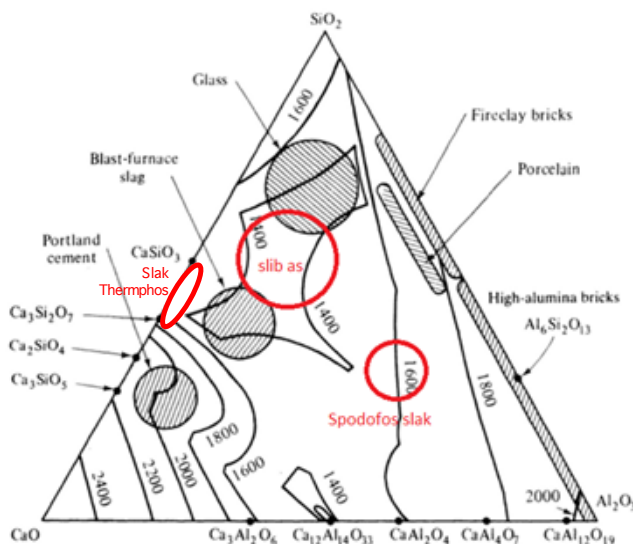
TABEL 6 GLOBALE VERDELING VAN DE STOORSTOFFEN OVER DE SPODOFOS PRODUCTEN

| Globale verdeling in % | Slak | Metaal | Vlieggas | Gas |
|------------------------|------|--------|----------|-----|
| <b>Stoorstoffen</b>    |      |        |          |     |
| Koper                  | 35   | 30     | 25       | 0   |
| Zink                   | 12   | 0      | 70       | 8   |
| Lood                   | 3    | 1      | 70       | 12  |
| Cadmium                | 20   | 0      | 2        | 78  |
| Chroom                 | 50   | 50     | 0        | 0   |
| Nikkel                 | 45   | 30     | 0        | 0   |

### 3.4.3.3 TOEPASSINGEN

Vanwege de vele componenten in de verglaasde as en in mindere mate ook in de slak, is een positionering ten opzichte van andere bouwstoffen lastig. Veelal wordt het ternaire diagram  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  gebruikt (Figuur 3). De verglaasde slibas bevindt zich in de buurt van hoogovenslak en glasachtige materialen. Ter vergelijking is ook de Thermphos slak aangegeven. De Spodofosslak is een buitenbeentje en ligt geïsoleerd ten opzichte van de meeste slakken.

FIGUUR 3 TERNAIR DIAGRAM MET DAARIN EEN VERGELIJKING VAN DE SAMENSTELLING VAN SLIBVERBRANDINGAS, SPODOFOS SLAK EN THERMPHOS SLAK



Verglaasde as heeft vanwege het aanwezige ijzeroxide een rode kleur en meer bulkcomponenten dan slak van Spodofos. De toepassing als granulaatbouwstof ligt voor de hand.

De slak die ontstond bij het klassieke fosforproces bij Thermphos bestond uit calciumsiliicaat ( $\text{CaSiO}_3$ , pseudowollastoniet) en cuspidien ( $\text{Ca}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{F}_2$ ). Slak van Spodofos heeft

een hoog gehalte aluminiumoxide en laat zich met vrijwel geen andere slak vergelijken. Hierdoor kunnen extra (niche) toepassingen mogelijk worden, bv als aluminacement, een waardevol additief in de cementfabricage, of vanwege het hogere smeltpunt als grondstof voor refractory-materiaal (vuurvaste steen). Alumina (aluminiumoxide) is samen met silica (silicium oxide) verantwoordelijk voor glas-netwerkvorming [3c]

#### 3.4.3.4 UITLOOGKWALITEIT

Een interessante referentie voor uitlooggedrag van verglaasde slibverbrandingsas zijn de stukken van een symposium over verglazen van zuiveringsslib in Den Bosch in 1992 [3]. Tabel 7 geeft een overzicht van de bijdragen bij dit symposium en de conclusies die de sprekers trekken over de uitloogbaarheid van verglaasd zuiveringsslib.

**TABEL 7** OVERZICHT SPREKERS, BIJDRAGEN EN CONCLUSIES VAN SPREKERS BIJ EEN SYMPOSIUM OVER VERGLAZEN VAN ZUIVERINGSSLIB IN DEN BOSCH IN 1992

| Bron                              | Titel bijdrage                                                                    | Conclusie spreker                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V.d. Sloom, ECN,                  | Uitlooggedrag van residuen van verglazingsprocessen                               | “De uitloogeigenschappen van de verkregen slak zullen naar verwachting milieu hygiënisch aanvaardbaar zijn.”                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Schouten                          | Mineralogische eigenschappen en mogelijk nuttige toepassingen van verglaasd slib  | Er wordt een obsidiaangelijkend materiaal verkregen (obsidiaan: vulkanisch glasachtig materiaal). “Behalve dus een enorme volumereductie van het materiaal (van slib naar slak) heeft verglazing dus tevens een product tot gevolg dat vele nuttige toepassingen kent. Verder wordt de mobiliteit van de zware metalen ten opzichte van het oorspronkelijke materiaalsterk gereduceerd – belangrijk i.v.m. stortreguleringen en toepassingen.”                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Bijen, TU Delft/Intron            | Application of vitrification techniques for hazardous waste immobilisation        | “The extent of crystallinity of a material influences its performance, including its leaching behaviour. Many elements and compounds, including potentially toxic ones, are in general immobilized in a superior manner within a fully glassy matrix compared to a glass matrix with many crystalline components. On the other hand ‘crystalline’ glasses can show better mechanical properties.....Vitrification process may be applied for the processing of a wide variety of waste materials. The final product has to fulfil both technical as well as environmental standards. However, on the basis of current research it seems likely that these standards do not provide any problem.” |
| Minami, Tsukishima Kikai Co. Ltd, | Vortex melting and crystallization process                                        | heavy metals contained in the sludge are sealed and do not leach out”.<br>De uitloogwaarden lijken onder de detectielimiet te liggen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| J. Rizzon, KSMF,                  | Melting treatment of Sewage Sludges and residues Employing the KSMF-Process of ML | “By converting sewage sludges or residues into molten slags with the KSMF-Process, most of the inert material has a low leachability. A stable and solid product is produced, which can be recycled and used as aggregates for construction works.”                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| J. Rizzon                         | Verglasung von Klaerschlam nach dem Corminverfahren                               | „Als Kriterien zu Beurteilung der Werte wurden die Richtwerte der Deponieklasse 1 unter Trinkwasserverordnung TV0 herangezogen. Daraus ergeben sich sehr geringe Auslaugraten der beiden CORMIN schlacken.... Dies gilt insbesondere für die Schwermetallkonzentrationen, die entweder unter der Nachweisgrenze liegen oder sie gerade erreichen. Die Inhaltstoffe in den Eluatn liegen deutlich unter den TV0-Grenzwerten.                                                                                                                                                                                                                                                                      |

In onderzoek door ECN in 2006 is versmelting van diverse biomassa-reststromen (waaronder zuiveringsslib) getest. Voor de uitloogbaarheid worden “geen problemen verwacht” (hoewel niet gemeten). Onderscheid moet gemaakt worden tussen verglaasd (snelle afkoeling) of gekristalliseerd (langzame afkoeling) slak. “Steenachtige of basaltachtige slakken (gekristalliseerd) zullen zeker niet beter uitloogbaar zijn.”

Met de resultaten van enkele (andere, niet vermelde) uitloogtests wordt vermeld dat:

- na eenvoudige thermische behandeling van een vliegasslak (kolencentrale) de probleem-elementen zijn geïmmobiliseerd,

- na toevoeging van 10% aluminiumoxide, vormgegeven slakken v.w.b. de probleemstoffen, ruimschoots voldoen aan de (toen geldende) criteria en derhalve zonder restricties toepasbaar zijn, ook in voortdurend contact met water (het aluminiumgehalte is richting Spodofos slak).

“Het ligt geheel in de verwachting dat alle smelten in het onderzoek (ook zuiveringsslib) eveneens aan de strengste criteria voor het bouwstoffenbesluit voldoen.”

Een ander relevant vergelijk is de afzetbaarheid van Thermphos slak, hoewel de samenstelling anders is dan voor Spodofos-slak (Figuur 3). Voor de Thermphos slak waren er twee kwaliteitspunten die voortdurend aandacht verdienen:

- radioactiviteit, door het voorkomen van natuurlijk uranium en dochterisotopen in fosfaaterts, wat d.m.v. het grondstofinkoopbeleid werd bijgestuurd,
- fluoride-uitloging, deze was als enige uitloogparameter van tijd tot tijd dicht bij de toegelaten bovengrens. Fluoride zat in de slak als cuspidien en was afkomstig uit fluoroapatietertsen.

Beide kwaliteitspunten zullen niet spelen voor Spodofos-as vanwege de andere herkomst. De slak was destijds goedgekeurd als bouwstof onder Komo-certificaat op basis van BRL 9304. Dit is een stap verder dan het doen van partijkeringen voor toepassing als niet-vormgegeven bouwstof. De slak voldeed structureel aan een reeks uitlogingseisen voor toepassing in het vrije veld, zoals vastgesteld d.m.v. de daartoe voorgeschreven tests (kolomproeven), waardoor dit certificaat werd uitgegeven en niet iedere partij apart hoefde te worden gekeurd. Er hoorde wel een regulier testprogramma bij om aan te tonen dat structureel aan de eisen van het certificaat werd voldaan.

### 3.4.3.5 CONCLUSIES

Uit alle referenties blijkt dat slakken van zuiveringsslib een zeer geringe uitloogbaarheid vertonen die destijds toepassingen als constructiemateriaal niet in de weg stonden. De manier van verslakken (glasachtig/kristallijn) is kennelijk van weinig invloed. Er is hier echter niet gekeken naar veranderde (strengere) regelgeving.

De slak van Spodofos is afwijkend t.o.v. die van niet-gereduceerd as en ook van Thermphos slak, met name door het hoge aluminagehalte en de afwezigheid van sulfaten en fosfaten. Ook de verschillende routes voor de stoffen (slak, metaal, gas) dragen zorg voor een ‘voorscheiding’. Hierdoor kunnen verschillen ontstaan. Er zijn aanwijzingen die erop duiden dat de effecten niet negatief zijn.

In vergelijking met de Thermphos slak zijn radioactiviteit en fluoride uitloging geen aandachtspunten voor Spodofos-slak. Meer in het algemeen kan gesteld worden dat smelten en verglazingsprocessen de uitloging van minerale fasen zeer sterk terugbrengen; deze ervaring is bijvoorbeeld ook met huisvuilbodemas opgedaan. De verwachting is dan ook dat de Spodofos-slak ruimschoots zal voldoen aan de uitloogeisen voor toepassing als niet-vormgegeven bouwstof.

Bij het verder ontwikkelen van het Spodofos proces zal de slakkwaliteit en de daarmee samenhangende toepassingsmogelijkheden een belangrijk aandachtspunt zijn.

#### 3.4.4 OVERIGE AANDACHTPUNTEN

Het lot van zwavel in het proces is niet duidelijk. Naast de as is de beoogde booster gips een bron van zwavel. Dat deze gereduceerd wordt is evident, echter of dit stopt bij elementaire zwavel, of leidt tot de vorming van sulfides, is niet duidelijk. In het eerste geval wordt de zwavel ingevangen in de gestolde slak en zal zich daar inert gedragen; bij de vorming van sulfides in significante hoeveelheden, die waarschijnlijk microkristallijn in de slak terecht komen, kan de vorming van zwavelwaterstof met vochtige lucht een probleem zijn bij toepassing. Het lot van zwavel in het proces vormt een volgende hoofdpoging voor het onderzoek.

Tenslotte is een niet geheel verwaarloosbaar aspect de aanwezigheid van zink, lood, kalium en natrium, die – zeker de eerste twee na reductie – de neiging hebben te vervluchtigen. Dit geldt in versterkte mate bij de inzet van vleesbeendermeel, waar tot 20% vluchtige sulfaten en chlorides in voorkomen. Of dit leidt tot stofvorming aan de productzijde, of opbouw van scaling in de reactor en afgasleiding, dient te worden bestudeerd. Dit kan denkbaar pas worden vastgesteld na meerdere weken piloten.

### 3.5 TECHNOLOGIE EN APPARATUUR

#### 3.5.1 INLEIDING

In dit deel van de verkenning is het proces beoordeeld op praktische haalbaarheid en zijn een aantal kernpunten geïdentificeerd die specifiek een aandachtspunt vormen voor de praktische realisatie van het proces.

#### 3.5.2 ALGEMENE BESCHOUWING

Hoewel het doel van deze verkenning niet een gedetailleerde pre-engineering van de belangrijkste processtappen is, is er wel behoefte aan een voorverkenning van de belangrijkste punten in het proces die niet met een standaardapparaat of -technologie kunnen worden geadresseerd.

De volgende processtappen zijn geïdentificeerd:

1. Opslag van grondstoffen
2. Dosering/weging naar invoer van de reactor
3. Toeslag van gips (optioneel)
4. Voorverhitting tot bv 600 °C
5. Dosering van aluminium in de ingaande stroom (te bepalen: voor of na verhitting)
6. Dosering van het reactiemengsel in de reactor
7. Opstarten en in stand houden van de thermietreactie in een daartoe geëigend apparaat
8. Onttrekken van een gasstroom fosfor (P<sub>2</sub>, daarna P<sub>4</sub>) uit de reactor
9. Condensatie van de fosfor incl. een lichte reinigungsstap (stof)
10. Onttrekken van vloeibare ferrofosfor en minerale slak uit de reactor zonder fosfordamp te laten ontsnappen
11. Scheiding van ferrofosfor en slak (vloeibaar)
12. Stollen van slak
13. Stollen van ferrofosfor
14. Nabewerkingen op slak en ferrofosfor, zoals malen en breken

De onderstreepte processtappen zijn geïdentificeerd als niet-standaard; de vetgedrukte stappen zijn naast niet-standaard ingeschaald als technologisch uitdagend. Dit wil geenszins

zeggen dat het proces niet praktisch haalbaar zou zijn, maar het geeft richting aan waar de nadruk van de ontwikkeling moet liggen en met welk soort kennisinstellingen of technologieleveranciers moet worden samengewerkt.

Een korte toelichting op deze classificering is hieronder gegeven.

Ad 6 en 8) doseertechnieken in thermische processen zijn in principe standaard beschikbaar, maar de uitdaging bij het Spodofos proces ligt hem in het doseren van een fijn poederig materiaal in een uit pyrofoor fosforgas bestaande atmosfeer, in een reactiehaard die door warmtestraling een sterke impact zal hebben op het doseerpunt en de afdichting daarvan. Dit hangt samen met het onttrekken van de fosforstroom aan de reactor; er moet worden voorkomen dat de inkomende as met de productstroom wordt weggevoerd. Een standaardoplossing in fosfortechnologie is het vooraf granuleren of briketteren van het poeder, waartussen de ontsnappende productgassen hun weg naar de ovenuitgang vinden. Dit is echter gecompliceerd en duur. Het in de ruimte scheiden van in- en uitvoer kan een oplossing zijn – de fosforgasstroom wordt onttrokken op een punt waar alle poeder reeds gesmolten is. Daarnaast is het de vraag of het ontstaan van fosfordamp (in feite druk) een voldoende drijvende kracht heeft om het gas effectief uit de reactor te krijgen. Een aanzuigende werking van condensatie kan helpen, evenals het toevoegen van een inert draaggas. Ook moet er worden gezocht naar een geschikte filtratie om onvermijdelijk toch meegevoerd stof te verwijderen uit de fosforstroom (gas of vloeistof). Dit hangt dan weer samen met de keus om de fosfor droog of nat (d.w.z. met intern water) te condenseren.

Ad 7) de vormgeving van een reactor die qua geometrie en constructiemateriaal langdurig bestand is tegen de thermietreactie is ongetwijfeld de grootste uitdaging van het project. Zo is het effectief inkapselen van de reactiehaard noodzakelijk, waarbij de materiaalkeuze van de wand en bodem allesbehalve triviaal is. De ontwerpkeuzes zijn o.a. wel of geen wandbescherming met freezelining door slak (met gevolgen voor de energiebalans); grootte en vorm van de reactiehaard; positionering van in- en uitvoer 6/8); opvang van slak en ferrofosfor (zie ook onder 10). Het valt te verwachten dat deze korte lijst uitgebreider wordt naarmate er meer conceptueel werk op dit punt is verricht.

Ad 10) slak en ferrofosfor/ijzer dienen apart te worden getapt. Er zal denkelijk een reactordeel komen waar deze twee stromen boven elkaar staan en op verschillende hoogtes worden getapt. Materiaalkeuze en vormgeving van de tapgaten is niet direct evident, hoewel ervaring wel voorhanden is.

## 3.6 DOORONTWIKKELING SPODOFOS

### 3.6.1 INLEIDING

Het Spodofos concept bevindt zich in een vroeg stadium van ontwikkeling. De reden hiervan is, omdat een degelijke testomgeving en -installatie noodzakelijk zijn teneinde de extreme procescondities te kunnen bereiken waarbij de veiligheid gegarandeerd is. Tot nu toe is:

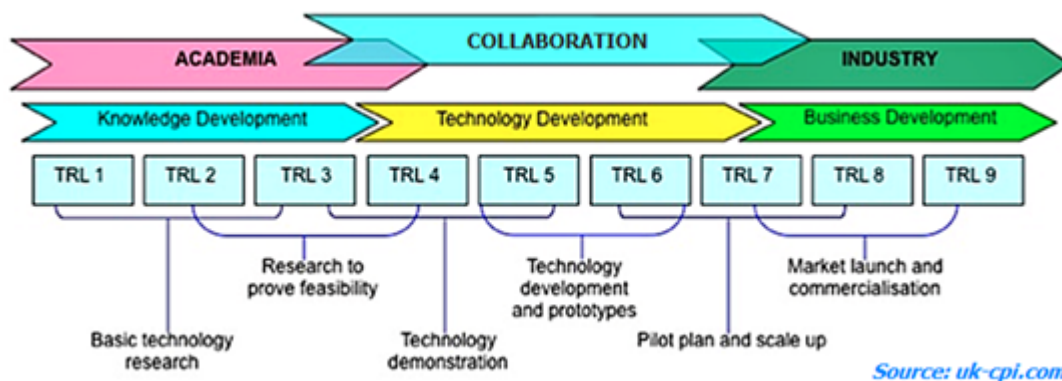
- het proof of concept geleverd,
- het proces verregaand doorgerekend en van veel zijden belicht,
- de haalbaarheid op de belangrijkste punten met het onderhavige project in kaart gebracht.

Met deze “voorbereidende werkzaamheden” kan de verdere ontwikkeling worden gerechtvaardigd. Dit rapport geeft het voorziene ontwikkelingstraject, met name tot en met de pilot-fase.

Om ook direct een doorkijk te hebben naar een operationele full-scale installatie is ook hiervan het realisatietraject omschreven.

De TRL-systematiek voor procesontwikkeling wordt hier aangehouden. De huidige stand is TRL3.

FIGUUR 4 OVERZICHT TRL STADIA



TABEL 8 OVERZICHT HUIDIG TRL NIVEAU SPODOFOS

| TRL | Stand van ontwikkeling                     | Spodofos |
|-----|--------------------------------------------|----------|
| 1   | Basis idee uitgewerkt                      | ✓        |
| 2   | Concept ontwikkeld, haalbaarheid getoetst  | ✓        |
| 3   | Experimenteel proof of concept             | ✓        |
| 4   | Functionele validatie in lab, prototypes   |          |
| 5   | Technologie validatie                      |          |
| 6   | Technologie demonstratie, pilot            |          |
| 7   | Systeem demonstratie in relevante omgeving |          |
| 8   | Eerste commerciële toepassing              |          |
| 9   | Technologie commercieel beschikbaar        |          |

### 3.6.2 TECHNOLOGIEONTWIKKELING

Het Spodofos proces kenmerkt zich door twee specifieke processtappen: de RMC (reaction mixture conditioning) unit en de reactor. Alle overige componenten in de (voorziene) procesvoering is bestaande techniek.

Hiermee is de ontwikkeling voor TRL 4 en 5 overzichtelijk in te delen:

- Ontwikkeling RMC-unit voor pilot
- Ontwikkeling reactie/reactor in (semi) batchbedrijf, in te zetten in pilot in continubedrijf

En in TRL 6 vindt derhalve de integratie van de tot dusver ontwikkelde RMC-unit en reactor plaats en de overgang naar continu bedrijf. De ontwikkeling naar TRL 6 heeft dan de kenmerken:

TABEL 9 GESCHATTE ONTWIKKELDUREN VOOR VERSCHILLENDE FASEN IN DE ONTWIKKELING

| TRL | duur   | RMC-unit                                                                                                                                                                                                                       | Reactor                                                                                                                    |
|-----|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4   | 6 mnd  | Lab-opstelling voor veiligheidstesten en kwaliteitstesten<br>mengsel,<br>0,5 kg batch                                                                                                                                          | Lab-opstelling voor proceskarakterisering,<br>0,3 kg semi continu;<br>Reactieduur ca. 30 sec                               |
| 5   | 6 mnd  | Schaalvergroting → Pilot RMC;<br>100 kg/h in meerder batches<br>Ontwikkeling doseersilo.                                                                                                                                       | Lab-opstelling voor schaalvergroting en eerste<br>producttesten (slak!)<br>100 kg/h semi continu;<br>Reactieduur ca. 5 min |
| 6   | 1 jaar | Pilot: Technische opstelling samengesteld door<br>integratie van RMC + doseerbuffer (TRL5) en reactor (TRL5)<br>met productuitloop tijdens bedrijf.<br>Capaciteit 100 kg/h continu<br>Reactieduur uitbouwen naar 4 uur of meer |                                                                                                                            |

De vermelde doorlooptijden betreffen het praktische en experimentele werk. Dus niet de tijd voor financieren, organiseren en vergunningsaanvragen die daaraan voorafgaat. Dit schema is in de volgende paragrafen uitgewerkt. De verdere ontwikkeling, TRL 7 en verder, is erg afhankelijk van deze eerste drie stappen en kan slechts globaal worden beschreven.

### 3.6.2.1 RMC-UNIT

De RMC-unit is een mechanisch apparaat: het dispergeren is een fysisch proces. Door de temperatuur van de ingrediënten as en schroot te veranderen, mogelijk tot het smeltpunt van aluminium, is het aannemelijk dat het gewenste effect bereikt kan worden: deeltjesgrootte en homogeniteit. Een relatief eenvoudig te beantwoorden onderzoeksvraag betreft de veiligheid van het proces: wat is de temperatuurmarge en wat zijn de te vermijden condities om (voortijdige) ontsteking van het mengsel te voorkomen?

Daarom gaat het ook hier vooral om een praktische, applicatiegerichte ontwikkeling: een mengapparaat dat op hoge temperatuur bedreven kan worden.

#### TRL 4

De dispergering van aluminium in as dient veilig te verlopen en een reproduceerbaar kwalitatief goed resultaat te leveren.

- De veiligheid kan worden bepaald en geëvalueerd met de temperatuurmarge tot zelfontsteking en de ontstekingsgevoeligheid bij inbreng van mechanisch energie. Dit kan getest worden op de as maar ook alleen op de meest reactieve componenten in de as, nl ijzer-oxide, zodat de kleinste marge bekend wordt.
- Een kwalitatief goed reactiemengsel kenmerkt zich door homogeniteit en een voldoende kleine deeltjesgrootte. Ontsteking en volledig aflopende reactie zijn de resulterende criteria.
- Het verouderingsgedrag van het reactiemengsel wordt bepaald: de aluminothermische reactie loopt al (zeer) langzaam bij de temperatuur van dispergeren en bufferen (600 °C), ten koste van de exothermie in de reactor. Dit effect wordt in kaart gebracht.

Deze drie onderzoeksvragen dienen te worden beantwoord d.m.v. praktijktesten met o.a. een lab-dispergeerder met batches van ca 0,5 kg.

De resultaten moeten leiden tot een ontwerp van een grotere RMC-unit voor de volgende TRL. Bij dit ontwerp zal een onderzoek naar potentiële slijtvaste materialen en leveranciers daarvan, onderdeel uitmaken.



## TRL 5

De grotere en geautomatiseerde RMC-unit wordt gebouwd, getest op veiligheid, kwaliteit van het verkregen mengsel en capaciteit. Duurtesten zullen het slijtagegedrag laten zien, dat evt. moet worden bijgesteld met andere materialen.

Een doseersilo en tussenliggende afsluiters/sluizen worden geengineerd, klaar voor fabricage. Op dit moment wordt verwacht dat de doseersilo veel op de RMC-unit lijkt maar niet dispergeert, alleen mengt. Mogelijke ontwerpproblemen voor de doseersilo zijn met de RMC-unit dan al grotendeels opgelost. De RMC-unit is hiermee gereed voor pilot bedrijf (TRL 6).

### 3.6.2.2 REACTOR

Aluminothermie is in de metallurgische industrie een bekende technologie. Er zijn voorbeelden van semi-continue applicaties, waarbij de reactor gevoed wordt met een aluminothermisch mengsel totdat de reactor vol is met product en slak. De Spodofosreactor heeft echter een specifiek kenmerk, nl. dat er een gas (fosfor) wordt ontwikkeld (overigens wordt bij bepaalde aluminothermische reacties – raketaandrijvingen- juist zoveel mogelijk gas geproduceerd). Ook het uiteindelijke oogmerk om lange reactietijden (maanden) te maken waarbij de vloeibare producten periodiek of continu uit de reactor moeten worden afgelaten, is minder bekend. E.e.a. houdt in dat de ontwikkeling niet fundamenteel maar toegepast van aard is. Enkele onderzoeksvragen met betrekking tot het chemische proces dienen wel beantwoord te worden teneinde het proces goed te begrijpen en te kunnen beheersen.

## TRL 4

Het hoofddoel is hier om de reactie en de producten onder optimale omstandigheden te kunnen karakteriseren. Hiermee wordt vervolgens de reactor voor TRL 5 ontworpen.

De testopstelling zal staan in een hittebestendig compartiment (tegen uittreding van alle producten) met ventilatie. Reactiegassen worden afgezogen naar een natte wassing met bleekloog als oxidator van de fosfor. De opstelling zal eerst uitgebreid op veiligheid worden getest voordat reactieproeven zullen plaatsvinden.

De proefnemingen zullen plaatsvinden in een inductief voorverhitte reactor waarbij een hoeveelheid reactiemengsel gelijkmatig wordt gedoseerd. Het warmteverlies van de reactie is dan geminimaliseerd (geen warmteverlies is “adiabatisch”) en het fosforrendement is dan maximaal. Het reactorvat (commercieel verkrijgbare kroes) gaat verloren na afkoeling en stolling van de producten.

Aluminium wordt in poedervorm aan de as toegevoegd. Het voorverhitte mengsel wordt met een bepaalde doseersnelheid in de reactor gebracht.

Nadat de werkwijze voor een zelfonderhoudende en volledige reactie is vastgesteld, zal worden bepaald:

- de reactiesnelheid afhankelijk van de condities en samenstelling as. De reactiesnelheid kan worden uitgedrukt als de snelheid van het reactiefront door het reactiemengsel (normaal enkele cm/sec). Deze snelheid bepaalt de dimensionering van de reactor;;
- een (eerste) fosforrendement;
- de partitionering (de verdeling over de producten gas, vlieggas, slak en ferrofosfor) van zware metalen, chloride, zwavel/sulfide etc.

Afhankelijk van de hoeveelheid producten (slak) kunnen oriënterende proeven worden uitgevoerd voor de mogelijke toepassingen van de slak.

Ook het bereikte fosforgehalte in ferrofosfor zal al dan niet aanleiding zijn voor optimalisatie en bijstelling van de business case.

Met de informatie en ervaring is de ontwikkeling klaar voor opschaling in TRL 5.

#### **TRL 5**

De proefnemingen in TRL 4 worden met langere runs en derhalve meer reactiemengsel uitgevoerd. Doelstelling is de reactor te bedienen op 100 kg/h gedurende enkele minuten. Hiermee wordt een tussenstap gezet voor de pilot in TRL 6. De grotere reactor zal hier op dezelfde wijze worden getest als in TRL 4 en de metingen worden verfijnd.

Ook zullen de producten beter getest kunnen worden op kwaliteit en toepassing, met name de mogelijke hoogwaardige toepassingen van de slak.

Daarnaast zullen effecten op de gebruikte reactorvaten voor het eerst onderzocht worden.

#### **3.6.2.3 TRL 6: INTEGRATIE EN PILOT**

De RMC-unit, doseersilo en de reactor, ontworpen of gereed uit TRL 5 worden samengevoegd voor continubedrijf. De reactor dient een vloeibaar productuitloop en een scheidingsvat te krijgen voor slak en ferrofosfor.

De op elkaar aangesloten (gestapelde) apparaten worden van automatisering voorzien. De afgewogen assen en aluminium worden handmatig voorverhit en in de testopstelling gebracht.

De gehele opstelling zal ten opzichte van de voorgaande TRL's sterk veranderen in grootte en van karakter. De fosfor zal in grotere hoeveelheden (kilogrammen) worden opgevangen en de slak en ferrofosfor zullen aan de lucht afkoelen. De locatie waar dit mogelijk is dient in de voorgaande fasen te worden geregeld.

De doelstellingen van deze fase:

- Beheersbaar maken van de procesvoering, incl. opstart en uitschakelen
- Continu maken van de procesvoering → lange runs voor optimalisatie
- Vervuiling, verstopping waarnemen en tegengaan
- Materiaal conditiemonitoring van de reactor etc.
- Opvang van de separate producten → kwaliteits- en toepassingstesten
- Veiligheidsevaluatie

Beoogd wordt een runtijd van 4 uur. Dan kunnen parameters worden bijgestuurd voor optimalisatie van het fosforrendement.

De hoeveelheden geproduceerde slak zullen aanzienlijk zijn waardoor uitgebreide toepassingstesten mogelijk worden.

De opgedane kennis en ervaring zal worden ingebracht in de volgende fasen.

### 3.6.3 DOORKIJK NAAR FIRST-OF-A-KIND INSTALLATIE

Gedurende het verkrijgen van resultaten in TRL 6 komt er zicht op de grootschalige toepassing van het Spodofos proces. Vanaf dat moment zal er gewerkt moeten worden naar een locatie, vergunning, financiering en organisatie van een demonstratie installatie en mogelijk ook een full-scale. Ook een afnemer van de dan te produceren fosfor is mogelijk noodzakelijk, vooralsnog in relatief kleine hoeveelheden.

De TRL 7 demonstratie heeft nu een voorziene capaciteit van 1.000 kg/h. De gehele proceslijn wordt opgebouwd, weliswaar hier en daar suboptimaal waar het o.a. om warmte integratie en -gebruik gaat. De fosforinstallatie wordt compleet gebouwd (evt. al voor de TRL 8).

Deze demo-installatie dient om de negatieve langetermijneffecten te detecteren en te op te lossen. Dit gaat dan onder meer om het ontwerp, de gekozen materialen en de procesvoering. Daarnaast wordt informatie verkregen voor het ontwerp en procesvoering van de eerste full-scale.

Runtijden zijn in de orde van weken, 7x24, waardoor er een (flexibele) organisatie rond de proefnemering aanwezig moet zijn.

De Spodofos procesinstallatie is eenvoudig van aard. Problemen zullen zich ongetwijfeld voordoen maar waarschijnlijk slechts in een beperkt gebied: vanaf RMC-unit tot en met de reactor met productuitgangen. Dit omdat de rest bestaande techniek is. Verwacht mag worden dat de problemen niet onoverkomelijk zijn.

Dit is mede de reden dat de opschaling van de kern van het proces in enkele stappen wordt voorzien:

$$\text{TRL6} : \text{TRL7} : \text{TRL8} = \text{pilot} : \text{demonstratie} : \text{commercieel} = 1 : 10 : 60$$

met in TRL 8 een verwerking van 50.000 ton as/a, conform het ontwerp van de full-scale.

De fosfaatterugwinning is nu sterk in beweging, in Nederland maar met name vanwege de deadline in de Duitse Klärschlammverordnung: verplichte recycling vanaf 2029. De doelstelling om TRL 8 te combineren met een eerste commerciële installatie in Nederland is daarom gewenst en, gezien de beperkte complexiteit van het proces, niet onmogelijk.

Een tijdschema van de gehele ontwikkeling kan slechts indicatief en op basis van inschattingen zijn, uitgaande van weinig tegenslag in de ontwikkeling en weinig vertraging in de voorbereidingen (locaties, organisatie, vergunningen, financiering, bouw).

TABEL 10 TIJDSHEMA EN KOSTEN VERDERE ONTWIKKELING SPODOFOS

| TRL |                                                     | verwachte duur            | Geschatte kosten (k€) |
|-----|-----------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| -   | Regelen locatie + vergunning, engineering TRL 4 + 5 | 3 maanden                 | 300                   |
| 4   | Ontwikkel- en proefprogramma                        | 6 maanden                 |                       |
| 5   | Ontwikkel- en proefprogramma                        | 6 maanden                 | 350                   |
| 6   | Regelen locatie + vergunning, engineering           | parallel TRL5+ 6 maanden  | 650                   |
|     | Bouw, proefprogramma                                | 1 jaar                    |                       |
| 7   | Regelen locatie + vergunning, engineering           | parallel TRL6 + 6 maanden | 6.000                 |
|     | Bouw, proefprogramma, bedrijfsvoering               | 2 jaar                    |                       |
| 8   | Regelen locatie + mer + vergunning, engineering     | parallel TRL7 + 6 maanden | 15.000                |
|     | Bouwtijd, testbedrijf, gereed productie             | 1,5 jaar                  | (zie ook 4.6)         |

De ontwikkelkosten voor de korte termijn bedragen 650 k€ voor het bereiken van TRL 5. Als deze fasen doorlopen zijn is naar schatting nog eens 650 k€ nodig voor het realiseren van een continue pilot installatie (TRL 6).

Als deze stappen succesvolle resultaten opleveren kan een eerste demo installatie gerealiseerd worden (TRL 7). De schaal hiervan is al zodanig dat dit naar verwachting 6.000 k€ kost en dus bijna de helft van de investering voor een eerste commerciële installatie (TRL 8). Een gecombineerde aanpak van beide fasen, bijvoorbeeld op dezelfde locatie, kan wellicht kosten besparen. De totale ontwikkeling van het Spodofos concept kost dus ongeveer 7.300 k€. Deze ontwikkelkosten kunnen worden terugverdiend via licenties op het concept en deze licentiekosten zijn meegenomen in de raming voor de commerciële installatie (paragraaf 4.6).

Voor de totale doorlooptijd van de technische ontwikkeling dient dus 6-7 jaar worden aangehouden. De duur van elk proefprogramma is in tabel 10 behoudend. Versnelling is mogelijk door de voorbereidingen (mer etc.) van een volgende of zelfs navolgende fase vroegtijdig, in een lopende fase, te starten. Een gunstige bijkomstigheid is dat verschillende provincies zich sterk maken voor duurzame en circulaire ontwikkeling waardoor het vinden van een geschikte locatie relatief vlot zou kunnen verlopen.

#### 3.6.4 SHOWSTOPPERS

Het einde van elke TRL stap is te beschouwen als een GO-NOGO beslismoment. De dan gewenste maar nog niet bereikte resultaten zullen dan geëvalueerd moeten worden.

Technische zaken die een succesvolle ontwikkeling in de weg staan zijn:

1. Procesveiligheid is niet te waarborgen (bv voortijdige ontsteking),
2. De RMC-unit produceert geen kwalitatief reproduceerbaar reactiemengsel,
3. De reactie is niet goed te beheersen/in stand te houden,
4. Het fosforrendement is te laag,
5. Vervuiling kan niet worden opgelost / geen lange runtijden,
6. Materialen degraderen te snel / geen lange runtijden.

De eerste vier zaken zijn op basis van literatuur goed in te schatten maar moeten worden bewezen in TRL 4 en 5. Vervuiling van de inwendige installatie is op dit moment lastig te voorspellen. Hiertoe moet het fenomeen eerst aan het licht komen; dit is een algemeenheid in procesontwikkeling. Vervuiling zal in TRL 6 en verder een onderzoekspunt zijn, maar wordt mogelijk al in TRL 5 zichtbaar.

### 3.6.5 ORGANISATIE VAN DE ONTWIKKELING

#### 3.6.5.1 AARD VAN DE ONTWIKKELINGEN

In 2.1 en 2.2 worden de ontwikkelingen van RMC-unit en reactor gekenschetst als applicatiegericht en is wetenschappelijk onderzoek in TRL 4 en 5 niet direct aan de orde. Vanaf TRL 6, waar de procesvoering representatief wordt voor de uiteindelijke situatie, zouden dergelijke onderzoeksvragen wel kunnen opdoemen. Bijvoorbeeld m.b.t. efficiency (ferrofosfor, temperatuur), vervuiling, te korte runtijd, materiaalbelasting etc.

#### 3.6.5.2 IN TE ZETTEN DESKUNDIGHEID

Er zijn drie specifieke gevaarsaspecten die ingebrachte deskundigheid vereisen:

- de processing, handling en opslag van fosfor;
- de zeer hoge temperatuur waarmee vloeibare producten uit de installatie lopen;
- de gevaren met (voorverhitte) aluminothermische mengsels.

Over het gehele traject is aanwezigheid van deskundigheid m.b.t. fosfor een vereiste. Het beheersen van metallurgische gevaren is een kwestie van ontwerp, kwaliteitsbewaking en volgen van procedures. Dit is op meerdere plekken “in te kopen” en wordt relevant wanneer het om grotere hoeveelheden gaat (TRL 6 en verder).

De aluminothermische gevaarsaspecten zullen met de ontwikkeling in TRL 4-5 al voor een groot deel duidelijk zijn en moeten worden omgezet naar beleid en procedures.

Voor de procesontwikkeling (TRL4 en 5) is de gewenste deskundigheid:

- RMC-unit: werktuigkunde en/of materiaalwetenschap (toegepast);
- Reactor: procestechnologie.

Vanwege de aard van de ontwikkelingen (5.1) en het vermijden van tijd kostende kennisoverdracht is ThermusP voornemens de ontwikkeling TRL 4 en 5 in eigen beheer te doen, met inzet van externen op onderdelen waar nodig.

Op dit moment wordt de inzet van een afgestudeerde voorzien voor de praktische ontwikkeling van de RMC-unit.

Vanaf TRL6 zal het werk zich afspelen in een technicum, gelinkt aan een industriële organisatie, en door een klein team worden uitgevoerd. Ook is vanaf dat moment een parallel wetenschappelijk onderzoek te starten teneinde het proces fundamenteel te beschrijven en daarop te optimaliseren.

Voor specifieke technologische vraagstukken, analytisch en technisch werk wordt deskundigheid ingekocht:

- analyses op as, slak, aluminium, fosfor en ferrofosfor;
- slaktoepassingen: betontechnologisch laboratorium;
- materiaaladvies/keuring;
- apparatenbouw;
- industriële automatisering.

#### 3.6.5.3 PROEFVERGUNNING

Op de ontwikkellocatie zal een (proef)vergunning noodzakelijk zijn, tenzij een technisch lab kan worden gebruikt waar een ruime vergunning aanwezig is. Dan nog is minstens een melding op zijn plaats.

Een vergunningaanvraag voor proefnemingen wordt door het werken met fosfor bepaald. Het opvangen van een hoeveelheid fosfor voor analyse en voor de bepaling van de opbrengst (kan desnoods ook met massabalansen) en kwaliteit, is op enkele momenten gewenst. Voor de meeste experimenten kan de ontstane fosfor direct worden omgezet en geblust (tot fosforzuur) waardoor het zijn specifieke gevaarlijke eigenschappen verliest. Hierdoor zijn er bij de meeste experimenten slechts enkele grammen fosfor (als gas in de opstelling) op enig moment aanwezig.

Kennis van de stof fosfor is niet wijd verbreid. Een overleg met het bevoegd gezag, in aanwezigheid van een deskundige, zal de aanvraag van de vergunning moeten bespoedigen.

Het garanderen van de veiligheid voor mens en milieu zal vergaand moeten worden vastgelegd.

#### **3.6.5.4 SAMENWERKING MET DE BRANCHES**

Met dit project is het perspectief van het Spodofos proces compleet in kaart gebracht. Bij een succesvolle implementatie wordt de slibketen voorzien van een duurzame eindverwerking van de verbrandingsas, ook van de minerale fractie, en zijn de kosten hierbij laag te noemen.

Met een wederzijds belang ligt een samenwerking van ThermusP met de slibverwerkingssector in de verdere ontwikkeling voor de hand. Mogelijk zijn ook andere stakeholders zoals provincies, productafnemers, schrootleveranciers en bedrijven op enig moment te betrekken. Hierdoor wordt het beoogde doel zo spoedig mogelijk (maar veilig) gerealiseerd.

#### **3.6.5.5 WET- EN REGELGEVING: EIND-AFVALSTATUS**

Een Spodofos installatie zal een afvalstroom (slibverbrandingsas) omzetten naar producten met een waarde die dan bij voorkeur een eind-afval status hebben. Aluminiumschroot wordt overigens niet gezien als een afvalstof op grond van EU verordening 333/20111. Artikel 6 van de EU Kaderrichtlijn afvalstoffen bepaalt dat een afvalstof ophoudt een afvalstof te zijn als:

1. het voorwerp wordt gebruikelijk toegepast voor specifieke doelen
2. er is een markt voor of er is vraag naar de stof of het voorwerp
3. de stof of het voorwerp voldoet aan de technische voorschriften voor de specifieke doelen en aan de voor producten geldende wetgeving en normen
4. het gebruik van de stof of het voorwerp heeft over het geheel genomen geen ongunstige effecten voor het milieu of de menselijke gezondheid

Een producent van een stof is in eerste instantie zelf verantwoordelijk voor de beoordeling of er sprake is van “einde afval” en vervolgens is het aan het bevoegd gezag voor de productielocatie om te beoordelen of zij tot dezelfde conclusie komen. Door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat kunnen ook rechtsoordelen worden afgegeven over een “einde afval” status, maar op dit moment worden dergelijke verzoeken niet in behandeling genomen door gebrek aan capaciteit.

Spodofos maakt in principe drie hoofdproducten: witte fosfor, ferrofosfor en slak. Voor witte fosfor en ferrofosfor producten is waarschijnlijk het eenvoudigst aan te tonen dat deze voldoen aan bovengenoemde criteria omdat deze qua samenstelling lijken op producten waarvoor al een markt is. Ook voor de slak lijkt dit haalbaar, maar zullen met name het derde en vierde criterium extra bewijsvoering vergen omdat de samenstelling niet direct vergelijkbaar is met producten waarvoor er al een markt is.

Zodra einde-afval status bereikt is zal het product wel moeten voldoen aan de REACH regelgeving en dat betekent dat er de stof geregistreerd moet zijn inclusief een uitgebreid veiligheidsdossier. Voor witte fosfor en ferrofosfor bestaan al REACH dossiers waarop een Spodofos producent kan meeliften. Voor de slakken zal nader onderzocht moeten worden of aangesloten kan worden bij bestaande dossiers voor aluminiumhoudende slakken of dat een nieuwe registratie nodig is.

Gedurende de ontwikkeling is het belangrijk om vroegtijdig aan de slag te gaan met het verkrijgen van duidelijkheid over de einde-afval status en de noodzaak tot eventueel REACH certificering. Als eerste stap is het belangrijk om een zo goed mogelijk dossier op te bouwen over bestanddelen in de producten die een milieu-hygiënische impact kunnen hebben.

# 4

## TECHNISCH ONTWERP VAN EEN SPODOFOS INSTALLATIE

### 4.1 INLEIDING

Op basis van de technologische evaluatie van het Spodofos proces uit het vorige hoofdstuk is een vertaling gemaakt naar een technisch ontwerp van een dergelijke installatie. Doel van dit technisch ontwerp is om een beter gevoel te krijgen voor de technische aspecten die nodig zijn bij de realisatie van een dergelijke installatie. Bovendien geeft het ontwerp een eerste inschatting van de benodigde investeringen en de operationele kosten. Ook helpt het om de vestigingsaspecten van een dergelijke verwerkingsinrichting in kaart te brengen.

### 4.2 UITGANGSPUNTEN

#### 4.2.1 CAPACITEIT EN ASSAMENSTELLING

Voor het ontwerp van de installatie is uitgegaan van een capaciteit van 50.000 ton slibverbrandingsas per jaar (zie ook 2.2). Voor de assamenstelling is uitgegaan van het gewogen gemiddelde van de SNB en HVC- verbrandingsassen. De berekeningen zoals besproken in paragraaf 3.3 laten zien dat deze as een aluminiuminput vraagt van 222 kg/ton as. Hierbij is het Aluminium-gehalte op 95% en Magnesium op 3,5% gesteld (gangbare schrootkwaliteit). De exothermie van de reactie is redelijk hoog en daardoor heeft de slak een vloeitemperatuur van maximaal 1.645°C. Dit is het smeltpunt van uitsluitend het 4-componenten systeem  $\text{MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ; de overige componenten zullen de smelttemperatuur verlagen. Het vloeigedrag van de slak zal niet kritisch zijn.

De producten per ton as zijn 83 kg fosfor, 116 kg ferrofosfor en 1023 kg slak. De slak heeft de samenstelling: 16,9% CaO, 5,7% MgO, 47,3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 22,6%  $\text{SiO}_2$ , 7,5% overig. Voor de verdere ontwikkeling zijn enkele hoofddoelen omschreven, waaronder het maximaliseren van de fosforopbrengst, cq. het minimaliseren van de fosfor in het ijzer.

Het deel “rest” zal voor het grootste deel in de slak achterblijven. Enige vluchtige bestandsdelen zullen met de fosfor uit de reactor worden afgevoerd en gereduceerde metalen zullen in de ijzerfase oplossen. Deze onderverdeling wordt hier buiten beschouwing gelaten omdat hier experimenten voor noodzakelijk zijn. Op de massa en energiebalans heeft dit geen significante invloed.

#### 4.2.2 MATERIAALSTROMEN

Met bovenstaande uitgangspunten kan de verwerkingslokatie worden gekarakteriseerd met de materiaalstromen zoals weergegeven in onderstaande tabel.



TABEL 11

UITGANGSPUNTEN MATERIAALSTROMEN VOOR TECHNISCH ONTWERP

|                   | ton/a  | m <sup>3</sup> /ton as |                                  |
|-------------------|--------|------------------------|----------------------------------|
| As-verwerking     | 50.000 | 1,05                   | ca. 7 vrachten aanvoer/werkdag   |
| Inkoop Al (95%)   | 11.100 | 0,2                    | ca. 1,5 vrachten aanvoer/werkdag |
| Slakproductie     | 50.650 | ca. 0,55               | ca. 7 vrachten afvoer/werkdag    |
| Ferrofosfor       | 5.800  | ca 0,02                |                                  |
| Fosfor            | 4.150  | 0,045                  |                                  |
| Stof naar deponie | 500    | p.m.                   |                                  |

Hieruit blijkt het tweeledige karakter van deze recycling. De grootte en op het oog typerende van de installatie wordt bepaald door de as- en slak volumes. De hoeveelheden fosfor en ferrofosfor die worden geproduceerd vragen een kleine installatie en zullen in min of meer separate kleine afdelingen worden verwerkt.

#### 4.2.3 CONTINU-PRODUCTIE

Er wordt hier uitgegaan van een 7x24 bedrijfsvoering. Dit heeft zijn weerslag op de personeelskosten omdat daarmee een 5-ploegendienst vereist is.

Het is echter wel een veilig uitgangspunt omdat de gevolgen van het elk weekend uitzetten, warmhouden en opstarten van het proces op dit moment nog niet te overzien zijn (warmhoudkosten, opstartkosten, slijtage, degradatie van materialen). Het continu in bedrijf houden van het proces zal ten goede komen aan de levensduur van belangrijke componenten en voorkomt moeilijkheden bij het elke dag of elke week opstarten.

De beschikbaarheid van de installatie wordt hier gesteld op 90% bij 50 weken/a bedrijfstijd (zie ook paragraaf 4.3.2). Het aantal productie-uren bedraagt dan 7.560 per jaar.

De basis voor dit full-scale ontwerp is derhalve een volcontinu productie met 6,6 ton as per uur nominaal en 8,0 ton as per uur als maximale capaciteit (ten behoeve van inlopen verloren bedrijfstijd).

#### 4.3 BASISONTWERP VERWERKINGSPROCES

De meest eenvoudige procesgang wordt hier uitgewerkt. Dit houdt in:

- Geen voorbehandeling op de ingenomen assen, wassing met water kan het o.a. het sulfaatgehalte verlagen waardoor er minder aluminium nodig is.
- Geen toevoeging van boosterass of flux (zoals kalk). Dit is met de basis-assamenstelling niet nodig.
- Voorverhitting van as en aluminium met aardgas. Hierbij geen gebruikmaking van de exergie van aardgas d.m.v. WKK: het gas wordt direct ingezet voor voorverhitting van de as en aluminium.
- Geen terugwinning van non ferro metalen (Zn, Pb) uit het afgevangen stof uit de fosforstroom. Dit stof is v.w.b. samenstelling nog onbekend en wordt daarom afgevoerd naar de deponie.
- Geen opwerking of hoogwaardige toepassing van de slak. De slak wordt na afkoeling in de gewenste korrelgrootte gebroken (extern) voor toepassing als bouwstof.
- Uitsluitend het op verkoopkwaliteit brengen van de geproduceerde fosfor: alleen reiniging, buffering en afvoer.
- De warmte integratie is uitsluitend op de locatie zelf. Er zal een flink warmteoverschot

zijn maar deze wordt (voor een zeer klein deel) gebruikt om de eigen processen duurzamer te maken.

- Geen toepassing van niet-uitontwikkelde technologieën (behalve die van Spodofos zelf), zoals:
  - Droge slakgranulering met warmteterugwinning zou de duurzaamheid aanzienlijk gunstiger kunnen maken.
  - Geen P-terugwinning op het gevormde ferrofosfor (opgewerkt tot lager P of oplossen tot een flocculant).

De verwerkingsinstallatie is weer te geven in een aantal functionele blokken. E.e.a. is kwantitatief uitgewerkt in PFD's en de massa/warmtebalansen.

#### **4.3.1 TOELICHTING OP DE PROCESDELEN**

Alle procescomponenten zijn in een separaat en vertrouwelijk document nader ontworpen en gedimensioneerd. Hier wordt slechts het gebruik omschreven. Figuur 5 geeft de procesdelen die in de volgende paragrafen worden besproken schematisch en in onderlinge verhouding weer.

##### **4.3.1.1 AANVOER EN OPSLAG VAN ASSEN EN ALUMINIUM**

De aan te voeren verbrandingsassen van zuiveringsslib zijn vastgesteld als een afvalstof (Eural code 19.01.xx). Acceptatie en verwerking zijn aan regelgeving gebonden.

Hiervoor is in de installatie minimaal noodzakelijk: een weegbrug, bemonstering en opslag in afgesloten silo's.

Bemonstering is eveneens bij ontvangst van de aparte vrachten zeer gewenst omdat de kwaliteit van de as direct gerelateerd is aan de verwerkingskosten. Een analyse is met een xrf-analyser in enkele minuten uit te voeren. In verwerkingscontracten dient vastgelegd te zijn welke gevolgen gelden indien een vracht onder een vastgestelde minimale kwaliteit is. Acceptatie (mits geen gevaarlijk afval) moet voor de voortgang van de productie geregeld zijn.

Aangenomen wordt dat de aanvoer het jaar door gelijkmatig is. Voor 50.000 ton/a is een opslagvolume gewenst van twee weken, in totaal 2.500 m<sup>3</sup>. Met dit volume kunnen verwerking en aanvoer op elkaar anticiperen.

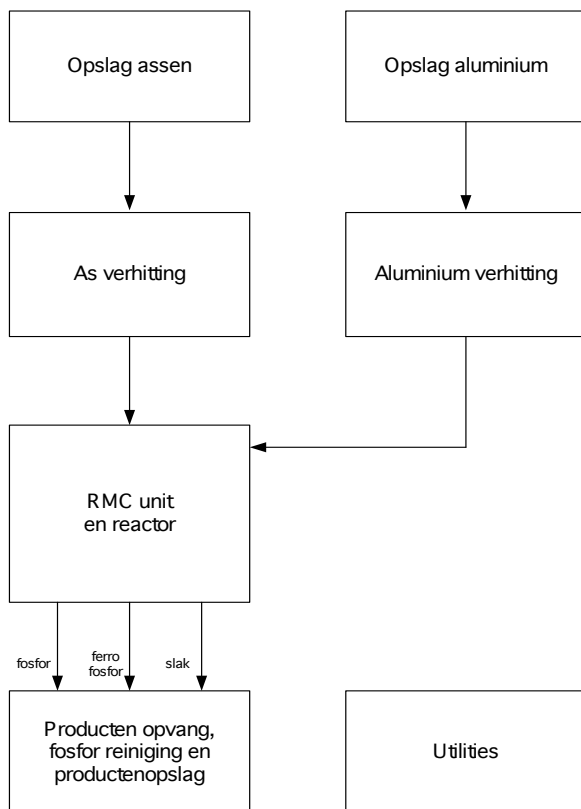
Het aan te voeren aluminium schroot wordt door gecontracteerde leveranciers op afgesproken grootte aangeleverd, in granulaatvorm. Vrij van vocht, ferro en afwasbare vervuiling. Ook dit aluminium is een afvalstof (Eural code 17.04.xx, 12.01.03, 10.08.10 etc). Het aluminiumgehalte dat wordt geleverd is direct gerelateerd aan de waarde ervan. Ook hier is dan bemonstering en analyse op zijn plaats. In de leveringscontracten zal dat nader moeten worden geregeld.

De vrachten worden in een gelijkvloerse bunker gestort. Met een shovel wordt het schroot via een stortbuffer, banden en elevator in het proces gebracht. De shovel dient ook voor het laden van slakken en het leegrijden van de slakkenbedden.

Het volume van de bunker is weer voor twee weken, zijnde 500 m<sup>3</sup>, in verschillende vakken om met kwaliteiten te kunnen sturen. De doseerbuffer is voor ca 1 dag = 30 m<sup>3</sup>.

FIGUUR 5

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE PROCESDELEN ZOALS BESPROKEN IN DEZE PARAGRAFEN



#### 4.3.1.2 VOORBEHANDELING ASSEN

Het doel van de voorbehandeling is:

- Het verdrijven van vocht,
- Het aanmaken van homogene en afgewogen batches,
- Het voorverhitten van de as (teneinde in de RMC-unit het aluminium te kunnen dispergeren en voor verhoging van het enthalpie van het reactiemengsel).

Dit wordt gerealiseerd met de stappen.

1. Continue onttrekking van de as uit de silo's in een massastroom gemiddeld gelijk aan de verwerking: 6,6 ton/h.
2. Het zeven van de as voor de verwijdering van vreemd/grof materiaal (doorval bv 5 mm).
3. Het inbrengen van de as in een verhittingstrommel waarbij rookgassen in tegenstroom gaan; de eindtemperatuur (ca 600°C) van de as wordt geregeld.
4. Bij het doseren van de verhitte as in de afweegsilo van de RMC-unit (batch op massabasis). Er wordt periodiek een representatief monster van de as genomen en geanalyseerd. De uitkomst hiervan bepaalt de hoeveelheid aluminium dat aan de as moet worden toegevoegd.

#### 4.3.1.3 VOORVERHITTEN ALUMINIUM

Bij de verhitting van aluminium wordt vocht verdreven en worden coatings afgebrand/gepyrolyseerd. Bij het decoaten ontstaan gassen die moeten worden naverbrand. Dit is de normale wijze van decoaten van aluminium schroot. Het naverbranden (1 sec op ca 800°C) wordt hier gecombineerd met de luchtverhitting van de as-verhitter. Het rookgas van de decoater/voorverhitter wordt dus naar de brander van de as-voorverhitter geleid.

Teneinde het warmtegebruik te optimaliseren wordt het afgas van de as-verhitter (na een stofverwijdering) als voorverwarming/droging van het aluminium gebruikt. De toevoer naar de droger/voorverhittrommel is rechtstreeks en continu vanuit de doseerbunker. De aluminium uittredetemperatuur wordt beperkt teneinde smeulen van coatings (geur) te voorkomen.

De capaciteit van de tweetraps verhitting is 2,0 ton/h. De doorzet is ca 1,44 ton/h en het verhitte aluminium heeft een temperatuur van 500- 600°C. Het aluminium wordt in de afweegsilo in de juiste hoeveelheid bij de afgewogen as gebracht.

#### **4.3.1.4 RMC-UNIT DOSEREN EN DISPERGEREN**

De ReactieMix Conditioneer unit heeft de volgende taken:

- Het dispergeren (verkleinen) van het aluminium in de as, tot vergelijkbare korrelgrootte als de as;
- Het homogeniseren (verdelen) van het aluminium in de as.

Deze zijn voorwaarden voor een gecontroleerde en zelfonderhoudende reactie na ontsteking en voor het hoogste fosforrendement. Om dit te bereiken worden de afgewogen as en aluminium in de lege unit gebracht. De unit werkt derhalve batchgewijs.

Na een vaste behandelingstijd (naar verwachting circa 20 minuten) wordt de unit geleegd in de reactor-doseerbuffer. De unit is zodanig overgedimensioneerd dat de kwaliteit van het reactiemengsel normaalgesproken ruimschoots voldoet aan de te stellen eisen (fijnheid, homogeniteit).

Een cyclus bestaat uit: afgewogen as + aluminium doseren, disperseertijd, lossen in de reactor-doseerbuffer.

#### **4.3.1.5 REACTOR EN PRODUCTAFVANG**

De reactorbuffer wordt op voldoende vulling gehouden door de installaties stroomopwaarts. De dosering vindt plaats met een hittebestendige roterende sluis.

De reactor is het hart van de installatie. Het ontwerp is een belangrijk punt van onderzoek/ontwikkeling. Bij de aluminothermische reactie vinden in hoofdzaak drie omzettingen plaats:

- Geoxideerd ijzer wordt gereduceerd naar metallisch ijzer
- Sulfaten worden omgezet naar zwavel
- Fosfaten worden omgezet naar elementair fosfor

Een deel van de fosfor zal oplossen in het vloeibare metaal (ijzer).

Door de reactie wordt de gecondenseerde fase in de reactor sterk verdicht (volume reactanten : volume vloeibare producten = 4:1). De aslaag zakt daardoor voortdurend naar de reactiezone.

Er zijn twee productstromen

- Een slak/metaalmengsel dat via een uitstroompipj wegvlloeit naar het scheidingsvat
- Een fosforgas – vliegas – vluchtige componenten mengsel dat de reactor aan de bovenzijde verlaat

Het scheidingsvat heeft twee functies:

- Gasslot van de reactor
- Het scheiden van slak en metaal, hier kunnen de vloeibare slak en metaal vanwege hun dichtheidsverschil scheiden. De overloop (slak) vloeit af naar de stollingsbedden; het metaal vloeit af naar een stollingsbed voor ferrofosfor.

#### **4.3.1.6 PRODUCTBEHANDELING, OPSLAG EN AFVOER**

##### **SLAK**

De slak wordt via de overloop van het scheidingsvat en een kanaalsysteem naar een slakkenbed geleid. Echter, de warmte-energie in de slak (ordegrootte 3 MW) wordt nauwelijks benut. In het bed stolt de slak en wordt daarna met water afgeschrikt. Wanneer de temperatuur voldoende laag is wordt het bed met een shovel leeggereden naar het buitendepot.

Er zijn meerdere bedden aanwezig die om en om gevuld, gekoeld en leeggereden worden. De bedafmetingen zijn gebaseerd op een vultijd van 1 dag en een cyclustijd (vollopen, afkoelen, leegrijden, voorbereiden nieuwe cyclus) van 6 dagen.

Voor de toepassing als aluminagranules dient de slak tot de fractie 5-10 mm te worden gebroken. Voor de onderhavige full scale wordt dit nog bij een externe partij gelegd; de slak wordt hier in grove (10-20 cm) brokken afgevoerd.

De opslag vindt plaats buiten in gelijkvloerse bunkers. Met wielladers wordt het in containervrachtwagens overgeslagen en met de vereiste formaliteiten naar de breker gebracht. Het is de verwachting dat de slak een productstatus verkrijgt.

De opslagcapaciteit van slakgranulaat wordt ca vier weken, zijnde 4.000 ton. Er wordt 6.000 m<sup>3</sup>, ca 1.500 m<sup>2</sup> als opslag aangehouden.

##### **FERROFOSFOR**

De vloeibare ferrofosfor loopt in een stollingsbed. Na stolling en de grootste afkoeling wordt het brosse materiaal bij het leegrijden in brokvorm naar het depot gereden. Er zijn ook hier zes bedden.

##### **FOSFOR**

De gasstroom uit de reactor bestaat voor het grootste deel uit fosfor. Daarnaast vervluchtigde metalen, metaaloxiden, -chloriden en inertisatiegas (stikstof vanuit de doseersilo). De exacte samenstelling is op dit moment niet te geven.

Er wordt uitgegaan van afscheiding van de metalen, metaaloxiden en chloriden met een elektrofilter dat op 400°C functioneert. Een tempereervoorziening moet dan tussen de reactor en het E-filter worden aangebracht. Alleen arseen zal met de fosfor deels meegaan.

De fosfor wordt gecondenseerd in een tweetraps natte condensor.

Vanuit de bodem van de condensoren wordt de ruwe fosfor naar een buffertank gepompt. Van hieruit wordt de fosfor gefiltreerd om tot verkoopkwaliteit te komen. Dit geschiedt periodiek en een 15 tons ISO container wordt daarbij gevuld (gemiddeld één per dag).

#### 4.3.1.7 UTILITIES

##### BESCHERMINGSGAS

De doseersilo wordt met stikstofgas geïnertiseerd. Deze stikstof wordt met een generator geproduceerd. Een (zeer laag) restzuurstof zal in de silo worden verwijderd door het aanwezige (hete en reactieve) aluminium.

##### LUCHTBEHANDELING

Er zijn drie afgassen te behandelen. Deze komen na specifieke stappen bij elkaar:

1. De afgassen van de verhitters zijn door de eerdergenoemde configuratie vrij van pyrolysegassen. Door een efficiënte aardgasverbranding is het rookgasvolume erg laag en wordt er vanuit de as weinig stof meegenomen. Voor de laatste stap van de rookgassen (droger aluminium) wordt in een cycloon het stof afgevangen. Na de aluminiumdroging worden de afgassen nat behandeld: eerst verzadigd en gewassen.
2. De niet condenseerbare gassen in de fosforcondensatie en de ademplucht van de fosforopslagen bevatten enig fosfor. Deze hoeveelheid is uitermate klein en wordt door een navenant kleine kopersulfaatwassing vrij van  $P_4$  gemaakt. Vervolgens wordt de stroom samengevoegd met de gassen van de eerste rookgassenscrubber en wordt het totaal met een bleekloogwassing behandeld. Oxideerbare (geurdragende) gassen in de rookgassen worden dan eveneens verwijderd.
3. De ventilatielucht van de fabriek wordt via de thermische en fosforbewerkings-compartimenten afgezogen. Ventilatievoud 10 hetgeen neerkomt op 25.000 m<sup>3</sup>/h. De slakkengoot wordt afgezogen om uitdampende gassen beheerst af te voeren. Voorlopig eveneens 50.000 m<sup>3</sup>/h. Deze lucht wordt in een wasser verzadigd en afgekoeld en in een alkalische scrubber van zuur gas ontdaan. Na samenvoeging met de gassen uit de oxidatieve scrubber worden alle afzuigingen via een schoorsteen op 40 meter geëmitteerd.

##### WATERBEHANDELING

Water dat in aanraking met fosfor is geweest (phosy water ed.) zal met bleekloog worden behandeld zodat de specifieke giftigheid van fosfor wordt *geneutraliseerd*.

Alle proceswater en het opgevangen hemelwater (slakopslag, alle gebouwen en verhardingen) wordt gebruikt om de slakken te koelen (afschrikken). Hiertoe is een centrale wateropvang voorzien. Deze wordt aangevuld met oppervlaktewater indien het niveau laag wordt.

##### WARMTEHERGEBRUIK

De gehele procesgang heeft een warmtevraag aan de voorzijde en een groot warmte-overschot aan de productzijde. Dit is duidelijk zichtbaar met de warmte-inhoud van het reactiemengsel (600 kJ/kg) en de exothermie van de reactie (ca 2.000 kJ/kg). Theoretisch zou het proces, met slechts 30% warmteterugwinning voor de voorverhitting van de assen en aluminium, thermisch zelfvoorzienend kunnen zijn. Aangezien de warmte met name in vloeibare slakken aanwezig is, is de warmte alleen met veel techniek te onttrekken en te benutten. Er zijn ontwikkelingen die dit mogelijk te maken, maar zijn op dit moment niet direct toepasbaar (consultatie Primetals).

Voor het basisontwerp wordt alleen de verbrandingslucht voor de voorverhitting van as en aluminium voorverwarmd met warmte uit de producten.

Hier wordt aangenomen met extra eenvoudige technische voorzieningen, verbrandingslucht tot 300°C kan worden voorverwarmd.

Er is enige warmte noodzakelijk om de fosforopslagen op temperatuur te houden teneinde het product verpompbaar te houden. Deze laagwaardige warmte is op diverse plaatsen te betrekken.

Verdere warmtebenutting zal plaatsvinden voor verwarming van verblijfruimtes en sanitair. Dit wordt (nog) niet uitgewerkt.

In de vloer van de slakkenbedden kan eenvoudig een vloerkoeling worden aangelegd die in alle vraag naar laagwaardige warmte voorziet.

#### **4.3.2 ONDERHOUD**

Er wordt van uitgegaan dat op momenten van grootschalig onderhoud (1x per jaar):

- de slijtdelen en wandbekleding van de RMC-unit worden vervangen of hersteld;
- de zwaarst belaste delen van de reactorwand worden vervangen.

Verder is de installatie er op ontworpen om continu te draaien.

#### **4.3.3 VEILIGHEIDSVORZIENINGEN**

Vanaf het punt dat er een reactief mengsel is ontstaan, nl in de RMC-unit, tot aan de doseersilo, is er een extra veiligheidsaspect aan de orde: het zelfontbranden van het mengsel (buiten de reactor derhalve). De marge hiertoe is echter redelijk groot, , maar een ongewenste ontsteking moet worden gedetecteerd en tegengegaan.

In de RMC-unit kan met een laagenergetische maling en/of een mengsel met lage dichtheid het risico worden verkleind. Als veiligheidsingreep dient er een voorziening worden getroffen om de effecten van zelfontsteking te beteugelen. Hier wordt uitgegaan van het toevoegen van een hoeveelheid inert materiaal waardoor een ontsteking zichzelf niet kan gaande houden.

Zowel de RMC-unit als de doseersilo zijn voorzien van een menger die dit snel kan verdelen.

De integriteit van de reactor is zeer belangrijk voor de veiligheid. Hiertoe zullen extra maatregelen getroffen/aangebracht worden, zoals warmtecamera's en wanddiktemetingen. Het hoge temperatuur gedeelte (reactor en scheidingsvat) zullen in een beveiligd compartiment moeten komen. Dit houdt in: thermisch geïsoleerd, opvangvoorziening voor slak en afzuiging.

Bij het detecteren van een calamiteit kan de toevoer van as en aluminium direct worden gestopt en is de aanwezige hoeveelheid reactiemengsel in de verwerkingslijn beperkt.

#### **4.3.4 ENERGIE- EN GRONDSTOFFENVERBRUIK**

##### **4.3.4.1 MASSA/WARMTEBALANS HOOFDPROCES**

Voor het basisontwerp is de massa/warmtebalans uitgewerkt. De massa- en energiestromen zijn in een separaat (niet openbaar) rapport opgenomen.

##### **4.3.4.2 OVERZICHT ENERGIE- EN GRONDSTOFFENVERBRUIK**

Met de elektrische verbruikers van de utilities en de dieselolie voor de shovel inbegrepen worden de geprognoseerde verbruiken:

TABEL 12

ENERGIE- EN GRONDSTOFFENVERBRUIK VERWERKING VAN 50.000 TON AS PER JAAR

|               | per jaar                  |
|---------------|---------------------------|
| Aardgas       | 1.200.000 Nm <sup>3</sup> |
| Elektriciteit | 2.700.000 kWh             |
| Dieselolie    | 65.000 liter              |
| Chemicalien   | 75 ton                    |
| Drinkwater    | p.m.                      |

#### 4.3.5 OPTIES VOOR HET VERDER VERDUURZAMEN VAN DE PROCESGANG

Het basisontwerp geeft een eenvoudige procesafloop die grotendeels met bewezen technieken kan worden gerealiseerd. Warmte-integratie is toegepast maar slechts een beperkt deel van de restwarmte kan intern nuttig worden gebruikt.

Teneinde de duurzaamheid van het geheel te verhogen zijn de principiële mogelijkheden:

- De exergie van het aardgas beter benutten (inzet WKK)
- (gedeeltelijke) inzet van (vaste) duurzame brandstof (naast aardgas, bv gedroogd of gepyroliseerd slib, hout)
- Inzet van duurzame elektriciteit als verhittingsbron
- Onttrekken en benutten van restwarmte, evt. naar derden
- Het opzetten van andere activiteiten om restwarmte te benutten, bv slibdroging
- Het meeverwerken van bv asbest of andere minerale afvalstoffen om energiegebruik elders of storten te vermijden

De inzet van duurzame elektriciteit in plaats van aardgas is nu reeds een commerciële mogelijkheid, echter de investeringsgrootte ligt een ongeveer een factor 10 hoger.

#### 4.3.6 ORGANISATIE

Zoals in 4.2.3 aangegeven is de procesvoering zekerheidshalve uitgelegd op bedrijfstijden van 7x24. Hoewel de automatisering vergaand zal worden, lijkt het op dit moment niet wenselijk om het proces volledig geautomatiseerd en onbewaakt te laten verlopen.

Dit houdt in dat de productie in 5-ploegendienst moet worden georganiseerd.

Om de kosten en de grootte van de organisatie te kunnen inschatten zijn de ploegendienst en de benodigde overhead hier uitgewerkt.

In de procesvoering zijn de volgende taken aanwezig:

- Monitoring van het proces,
- Kwaliteitscontrole van de reactiemix (met name de verhouding as/aluminium),
- Inspectie van de installatie en eerste-lijns onderhoud,
- Vulling van de aluminiumdoseur,
- Leegrijden en klaarzetten van slakkenbedden,
- Leegrijden en klaarzetten van ferrofosforbedden,
- Afschrikken van de stollende slakken,
- Het filteren van de fosfor.

Ten aanzien van de aan/afvoerlogistiek en bijbehorende administratie zijn de taken:

- Ontvangst van de afvalstoffen as en aluminium,
- Afvoer van fosfor, slakken, ferrofosfor en vliegas,



- Het laden van slakken en ferrofosfor voor afvoertransporten,
- Ontvangst van dieselolie.

Een ploeg dient vanwege veiligheid minimaal uit twee personen te bestaan. De genoemde taken kunnen door twee personen worden uitgevoerd. Één persoon doet de monitoring en proceskwaliteit, de ander voert de werkzaamheden met de shovel uit.

De globale dag/nacht werkverdeling voor de tweede persoon is dan te splitsen:

- Overdag de aan/afvoerlogistiek,
- 's Avonds – 's nachts wordt een slakkenbed leeggereden.

Het personeel zal goed opgeleid moeten zijn op veiligheidsgebied en specifieke proceskennis.

Ten aanzien van de proceskwaliteit is door de ploegdienst een standaardprocedure te volgen. Teneinde deze te optimaliseren (aluminiumverbruik en fosforopbrengst zijn verreweg het meest bepalend voor het financiële resultaat) is de inzet van een technoloog op zijn plaats (metallurgist, chemisch technoloog). Omdat veiligheid bij de bedrijfsvoering een prominente rol speelt, en een aparte veiligheidsfunctionaris te zwaar ingezet lijkt, zou de technoloog in aanvulling op de procesoptimalisatie, bekwaamd dienen te zijn in veiligheid en KAM en als verantwoordelijke voor deze aspecten kunnen optreden.

Een bedrijfsleider stuurt de organisatie aan. De organisatie is maar klein en daarom zou aan de bedrijfsleider ook de beperkte activiteit als plant controller en als leverancierscontact kunnen worden toebedeeld.

Een opzichzelfstaande organisatie bestaat derhalve uit minimaal  $5 \times 2 + 2 = 12$  fte's. Er dienen contracten met onderhoudsbedrijven voor spoedeisend en regulier onderhoud te worden gemaakt. Verder adviesfirma's voor veiligheid, vergunningen, projecten, schoonmaakfirma, onderhoud shovel.

Deze minimale organisatie heeft niet het gemak van ondersteunende diensten die een groter bedrijf zou hebben. Dit maakt de ondersteunende diensten en de personele invulling bij ziekte en vakanties etc. relatief duur.

Een wenselijke situatie zou dan ook zijn als een dergelijke verwerkingsinrichting ondergebracht is, samenwerkt of onderdeel is van een groter, aanverwant bedrijf. Daarnaast zouden geplande stops (bouwwak, kerst) de kleine organisatie kunnen ondersteunen.

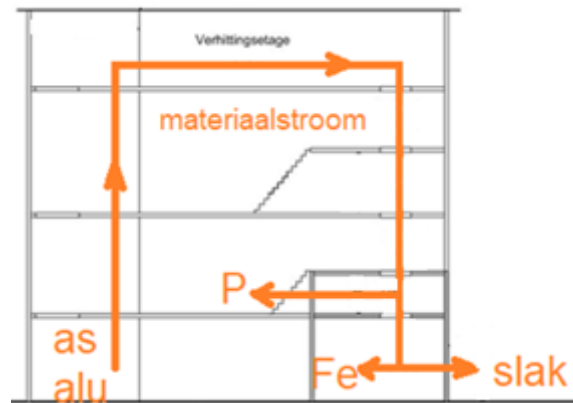
#### 4.4 CONCEPT LOCATIE-ONTWERP

Een eerste opzet van een verwerkingsinrichting is gemaakt. De eerdergenoemde opslaggroottes, een verwerkingsgebouw en belendende slakken- en ferrofosforbedden zijn in de plattegrond weergegeven. De lay-out is zodanig dat er een "logica" in de materiaalstromen zit. Voor het verwerkingsgebouw is ervan uitgegaan dat de behandeling van de reactiemix en de scheiding van vloeibare producten in verticale min of meer gestapelde bewerkingen plaatsvindt.

Deze configuratie leidt ertoe dat de verhitting op de hoogste etage moet plaatsvinden. Het verwerkingsgebouw is dan 25 m hoog (goothoogte). Een vloeroppervlak van 27 x 10 meter is voldoende.

FIGUUR 6

MATERIAALSTROOM PROCESGEBOUW

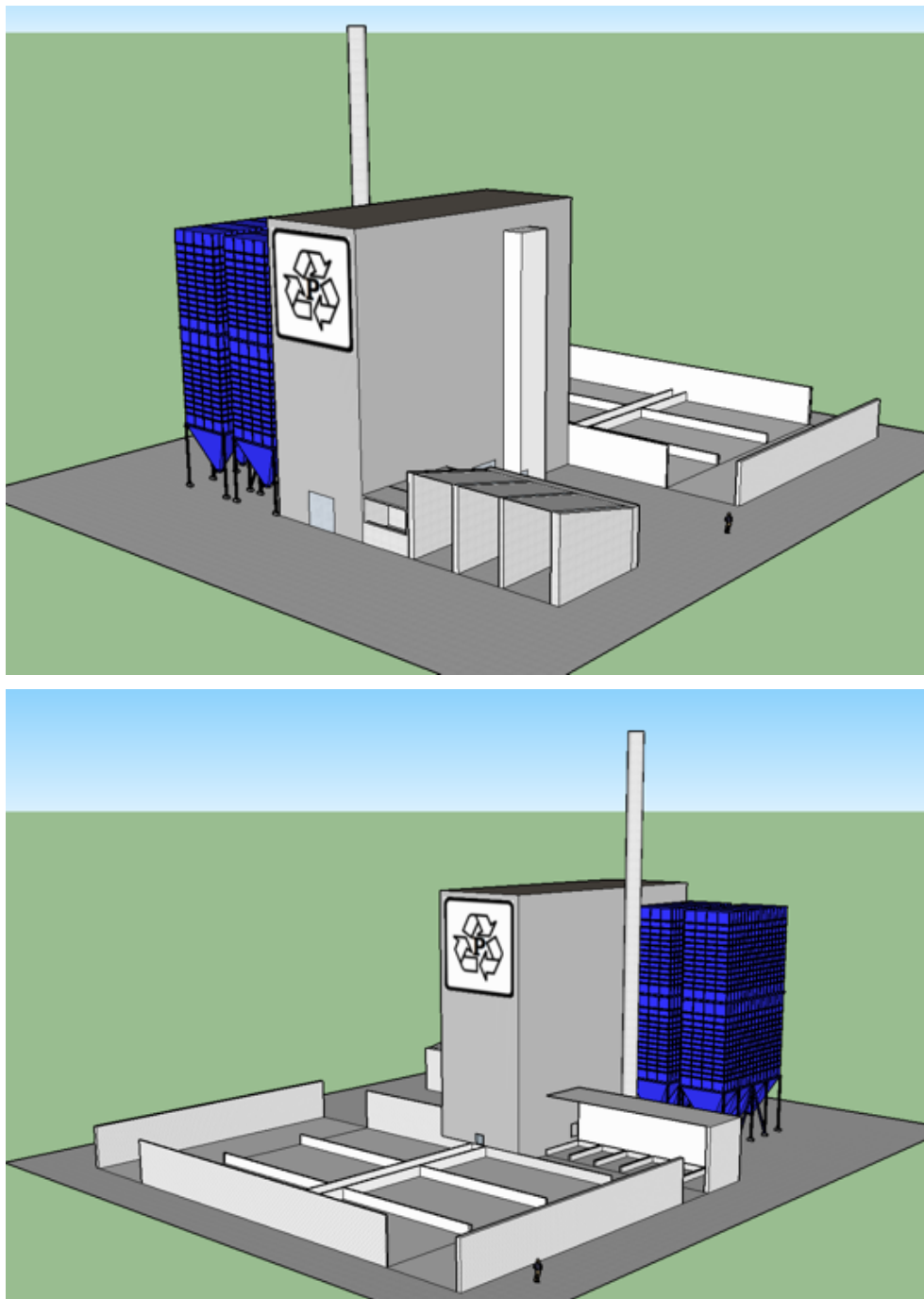


Op lagere etages kan de fosforcondensatie, de stikstofgenerator en enige luchtbehandelingsvoorzieningen worden opgesteld.

De as en het aluminium worden met elevatoren naar de bovenste etage gebracht. Hiervoor worden de assen met een automatisch systeem vanuit de silo's onttrokken; het aluminium wordt met een shovel vanuit de opslagvakken in een doseur gestort.



FIGUUR 8 3D VOORSTELLINGEN VAN EEN FULL SCALE SPDOFOS INSTALLATIE (50 KTON AS/JAAR)



## 4.5 VESTIGING

### 4.5.1 BESTEMMINGSPLAN

De locaties waaruit gekozen kan worden, wordt bepaald door de milieucategorie van de bedrijfsactiviteit volgens de Staat van Bedrijfsactiviteiten van de VNG (lijst 2009). Bestemmingsplannen laten vervolgens dergelijk activiteiten al of niet toe.

In de genoemde lijst zijn verschillende activiteiten die overeenkomen met de onderhavige verwerking van verbrandingsassen en de producten die daarmee vrijkomen, zie tabel 13.

TABEL 13 RELEVANTE BEDRIJFSACTIVITEITEN EN MILIEUCATEGORIEËN

| activiteit                                  | SBI-Code  | omschrijving                                                                                                                         | categorie    |
|---------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Productie en opslag witte fosfor (4000 t/j) | 2012-2    | Vervaardiging van chemische producten;<br>Anorganische chemische grondstoffenfabrieken, vallend onder de<br>"post-Seveso-richtlijn"* | 5.2          |
| Productie slakken (51.000 t/j)              | 2399-C    | Minerale productenfabrieken "niet eerder genoemd"                                                                                    | 3.2          |
| Productie ferrofosfor (6000 t/j) en slakken | 241-2     | Ruwijzer- en staalfabrieken, capaciteit >1000 ton/j                                                                                  | 6 (zie opm.) |
| Verwerking slakken                          | 383202-A1 | Puinbrekerijen, verwerking <100.000 t/j                                                                                              | 4.2          |

Dat er minder dan 50 ton witte fosfor op de locatie aanwezig zou zijn is onwaarschijnlijk: dit zou inhouden dat er op het terrein maximaal 2 of 3 gevulde containers met fosfor zouden mogen staan. De richtlijn zal derhalve van toepassing zijn.

Opmerking m.b.t. de productie van ferrofosfor: de milieubelasting van de ijzerproducerende industrie (op basis van cokes) is sterk afwijkend van de milieubelasting van de ijzerproductie volgens het Spodofosproces (aluminium). Tevens is ijzer hier een nevenproduct en bij de verwerking van beendermeel zelfs niet aan de orde. Milieucategorie 6 is daarom zeer waarschijnlijk niet van toepassing.

Milieucategorie 5.2 is derhalve bepalend voor de onderhavige verwerkingsinrichting. Met deze categorie zijn ook de overige (optionele) activiteiten gedekt.

### 4.5.2 LOCATIEKEUZE

Bedrijventerreinen met categorie 5.2 zijn in Nederland op meerdere locaties te vinden (niet alleen op chemieparken). Een aantal criteria zouden bij de locatiekeuze kunnen worden meegenomen:

- Organisatorische synergie met een aanverwant bedrijf (zie organisatie),
- Productietechnische synergie met een buurt-bedrijf, bv breken van slak of gebruik van restwarmte,
- Gebruikmaking van een gedeelde calamiteitenbestrijding,
- Aanwezigheid van specifieke kennis en ervaring in de regio (Thermphos).

De gedeelde calamiteitenvoorzieningen zullen gemakkelijker te vinden zijn bij de grotere chemieparken.

De aan/afvoer van grondstoffen en producten zal vrijwel geheel per as zijn. Een goede bereikbaarheid is algemeen bij dergelijke bedrijventerreinen. Waterwegen zijn minder van belang. Fosfor zal per as (weg/spoor) vervoerd worden.

De leveringsafstand van assen en aluminium zijn niet van bijzonder belang in de locatie-keuze.

Bedrijventerreinen streven veelal naar duurzame activiteiten. Het Spodofosproces past hier naadloos in. Afhankelijk hoe de verdere ontwikkeling verloopt, kan een eerste full scale fabriek ook een demonstratie worden waar de laatste technologische verfijningen worden ontwikkeld voor verdere uitrol van het Spodofos-concept.

#### **4.5.3 VERGUNNINGEN**

De oprichting van een Spodofos verwerkingsinrichting vereist een milieu-effectrapportage (mer) vanwege de chemische behandeling van niet-gevaarlijk afval (>100 ton/dag) en de (geïntegreerde) productie van anorganische basischemicaliën.

Verder zal de inrichting als een IPPC-bedrijf worden aangemerkt vanwege potentiële effecten op de omgeving, zoals geur en externe veiligheid. Daaruit voortvloeiend is de inrichting “type C” van toepassing conform het Activiteitenbesluit, een inrichting voor de verwerking van afvalstoffen.

De Seveso Richtlijn (paragraaf 5.1) is voor de Nederlandse situatie verwerkt in de BRZO (Besluit Risico's Zware Ongevallen). Bij het ingaan van de nieuwe omgevingswet 2021/22 wordt dit weer “Seveso inrichting”.

Het voorhanden hebben van kleinere hoeveelheden witte fosfor vraagt daarnaast om specifieke waarborgen rond brandbestrijding en EHBO, al dan niet in combinatie met faciliteiten in de omgeving. Deze specifieke regelgevingen zullen onderdeel uit moeten maken van de mer en de omgevingsvergunning.

### **4.6 INVESTERING EN OPERATIONELE KOSTEN**

#### **4.6.1.1 INVESTERINGSRAMING**

Op basis van:

- Een capaciteit van 50 kton as
- de procesvoering met dimensies en capaciteiten als genoemd in hoofdstuk 4,
- de concept-lay-out van een verwerkingsinrichting,
- de vereiste vestigingsvoorwaarden (vergunningen, locatie).

zijn de investeringsraming en de bedrijfsvoeringskosten bepaald. Uitgegaan is van bouwrijp, onverhard terrein. Het terrein wordt niet in eigendom verworven maar gepacht.

De raming is afkomstig van leveranciers en uit eigen inschattingen (ervaringscijfers). Voor zover de offertes niet aangevraagd of niet volledig zijn is een (aanvullende) inschatting gemaakt. Alle onderdelen zijn in een separate calculatie begroot; hetzij via een budgetofferte, hetzij door een inschatting.

Budgetoffertes op basis van een specificatie zijn ontvangen voor; terreininrichting, opslagen, gebouwen, procesinstallaties (asopslag, bulktransport en dosering), schoorsteen.

De totaalinvestering, incl. 10% onvoorzien en 20% veiligheidsmarge is 15,2 M€

#### 4.6.1.2 OPERATIONELE KOSTEN

De operationele kosten zijn bepaald zonder:

- Poorttarief as
- Aankoop aluminium
- Verkoop fosfor, slak en ferrofosfor
- Afvoer vliegas naar stort
- Rente en afschrijvingen

Deze additionele kosten worden in paragraaf 5.4 besproken en meegenomen om een inschatting te maken voor de totale business case.

TABEL 14 OVERZICHT OPERATIONELE KOSTEN VOOR EEN FULL SCALE SPODOFOS INSTALLATIE

| Operationele kosten (50.000 ton as/a)                          | k€    |
|----------------------------------------------------------------|-------|
| Elektra, gas, chemicaliën                                      | 525   |
| Personeel                                                      | 1.440 |
| Onderhoud, inhuur, service en advies, lokatiekosten, licenties | 1.602 |
| Totaal                                                         | 3.567 |

#### 4.6.1.3 GEVOELIGHEID ANDERE CAPACITEITEN

Voor de gevoeligheidsanalyse van de business case op andere verwerkingscapaciteiten zijn 25 en 75 kton per jaar gedefinieerd.

De capex en opex hiervan zijn op de volgende (versimpelde) wijze bepaald:

- Terreinoppervlak en de daarmee gemoeide inrichtingskosten is evenredig met de capaciteit vanwege de relatief grote opslagen en slakkenbedden;
- Gebouwen blijven in alle gevallen gelijk;
- De installatie is ten opzichte van de basiscase 20% lager resp. hoger in investering bij 25 en 75 kton;
- De verbruikscijfers zijn proportioneel met de verwerking;
- Het personeelsbestand verandert niet vanwege de minimale vereiste bezetting;
- De realisatiekosten (excl. installatie en civiel) blijven gelijk;
- Onvoorzien en veiligheidsmarge blijven procentueel gelijk.

De resultaten, zijn in de tabel hieronder samengevat (met de basiscase voor het vergelijk).

TABEL 15 GEVOELIGHEIDSANALYSE VAN DE INVESTERING EN OPERATIONELE KOSTEN VOOR VERSCHILLENDE SCHAALGROOTTES (DOOR AFRONDING KUNNEN OPTELVERSCHILLEN ONTSTAAN)

| Bedragen in k€                     | 25 kton/a | 50 kton/a | 75 kton/a |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Investing                          | 12.900    | 15.200    | 18.000    |
| energie                            | 260       | 530       | 790       |
| personeel                          | 1.440     | 1.440     | 1.440     |
| overig                             | 1.310     | 1.600     | 2.390     |
| Totaal operationele kosten         | 3.010     | 3.570     | 4.610     |
| Rente + afschrijvingen, €/ton as * | 62        | 38        | 30        |
| Operationele kosten, €/ton as      | 120       | 76        | 62        |

\*De hier vermelde rente en afschrijvingen zijn gebaseerd op 5% rente en afschrijvingstermijnen van 20 jaar voor civiele constructies en 8 jaar op elektromechanisch.

# 5

## ECONOMISCHE EVALUATIE

### 5.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk evalueert de economische haalbaarheid voor een Spodofos installatie zoals die beschreven is in het voorgaande hoofdstuk. Aluminium is een essentiële grondstof voor het proces en paragraaf 5.2 geeft daarom een beschrijving van de markt voor primair en secundair aluminium en analyseert de beschikbaarheid van secundair aluminium en de kosten voor de inkoop ervan. Bovendien wordt aandacht besteed aan enkele contractuele aandachtspunten. Vervolgens beschrijft paragraaf 5.3 de markten en afzetmogelijkheden voor de producten uit het Spodofos proces: slakken, ferrofosfor en het stofresidu. Het hoofdstuk sluit af met een analyse van de business case voor het proces op basis van de informatie uit de voorgaande paragrafen en de raming voor de investering en operationele kosten uit het voorgaande hoofdstuk (paragraaf 4.6).

### 5.2 BESCHIKBAARHEID VAN ALUMINIUM

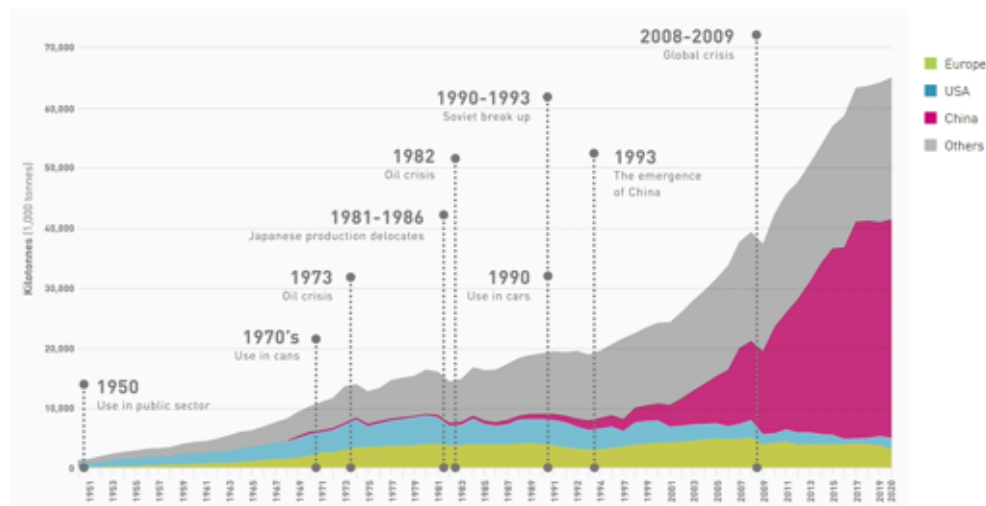
#### 5.2.1 INTRODUCTIE ALUMINIUMMARKT

125 jaar geleden begon de productie van aluminium op industriële schaal. In de afgelopen 60 jaar is de productie van primair aluminium (nieuw aluminium uit bauxieterts) 13 maal zo groot geworden, van 5 naar 65 miljoen ton per jaar. Vooral de laatste 20 jaar is de productie van primair aluminium sterk toegenomen. Anderzijds is de productie van secundair of gerecycled aluminium meer dan 30 keer toegenomen, van 1 naar 34 miljoen ton per jaar in dezelfde periode (bron: International Aluminium Institute "IAI", 2019). In de toekomst zal het aandeel van secundair aluminium in de totale productie van dit metaal blijven toenemen. Tot vandaag de dag is er 1,5 miljard ton aluminium geproduceerd en meer dan 1,1 miljard ton daarvan is nog in omloop (ongeveer 75 procent).

In 2019 werd ca. 36% van het geproduceerde aluminium in gebouwen gebruikt, 25% in elektrische kabels en machines, en 30% in transporttoepassingen. De hoeveelheid van het metaal dat momenteel in gebruik is, is ongeveer gelijk aan 24 jaar primaire aluminiumproductie.



FIGUUR 9 HISTORISCHE ALUMINIUMPRODUCTIE 1950-2019

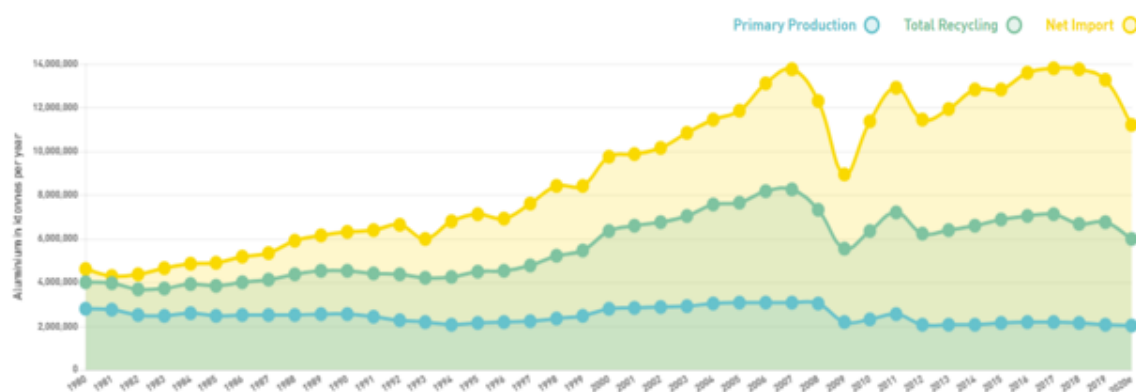


Aluminium maakt deel uit van ons dagelijks leven vanwege zijn voordelige eigenschappen zoals licht van gewicht, sterkte, recyclebaarheid, corrosiebestendigheid, duurzaamheid, vervormbaarheid en geleidingsvermogen. Deze eigenschappen maken aluminium tot een waardevol materiaal voor vele toepassingen, welke nog dagelijks toenemen.

Aan de andere kant heeft aluminium één zwak punt: de productie van primair aluminium is zeer energie-intensief. Energiekosten maken tot 40% op van de totale productiekosten van primair aluminium. De oplossing hiervoor komt van de recycling van aluminiumschroot, waarbij slechts 5% van de energie nodig is ten opzichte van de productie van primair aluminium.

Als gevolg van de hoge energiekosten en de stijgende milieukosten is de productie van primair aluminium in de EU de laatste decennia gedaald van ca. 3 miljoen ton in 1980 naar ca. 2 miljoen ton in 2019 (bron: European Aluminium Association “EAA”).

FIGUUR 10 PRODUCTIE, RECYCLING EN IMPORT VAN ALUMINIUM IN EUROPA, BRON: EAA (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION)

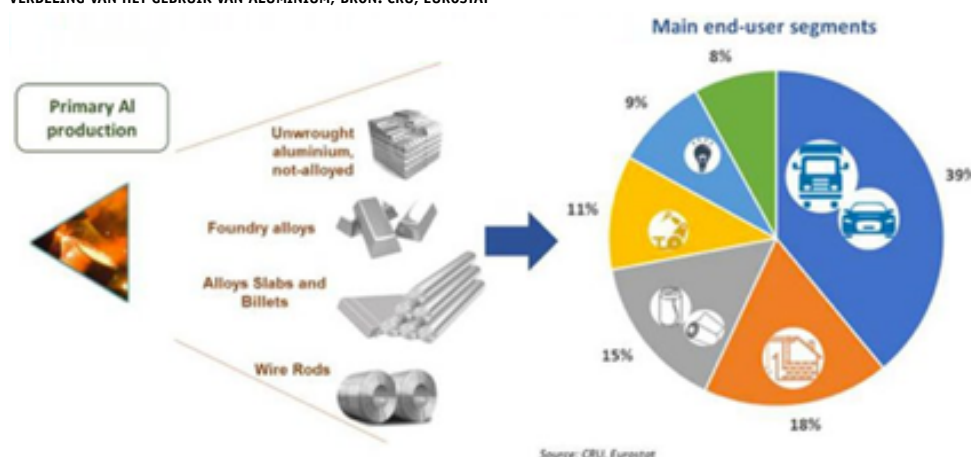


Tegelijkertijd is de vraag naar aluminium in de EU toegenomen. Hieraan wordt voldaan uit twee bronnen: de invoer van primair aluminium van buiten de EU, en de recycling van secundair aluminium. In 2019 bedroeg de netto-invoer van primair aluminium ca. 4 miljoen ton en werd meer dan 6 miljoen ton aluminiumschroot gerecycled.

In 2018 werd in de Europese Unie 38% van het aluminium verbruikt door de vervoersector (auto's, vrachtwagens, treinen en vliegtuigen), 18% door de bouwsector, 15% door de verpakingsindustrie en de rest door de machinebouw en andere bedrijfstakken.

FIGUUR 11

VERDELING VAN HET GEBRUIK VAN ALUMINIUM, BRON: CRU, EUROSTAT



Alle bovengenoemde sectoren produceren niet alleen halfproducten of producten, maar ook waardevolle materiaalresten die kunnen worden gebruikt voor recycling (pre-consument), nieuwe productie, of andere toepassingen (zoals het Spodofos-proces). De andere secundaire aluminiumstroom is post-consument schroot (uit producten die het einde van de levenscyclus hebben bereikt).

Bovendien is het belangrijk dat aluminium een belangrijke rol zal spelen in het EU-beleid voor een circulaire economie om volgens de doelstellingen van de EU, voor 2030 de CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen (inclusief ambitieuze doelstellingen voor de auto-industrie, zoals vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot per km). De verwachting is dat aluminium een belangrijke invulling zal geven aan de overgang naar een klimaatneutrale en circulaire economie in Europa.

Een aantal prognoses uit het rapport van de EAA:

- Op basis van het voorspelde verbruik zal de hoeveelheid post-consument aluminium dat voor recycling beschikbaar is tegen 2050 meer dan verdubbelen: van 3,6 miljoen ton in 2019 naar 8,6 miljoen ton in 2050.
- Halverwege deze eeuw zou 50% van onze behoefte aan aluminium kunnen worden geleverd vanuit recycling van post-consument schroot. Op dit moment vertegenwoordigt secundair aluminium 36% van het aanbod van aluminiummetaal in Europa.
- Volgens schattingen zou aluminiumrecycling de CO<sub>2</sub>-uitstoot tegen 2050 met maximaal 39 miljoen ton per jaar kunnen verminderen, wat overeenkomt met een vermindering van 46% CO<sub>2</sub> per jaar in 2050. Dit wordt voornamelijk bereikt door de invoer van koolstofintensief primair aluminium te vervangen door post-consument aluminium uit de EU.
- Als gevolg van dit hoge recyclingscenario zou ook het volume geïmporteerd aluminium afnemen dat in Europa verkocht wordt, waardoor Europa minder afhankelijk wordt van invoer. Dit levert de Europese economie 6 miljard Euro per jaar op.

## RESUMÉ:

- Aluminium is vanwege unieke eigenschappen een metaal met groeipotentieel.
- Er is nog steeds meer dan 1,1 miljard ton aan aluminiumproducten in gebruik, dat gedurende de komende decennia zal worden gerecycled.
- Het aandeel van aluminiumrecycling in de totale aluminiumproductie zal toenemen omdat het minder energie-intensief is. (Daarom wordt gezegd dat aluminiumschroot bevroren energie heeft.)
- Door de relatief hoge energiekosten en het klimaatneutrale beleid moet Europa het aandeel van recycling in de totale aluminiumproductie sneller verhogen dan de rest van de wereld
- Van secundair aluminium is de automobiellindustrie een van de grootste verbruikers.

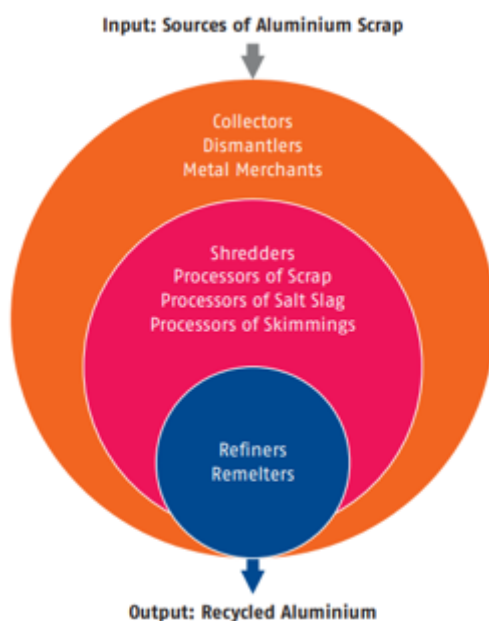
### 5.2.2 ALUMINIUMSCHROOT IN DE EUROPESE UNIE

De belangrijkste speler bij het gebruik van aluminiumschroot is de recyclingindustrie, die zowel refiners als remelters omvat. Zij behandelen aluminiumschroot en vormen het om tot een gestandaardiseerde aluminiumkwaliteit. Refiners (die gietlegeringen uit schroot produceren) en remelters (die smeedlegeringen uit schroot produceren) spelen een kernrol bij de recycling van aluminium, maar zij zijn op hun beurt afhankelijk van andere schakels in de keten. Zonder de inzamelaars, demontagebedrijven, metaalhandelaars en schrootverwerkers, die zich bezighouden met de inzameling en verwerking van schroot, zouden zij hun rol immers niet kunnen vervullen. De metaalhandelaren zijn ook verantwoordelijk voor de afhandeling van het grootste deel van de buitenlandse handel in aluminiumschroot.

Er zijn duizenden kleine schrootinzamelaars en honderden schrootverwerkingsinstallaties en -handelsbedrijven in de EU. Voor een overzicht van de installaties in de EU die werken met gemengde materialen/bodemas inclusief aluminium uit verbrandingsovens: zie de kaart te vinden via de link in de voetnoot<sup>2</sup>.

FIGUUR 12

STRUCTUUR VAN DE ALUMINIUM RECYCLING INDUSTRY, BRON: EAA EN OEA (ORGANISATION OF EUROPEAN ALUMINIUM REFINERS AND REMELTERS)



<sup>2</sup> <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1TniW0ZHkLiGcOkMyYtWfQG1--TtV3god&ll=50.80441416780855%2C8.849708150000016&z=5>

Voor het Spodofos-proces is het belangrijk om te weten welke concurrenten er zijn voor aluminiumschroot, omdat deze sector een aanzienlijke invloed heeft op de schrootprijzen. Jaarlijks wordt in de Europese Unie ongeveer 8 miljoen ton aluminiumschroot geproduceerd (volgens gegevens van de EAA). In het algemeen maakt de markt een onderscheid tussen gesmeed en gegoten aluminiumschroot. De tweede classificatie is pre-consument (tijdens productie) en post-consument (einde levensduur) schroot.

Smeedbaar aluminiumschroot bestaat onder andere uit:

- profielen (geëxtrudeerde producten)
- platen (gewalste producten)
- lithografische platen
- boor- en draaikrullen
- dros (granulaat, aluminiumhoudend productieafval ontstaan uit smeltprocessen)

Gietbaar aluminiumschroot bestaat onder andere uit:

- gietstukken
- Zorba (geshred non-ferroschroot uit de automobiel- en elektronicarecycling)
- twitch (aluminiumrijk Zorba dat overblijft na verwijdering van andere metalen)
- boor- en draaikrullen van gietstukken
- aluminium uit afvalverbrandingsovens
- dros (granulaat)
- velgen

Van de 8 miljoen ton aluminiumschroot is ongeveer 5,2 miljoen ton gesmeed schroot en 2,7 miljoen ton gietschroot, of anders gezegd: 5,9 miljoen ton pre-consumentenschroot en 2,1 miljoen ton post-consumentenschroot. Deze hoeveelheden zijn in de volgende tabel weergegeven voor 2019, dat door de pandemie meer representatief is dan 2020.

TABEL 16 ALUMINIUM SCHROOT PER SOORT, JAARLIJKE HOEVEELHEDEN

| Jaar | Aluminium schroot per soort in kton |          |        |
|------|-------------------------------------|----------|--------|
|      | smeedbaar                           | gietbaar | totaal |
| 2017 | 5.093                               | 2.851    | 7.944  |
| 2018 | 5.351                               | 2.649    | 8.000  |
| 2019 | 5.229                               | 2.719    | 7.948  |
| 2020 | 4.933                               | 2.377    | 7.310  |

TABEL 17 ALUMINIUM SCHROOT PER HERKOMST, JAARLIJKE HOEVEELHEDEN

| Jaar | Aluminium schroot per herkomst in kton |               |        |
|------|----------------------------------------|---------------|--------|
|      | pre-consumer                           | post-consumer | totaal |
| 2017 | 5.694                                  | 2.250         | 7.944  |
| 2018 | 5.918                                  | 2.082         | 8.000  |
| 2019 | 5.850                                  | 2.098         | 7.948  |
| 2020 | 4.365                                  | 1.945         | 7.310  |

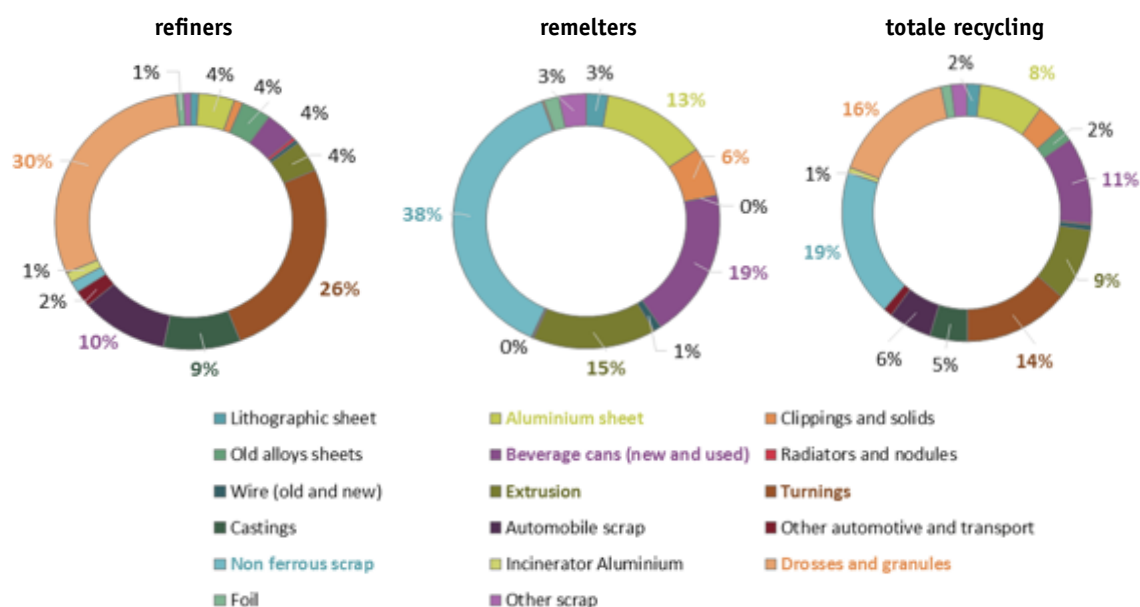
### 5.2.2.1 SCHATTINGEN VAN HET JAARLIJKSE EU ALUMINIUM SCHROOTVOLUME

Bron A: European Aluminium Association

In 2016 presenteerde de EAA een rapport met statistieken van “schrootinname door refineries en remelters in de EU” en de EFTA-landen. Er zijn op dat gebied geen geactualiseerde gegevens. Qua materiaal onderscheidde men 17 schrootcategorieën, in sommige gevallen zonder strikte definitie, zoals non-ferroschroot, autoschroot of transportschroot. Dit maakt het onmogelijk om goed te bepalen wat voor type schroot precies onder die categorieën valt.

De onderstaande grafieken geven een overzicht van de geschatte hoeveelheden in procenten van elke categorie aluminiumschroot die door refineries en remelters in de productieprocessen werden gebruikt, en het cumulatieve totale recyclingpercentage in 2015.

FIGUUR 13 SCHROOTPRODUCTIESTATISTIEKEN (DATA UIT 2015 VAN EAA (EU+EFTA))

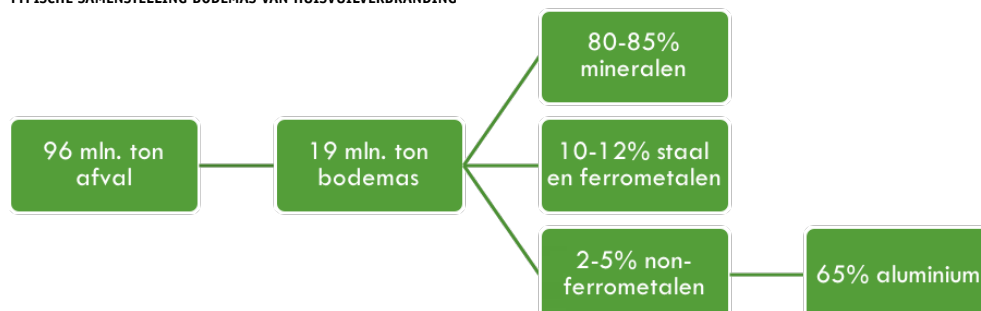


Bron B: Confederatie van Europese afvalenergiecentrales (CEWEP)

Op basis van deze bron uit 2017 werd ongeveer 96 miljoen ton afval (gemeentelijk, commercieel en industrieel) verwerkt in Waste-to-Energy-installaties in Europa. Het verbrandingsproces leverde ongeveer 19 miljoen ton bodemas op. In het residu zitten belangrijke hoeveelheden metalen en mineralen en deze kunnen worden opgewerkt voor recycling.

De jaarlijkse Europese productie van bodemas omvatte in 2017 ca. 19 miljoen ton. De samenstelling van bodemas wordt hieronder weergegeven.

FIGUUR 14 TYPISCHE SAMENSTELLING BODEMAS VAN HUISVUILVERBRANDING



Aluminium dat uit bodemas wordt teruggewonnen, wordt hoofdzakelijk gebruikt voor de productie van aluminiumgietlegeringen voor de automobiellindustrie.

Aan de hand van de EAA- en CEWEP-bronnen kan een schatting gemaakt worden van de hoeveelheden en soorten aluminiumschroot die op de Europese markt beschikbaar zijn.

**TABEL 18 OVERZICHT HOEVEELHEDEN EN SOORTEN ALUMINIUMSCHROOT (BRONNEN EAA EN CEWEP)**

|                                                | Productie [kt]           | Beschikbaar op de markt [kt] |
|------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Draaikrullen <sup>a)</sup>                     | 900 – 1.050              | 600 – 750                    |
| Aluminium uit verbrandingsovens <sup>a)</sup>  | 245 – 600                | 245 – 600                    |
| Dros en granulaat <sup>a)</sup>                | 1.200                    | 700 – 800                    |
| Materiaal uit aluminiumshredders <sup>b)</sup> | nb                       | nb                           |
| Totale schatting                               | 2.345 – 2.850 + shredder | 1.545 – 2.150 + shredder     |

a. Van alle schrootcategorieën behalve uit shredders is er maar een gedeelte beschikbaar op de markt, omdat remelters en refiners deze gedeeltelijk in gesloten kringloopsystemen verwerken.

b. Het is niet mogelijk de beschikbare hoeveelheid materiaal uit aluminiumshredders in te schatten omdat de maandelijkse of jaarlijkse productie rechtstreeks afhankelijk is van de rentabiliteit van het proces bij de fabrikant. Dit is op zijn beurt afhankelijk van de vraag naar dit materiaal door remelters en refiners, en deze wordt bepaald door de verkoopprijzen van aluminiumlegeringen.

Rekening houdend met het totale aluminiumschroot dat in het Spodofos-proces wordt verwacht (12.000 ton per jaar) lijkt het geen probleem te zijn om de bovengenoemde hoeveelheden aan te trekken: 12.000 ton is slechts 0,15% van het totale in de EU beschikbare schroot.

Tijdens de eerste evaluatie en schatting van ThermusP van het soort schroot dat het meest geschikt is voor het Spodofos-procesproject werden aluminium draaikrullen aangewezen, om twee redenen:

- vorm en oppervlak;
- de beste prijsverhouding met betrekking tot de verwachtingen van het project.

Er zijn echter geen officiële bijgewerkte gegevens over de hoeveelheid aluminiumkrullen die per jaar wordt geproduceerd. De EAA liet uit eigen schatting zien dat 14% van het aluminiumschroot dat door refiners en remelters in de EU wordt gebruikt uit aluminiumkrullen bestond (uit gegevens van 2015). Dit zou kunnen betekenen dat er in het jaar 2015 ca. 1 mln. ton draaikrullen beschikbaar waren.

Een eigen berekening laat een lagere hoeveelheid zien - 0,9 mln. ton draaikrullen in 2019. Het is daarbij belangrijk om te vermelden dat een deel van de gegenereerde draaikrullen niet op de markt beschikbaar is (een aantal producenten van extrusieproducten en velgen hergebruiken draaikrullen in hun productieproces met behulp van een gesloten kringloop-systeem). Op basis hiervan kan worden geschat dat jaarlijks ongeveer 0,6 miljoen ton op de markt beschikbaar is.

Als deze schatting juist is, zou dat betekenen dat voor het Spodofos-proces ongeveer 2% van de genoemde hoeveelheid materiaal in de markt nodig is.

ThermusP is geadviseerd om het project te diversifiëren wat het type aluminiumschroot betreft. Andere in aanmerking komende schrootsoorten zijn granulaat uit dros en aluminium uit verbrandingsovens.

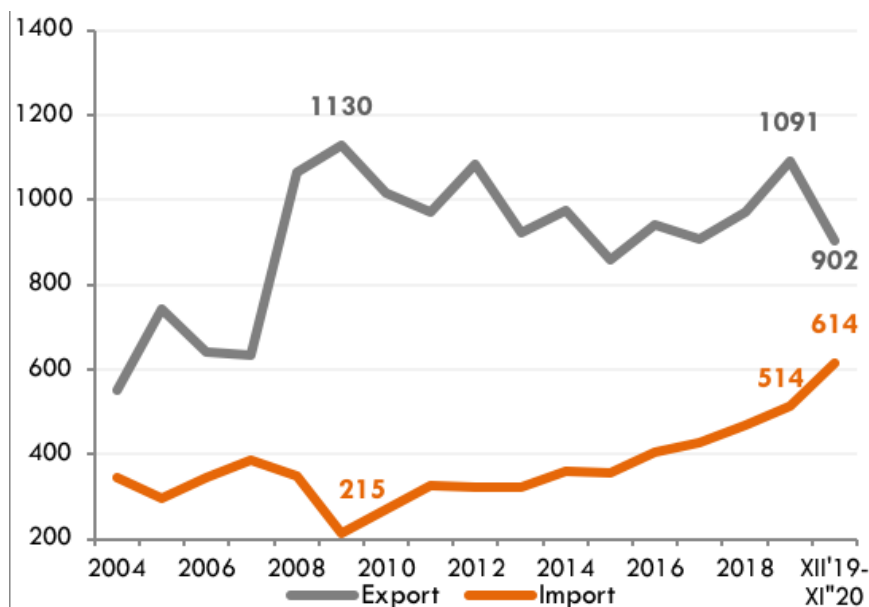
Volgens de bron van EAA is er 16% dros en granulaat beschikbaar en 8% aluminium uit verbrandingsovens. Tezamen vertegenwoordigen deze drie soorten aluminiumschroot (draaikrullen, dros en granulaat, en aluminium uit verbranding) ca. 40% van het beschikbare schroot. Deze soorten vormen in het kader van het Spodofos-proces de diversificatie van het grondstofmateriaal.

Belangrijk is dat de Europese Unie ook aluminiumschroot exporteert. Jaarlijks wordt ca. 1 miljoen ton aluminiumschroot geëxporteerd, hoofdzakelijk naar Azië, en met name naar India en China. Als gevolg hiervan kan dit in bepaalde perioden van het jaar een invloed hebben op de beschikbaarheid en de prijzen van aluminiumschroot, als de vraag naar schroot van buiten Europa toeneemt. Met als gevolg lagere hoeveelheden voor Europese afnemers en hogere prijzen. Historisch gezien zijn dergelijke effecten van korte duur.

De volgende figuur laat zien dat de EU een netto-exporteur is, wat ook van invloed is op de schrootprijzen, met inbegrip van draaikrullen.

FIGUUR 15

HANDEL IN ALUMINIUMSCHROOT IN DE EU VANAF 2004 IN KTON, BRON: EUROSTAT



#### RESUMÉ:

Er is per jaar ca. 8 miljoen ton aluminiumschroot beschikbaar in de EU, waarvan 1 miljoen ton wordt geëxporteerd. De Europese markt voor aluminiumschroot is onderdeel van de wereldmarkt en aluminiumschroot wordt zowel binnen als buiten Europa door leveranciers ingezameld en verkocht.

Een groot deel van het smeedschroot en de draaikrullen (van ongemengde kwaliteit) wordt intern gebruikt door producenten van aluminiumonderdelen in een gesloten recyclesysteem en komt dus niet op de markt. Daarnaast hebben refiners en remelters en de omvang van de export een directe invloed op de prijzen van draaikrullen.

Voor het Spodofos proces moet men streven naar de inzet van meer dan één soort aluminiumschroot. Daarnaast wordt ook diversificatie van de leveranciers aanbevolen. Wel is er in de Europese Unie voldoende aluminiumschroot beschikbaar om in de behoeften van Spodofos te voorzien (12.000 ton op een totaal van 1.545.000-2.150.000 ton per jaar, oftewel minder

dan 1%). Daarnaast zijn er binnen een straal van ongeveer 500 km rond Utrecht, meer dan honderd potentiële leveranciers met voldoende beschikbaarheid van aluminiumschroot.

### 5.2.3 COMMERCIELE ASPECTEN

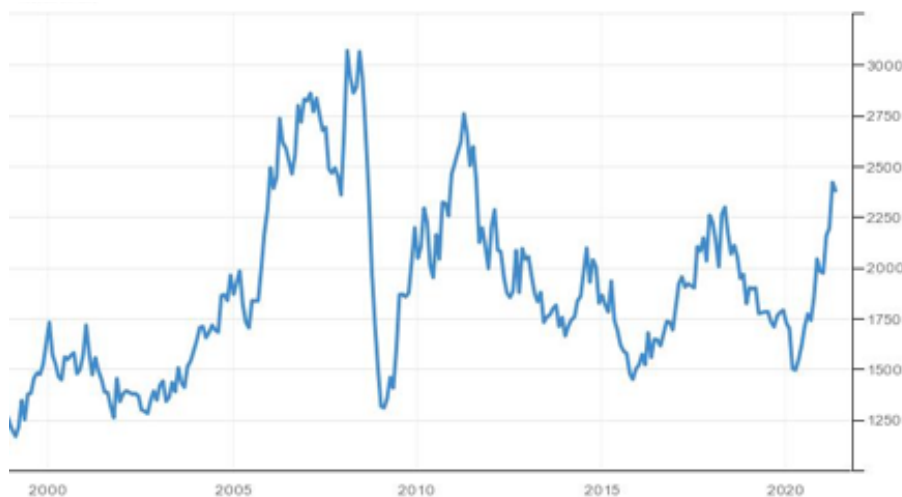
Zoals in het vorige deel van het rapport is uiteengezet, is aluminiumschroot niet alleen in Europa een zeer gewild materiaal, maar wordt het ook wereldwijd verhandeld. Dit is van belang voor de prijsvorming van deze grondstof.

Over het algemeen zijn de prijzen van aluminiumschroot een afgeleide van:

- de notering van primair (High Grade) aluminium op de London Metal Exchange (LME);
- de aankooppremie van bovengenoemd aluminium;
- de kwaliteit van aluminiumschroot (pre-consument of post-consument);
- de chemische samenstelling van aluminiumschroot;
- het metallurgisch rendement (welke afhankelijk is van de recyclingtechnologie) dat wordt verwacht van een bepaalde soort aluminiumschroot;
- de marktomstandigheden in een bepaalde periode, waaronder de beschikbaarheid van schrootmateriaal;
- de vraag naar aluminiumlegeringen in de automobiel-, de bouw-, en de verpakkingsindustrie.

Omdat veel aspecten van invloed zijn op de prijs van aluminiumschroot is het onmogelijk te voorspellen op welk niveau de prijzen van bepaalde soorten aluminiumschroot (met inbegrip van aluminiumdraaikrullen) in de toekomst zullen liggen. Op langere termijn kunnen de LME HG-noteringen ook voor aluminiumschroot een bepalende factor zijn voor de trend van het prijsverloop. Onderstaande grafiek toont 25-jaars aluminium High Grade notering op LME (bron: tradingeconomics.com)

FIGUUR 16 25-JAARS ALUMINIUM HIGH GRADE NOTERING OP DE LONDON METAL EXCHANGE (BRON: TRADINGECONOMICS.COM)



Naast de LME HG bestaat het instituut Fastmarkets (eerder Metal Bulletin), dat wekelijks geselecteerde gegevens verzamelt over de huidige prijzen van aluminiumlegeringen en sommige soorten aluminiumschroot, waaronder gemengd aluminiumschroot. Dergelijke gegevens kunnen ook een referentie zijn voor de analyse van gecontracteerde schrootprijzen, maar bevatten niet de tonnages die in contracten zijn vastgelegd.



Door gebruik te maken van zowel de LME HG-noteringen als de gegevens van Metal Bulletin, is een analyse gemaakt van de prijzen van gemengde aluminiumkrullen ten opzichte van LME HG mogelijk. De geanalyseerde periode loopt van januari 2010 tot maart 2021.

Op de lange termijn bedroeg de gemiddelde aankoopprijs van gemengde aluminiumkrullen 65% van de LME HG-prijs voor primair aluminium. Er zijn echter perioden geweest waarin deze prijs het maximumniveau van 85% van de LME HG-noteringen (in 2013) en het minimumniveau van 40% van de LME HG-noteringen (in 2019) bereikte. Dit illustreert hoe sterk deze graadmeter kan variëren.

De analyse toont ook trends in de prijsindex van draaikrullen ten opzichte van de LME HG-notering. Van 2010 tot 2013 steeg de index en vanaf 2014 daalde hij systematisch tot 47% in 2019. Dit is echter geen constante trend omdat de vraag van de aluminiumindustrie toeneemt. De trendombuiging vond plaats in 2020 en versterkte zich in het eerste kwartaal van 2021.

Een soortgelijke volatiliteit kan worden waargenomen bij het analyseren van de absolute waarde van de prijs van gemengde aluminiumkrullen. In de geanalyseerde periode bedroeg de hoogste prijs € 1.235 per ton (in 2014), terwijl het minimumniveau in 2019 € 635 per ton bedroeg. De gemiddelde aankoopprijs van deze grondstof in deze lange periode bedroeg € 1.025 per ton. Mogelijk is dit de waarde waarmee rekening gehouden moet worden voor de analyse van de business case van het Spodofos-proces.

Een andere kwestie is de wijze waarop een contract voor de aankoop van aluminiumschroot tot stand komt. De algemene werkwijze is via spotcontracten met een vaste aankoopprijs, een overeengekomen hoeveelheid en een leveringsdatum. De leveringstermijn is daarbij vrij kort: in de maand van het contract of maximaal één of twee maanden later. Het is zeer moeilijk een langer contract te sluiten, bijvoorbeeld voor een jaar, om niet te spreken van langetermijncontracten.

Een moeilijkheid is de wijze waarop de verkoopprijs wordt vastgesteld. Handelaren in schroot zijn niet geïnteresseerd in het sluiten van langere contracten omdat hun basisprijs voor aluminiumschroot veelal de spotprijs is. Een voorstel om schroot te kopen met een prijs die gebaseerd is op een prijsformule, bijvoorbeeld een percentage van de LME HG-notering of een formule gebaseerd op de noteringen van Metal Bulletin, is voor schroothandelaars niet interessant. Dit zal dan ook een complicatie vormen voor een correcte beoordeling van de risico's die aan het Spodofos-project verbonden zijn.

#### **TRANSPORTKOSTEN VOOR DE AANKOOP VAN ALUMINIUMSCHROOT**

Over het algemeen is de meest gebruikelijke regel dat de vervoerskosten in de aankoopprijs van schroot zijn inbegrepen: basis DAP (Incoterms 2020). De transportkosten bedragen € 10/t, als de afstand beperkt is, ca. 100-200 km, en € 40 - € 50/t indien de afstand ca. 1.000 km bedraagt.

Het is ook mogelijk materiaal te kopen op basis van FCA (vanaf de plaats van vestiging van de leverancier, inclusief laden), maar het bedrijf dat materiaal koopt, moet op logistiek gebied efficiënt zijn om de transportkosten te kunnen drukken.

## RESUMÉ:

De schrootprijzen van aluminium op lange termijn en de voorwaarden van de aankoopcontracten zijn hier de meest kritieke punten in het Spodofos-project. Diversificatie in de schrootleveranciersbasis moet het mogelijk maken altijd marktprijzen te hanteren en kleinere hoeveelheden aluminiumschroot op één plaats te kopen, zodat leveranciers geen hogere prijs zullen verwachten.

### 5.2.4 KWALITEIT VAN ALUMINIUMSCHROOT – BEOORDELINGSSYSTEEM

Er zijn officiële regels met betrekking tot de vereiste kwaliteit van aluminiumschroot dat wordt verkocht. Als algemene regel voor stukken aluminiumschroot geldt dat de totale hoeveelheid onzuiverheden niet meer dan 3% mag bedragen, waaronder 1% vrij ijzer en 2% niet-metallische onzuiverheden. Voor aluminiumkrulschroot is de maximaal toelaatbare hoeveelheid onzuiverheden 5%, met inbegrip van vocht, vrij ijzer en stof.

Deze toelaatbare gehalten aan onzuiverheden betekenen dat als het materiaal aan deze eisen voldoet, het moet worden aangekocht zonder correctie op de vastgestelde prijs. Onzuiverheden die deze aanvaardbare niveaus overschrijden, verlagen de prijs of verminderen het gewicht van de aankoop.

Bovendien:

- mag het schroot geen explosieve of gevaarlijke materialen bevatten; informatie hierover moet in de leveringsdocumenten worden opgenomen;
- moet de leverancier op de documenten bevestigen dat het geleverde schroot een productie-technische afvalstof is of uit handel afkomstig;
- moet het schroot worden geleverd met transportmiddelen die het vervoerde materiaal beschermen tegen negatieve effecten op het milieu.

Wanneer de aankoop van aluminiumschroot begint, dient ThermusP een kwaliteitscontrolesysteem van het aangekochte aluminiumschroot te hebben ontwikkeld en ingevoerd, en het personeel daarvoor te hebben opgeleid.

De kwaliteit van het materiaal moet worden gecontroleerd wanneer de leverancier het schroot aflevert; wanneer het schroot nog niet van de vrachtwagen gelost is (in het geval van draaikrullen of korrels), of tijdens het lossen (in het geval van schroot in stukken).

Afhankelijk van het soort aluminiumschroot dat wordt geleverd, worden handmonsters van een paar kilogrammen genomen (in het geval van aluminiumkrullen of granulaat) tot zelfs enkele tientallen kilo's materiaal (in het geval van grote stukken schroot).

Voorbeeldbemonstering: een monstername van een gewicht van minimaal 2 kg wordt afgenomen van ten minste twee verschillende plaatsen (bovenste 50%, 50% van de bodem van de levering). Als de controleur tijdens het lossen vaststelt dat het materiaal in lagen geladen is en een kwalitatief verschil tussen de lagen ziet, dan wordt het monster genomen van de laag van de laagste kwaliteit.

De kwalitatieve beoordeling wordt uitgevoerd door een algemene visuele beoordeling van het geleverde materiaal bij lossen. Er wordt nagegaan of het aluminiumschroot geen andere materialen bevat (zoals hout, papier, folie, rubber, enz.) en of er geen gevaarlijke materialen aanwezig zijn.

Wanneer nodig kan er een laboratoriuminspectie plaatsvinden. Voor deze inspectie moet een laboratorium uitgerust zijn met:

- een magneet (om vrij ijzer te extraheren);
- een laboratoriumdroger (om vocht te verwijderen);
- een set zeven (om kleine niet-metallische onzuiverheden te verwijderen).

Om de chemische samenstelling van geleverd aluminiumschroot en het bijbehorende reactierendement te controleren, kan het noodzakelijk zijn om toegang te hebben tot een (elektrische) smeltoven met een capaciteit van enkele honderden kilo's (met inbegrip van mallen) om vloeibaar metaal in vaste vorm te gieten.

De chemische samenstelling wordt gecontroleerd met behulp van een spectrometer. De metaalopbrengst wordt berekend door de volgende formule toe te passen:

$$\text{hoeveelheid materiaal dat de smeltoven ingaat} + \text{technologisch zout} - \text{verwijderde dros} = \text{metaalopbrengst}$$

#### RESUMÉ:

Er bestaan algemene EU-normen en regels voor de kwalificatie en controle van de kwaliteit van aluminiumschroot. Daarom zal het nodig zijn om te investeren in een eigen kwaliteit-laboratorium of kan overwogen een contract te sluiten voor de uitbesteding van dit soort diensten. Alle procedures en instructies voor het kwalificeren en controleren van de kwaliteit van schroot moeten worden ontwikkeld, maar pas nadat is vastgesteld welke soorten aluminiumschroot gebruik worden in het Spodofos-project.

Aangezien aluminiumschroot als afvalstof wordt behandeld, moet ThermusP beschikken over een passende milieuvergunning (met passende afvalcodes) die de aankoop, de opslag en het gebruik van aluminiumschroot in het proces mogelijk maakt.

#### 5.2.5 SAMENVATTING

Het Spodofos proces heeft per jaar ongeveer 12.000 ton aluminiumschroot nodig. Voor deze hoeveelheid kunnen de volgende conclusies worden getrokken over de beschikbaarheid en kwaliteit van aluminiumschroot.

- Er is voldoende aluminiumschroot in de EU om in de behoefte te voorzien zonder dat dit een negatieve invloed heeft op de bestaande markt. De kwaliteit aluminiumschroot die geschikt is voor het Spodofos-proces (draaikrullen, korrels uit dros en aluminium uit verbrandingsovens) maakt momenteel 40% van de op de markt beschikbare hoeveelheid aluminiumschroot.
- Er zijn meer dan voldoende potentiële schrootleveranciers in de onmiddellijke nabijheid van de geplande locatie van het Spodofos-project (Nederland), en in een straal van 500 km rond Utrecht is er voldoende aanbod voor het gevraagde schroot (met bijna 100 actieve leveranciers van aluminiumschroot).
- Het Spodofos proces moet zich er niet alleen richten op één soort aluminiumschroot om te verwerken, maar moet ook andere soorten schroot aantrekken.
- Het is aan te bevelen een zeer goed gediversifieerde lijst van leveranciers hebben om de risico's met betrekking tot de aan te trekken hoeveelheid aluminiumschroot en de prijs van het schroot te minimaliseren.
- Voor de acceptatie en verwerving van aluminiumschroot zijn milieuvergunningen nodig.
- Het is belangrijk een kwaliteitscontrolesysteem voor aluminiumschroot te ontwikkelen.

## 5.3 MARKT VOOR SPODOFOS PRODUCTEN

### 5.3.1 INLEIDING

In het Spodofosproces ontstaan bij de aluminothermische reductie van zuiveringsslibas de volgende stoffen:

- Witte fosfor (0,05-0,11 t/t as);
- Ferrofosfor (0,08-0,12 t/t as) ;
- Minerale slak (1,0 – 1,2 t/t as) ;
- Stof (<0,05 t/t as).

De volgende paragrafen beschrijven de markt voor deze producten.

### 5.3.2 WITTE FOSFOR

Witte fosfor wordt als “building block” toegepast bij de productie van brandvertragers, smeermiddeladditieven, gewasbeschermingsmiddelen, elektrolyten voor lithiumaccu's, katalysatorliganden en nog veel meer specialistische toepassingen. Via enkele tussenstappen, te beginnen met fosforchlorides, oxide of sulfide, bereikt men deze eindproducten, waarbij het element fosfor in een – vaak organisch – molecuul terecht komt. Deze zijn alleen via het element fosfor te produceren.

Daarnaast wordt in Europa fosfor ook verbrand en gehydrolyseerd, waarbij zeer zuiver fosforzuur ontstaat, het zgn. thermisch fosforzuur. Dit wordt gebruikt voor de productie van voedseladditieven (fosfaat-zouten), in frisdranken en als metaalbeitsmiddel. Zuiver fosforzuur kan ook worden verkregen via een geheel andere route, te weten het extractief reinigen van kunstmest-fosforzuur (het zogenaamde MGA, Merchant Grade Acid) dat van nature enkele procenten verontreinigingen bevat, zoals sulfaat, ijzer, magnesium en aluminium, maar ook cadmium en uranium. Via een reeks extractiestappen kan dit materiaal worden gereinigd tot het voor de bovengenoemde toepassingen geschikt is. Voor deze markt staan de beide routes in directe concurrentie, en is niet per se elementair fosfor noodzakelijk.

De markt voor fosfor in Europa is overzichtelijk. Er zijn ongeveer een tiental klanten. De gezamenlijke P-behoefte is sinds 2010 redelijk stabiel, de meeste producten zijn rijp, met een duidelijk gedefinieerde markt. De behoefte aan eindproducten op basis van elementaire fosfor wordt overigens niet alleen gedekt door leveringen van fosfor: een aantal halffabricaten worden ook geïmporteerd, zoals PMIDA (intermediair voor glyfosaat), thermisch zuur, en natriumhypofosfiet.

De grootste klanten geven aan dat ze een tot nu toe on vervulde wens hebben om duurzamer beleid te gaan voeren m.b.t. onder andere hun grondstoffen. Het Spodofosproces kan in deze behoefte voorzien. Verwacht wordt dat duurzaam geproduceerde fosfor bij gelijk prijsniveau duidelijk de voorkeur zal genieten.

Alle fosfor in Europa komt uit Vietnam en Kazachstan. China is historisch belangrijk als fosforexporteur, maar er is sinds de jaren 2000 een zware exporttax op fosfor vanuit China gelegd (20%), omdat de overheid niet wenst dat dit energie-intensieve product als basisgrondstof het land verlaat. Het gevolg is dat China nauwelijks nog fosfor exporteert (Tabel 19) maar wel een aantal lokaal geproduceerde derivaten exporteert, zoals het genoemde PMIDA, vlamvertragers en natriumhyposfosfiet, waar geen exporttax op zit.

Vanuit Vietnam bereikt ca 15 kt/j de EU, uit Kazachstan komt 50-60 kt/j fosfor de EU binnen (een getal van 60 zoals sinds 2018 wordt gerapporteerd lijkt iets te veel, bovendien wordt er iets naar de VS doorverhandeld). Van die laatste wordt 30 kt/j in thermisch zuur omgezet door twee bedrijven in Centraal/Oost Europa. Deze markt zit behoorlijk dicht. De markt voor “ware” fosfortoepassingen in de EU is dus 40-45 kt/j (Tabel 19). Hierbij komt nog een kleine klant in Zwitserland (1 kt/j).

De grootste klanten in Europa voor fosfor (excl. thermisch zuur) zijn in afnemende volgorde van fosforgebruik Italmatch, Clariant, ICL, Lanxess, Perimeter, Solvay UK, PCC Rokita, Febex.

De prijs voor fosfor uit EU-tradestats is weergegeven in Tabel 20. De eerste drie kolommen zijn importen, de laatste twee zijn doorverkopen binnen de EU vanuit de twee meest relevante landen: Nederland (trader, Vietnamese fosfor) en Polen (hub voor Kazachse fosfor). Deze laatste zijn representatief voor “de” prijs van witte fosfor ter plaatse van een hub voor fosfor niet al te ver van de eindklant. Dit komt gemiddeld op ca 2.750 /t uit voor beide soorten.

In 2020-2021 is door de pandemie de transportsector stevig uit balans geraakt waardoor er tijdelijk 200€/t extra transportkosten uit Vietnam zijn.

De vraag is in hoeverre Spodofos-fosfor evenveel waard is als Kazachse of Vietnamese fosfor, gezien het ruwweg dubbele arseengehalte t.o.v. Kazachstan (of zevenmaal t.o.v. Vietnam). Verwacht wordt dat dit vooral de markt enigszins beperkt maar nauwelijks op de waarde invloed heeft. De grootste klanten hebben voor het leeuwendeel van hun verbruik geen a priori onmogelijkheden om deze fosfor in te zetten. Mogelijk leidt dit i.v.m. hogere afvalproductie wel tot een lichte prijscorrectie. Dit dient met de afnemers uitgezocht te worden. Uit gesprekken met de twee grootverbruikers in de EU lijkt een te realiseren prijs van 2.900,- /ton af werk realistisch.

**TABEL 19** IMPORTVOLUMES VAN FOSFOR, EX EU (EERSTE DRIE KOLOMMEN), EN INTERNE EXPORTVOLUMES VOOR TWEE CRUCIALE EU-LANDEN; EU-27 [BRON: EU TRADESTATS: MADB]

| jaar | China | Kazachstan | Vietnam | trade VN via NL | trade KZ via Polen |
|------|-------|------------|---------|-----------------|--------------------|
| 2010 | 8,7   | 25,7       | 1,2     | 18,6*           | 2,5                |
| 2011 | 5,3   | 34,0       | 1,6     | 3,5*            | 0,0                |
| 2012 | 1,8   | 29,3       | 2,0     | 3,9*            | 0,0                |
| 2013 | 6,3   | 37,2       | 3,4     | 0,1             | 0,0                |
| 2014 | 5,4   | 42,4       | 9,3     | 0,5             | 7,6                |
| 2015 | 3,7   | 36,7       | 12,2    | 0,5             | 8,2                |
| 2016 | 4,3   | 28,1       | 17,6    | 1,1             | 8,2                |
| 2017 | 3,6   | 34,4       | 20,5    | 2,9             | 9,2                |
| 2018 | 1,4   | 61,9       | 15,1    | 6,2             | 9,4                |
| 2019 | 1,4   | 59,5       | 17,4    | 8,8             | 9,8                |
| 2020 | 0,6   | 60,5       | 16,5    | 3,9             | 8,5                |

\*Tot 2012: ook fosfor van Thermphos

\*\*UK: fosfor recent 0,5 kt/y

TABEL 20

IMPORTPRIJZEN VAN FOSFOR (GELEVERD GRENS EU, PLM. FOB); CURSIEF: VERDACHTE UITBIJTERS

| jaar | China | Kazakstan | Vietnam | trade via NL (VN) | trade via Polen (KZ) |
|------|-------|-----------|---------|-------------------|----------------------|
| 2010 | 2.260 | 1.786     | 2.145   | 2.873             | 2.249                |
| 2011 | 3.389 | 1.879     | 2.177   | 2.571             |                      |
| 2012 | 2.990 | 2.235     | 2.756   | 2.751             |                      |
| 2013 | 2.883 | 2.315     | 2.562   | 3.150             |                      |
| 2014 | 2.986 | 2.379     | 2.523   | 2.882             | 2.479                |
| 2015 | 3.534 | 2.852     | 3.009   | 3.086             | 2.966                |
| 2016 | 3.070 | 2.573     | 2.676   | 2.906             | 2.694                |
| 2017 | 2.809 | 2.256     | 2.609   | 2.718             | 2.648                |
| 2018 | 3.939 | 2.119     | 2.517   | 2.729             | 2.498                |
| 2019 | 4.179 | 2.285     | 2.846   | 2.144             | 2.701                |
| 2020 | 4.053 | 2.274     | 2.607   | 2.651             | 2.750                |

### 5.3.3 SPODOFOS SLAKKEN

Voor de Spodofos-slak wordt in eerste instantie gedacht aan toepassing als niet-vormgegeven bouwstof. Door het smelt-stolproces zal de uitloging naar omgevingswater naar verwachting zeer laag zijn en zal de slak hoogstwaarschijnlijk aan het Besluit Bodemkwaliteit voor vrije toepassing voldoen. De slak concurreert dan met o.a. gewassen AEC-bodemas, die tussen de 3 en 10 €/t opbrengt. De Nederlandse markt bedraagt alleen al voor gewassen bodemas 0,5 Mt/jaar. Daarnaast is er een omvangrijke handel in zand- en grindproducten.

De granulometrie van de slak zal wel van enig belang zijn, er is behoefte aan een verhouding zand/grind binnen bepaalde bandbreedtes voor de diverse toepassingen, maar dit is met malen/breken/zeven of desnoods natte koeling zeker haalbaar. Afzet als bouwstof wordt als kansrijk ingeschat. Een goede waardeverbetering als bouwstof is te realiseren wanneer een granulaat gemaakt wordt welke ingezet kan worden als grondstof voor het maken van beton. Omdat beton typisch 100 € per ton waard is, lijkt een ruwe aanname van 30 € realistisch. Daarnaast kost grind, 16-32mm, losgestort 20 ton geleverd in NL 40,- € per ton.

De samenstelling van de slak, ca gelijke delen alumina en calciumsilicaat, lijkt erg op de grondstoffen die voor vuurvaste keramiek worden ingekocht. Dit is een kansrijk traject voor valorisatie van de slak. Het zou mogelijk moeten zijn om 55 kt/j in Nederland en het nabije buitenland af te zetten, zeker omdat de high-alumina cement markt enorm groot is en temeer omdat in deze markt circulariteit (nog) amper bestaat. De exacte toepassing is nader te onderzoeken – als high-alumina cement, specifiek als grondstof voor vuurvaste bouwstenen, of als alumina-rijk bindmiddel. Nadere kwaliteitseisen (zoals de aanwezigheid van restjes fijne ferrofosfor) zijn met afnemers te onderzoeken.

Gelet op de prijs van dergelijke keramiek, typisch 1.000 €/ton, lijkt een allereerste ruwe aanname van 130 €/ton een conservatieve aanname. In gesprekken met een fabrikant van vuurvast materiaal wordt de slak beoordeeld als mogelijk substituuat van 40%  $Al_2O_3$  Bauxiet à 250-300 Euro per ton of retour komende keramiek à 130-150 Euro per ton. Deze ruwe aanname is zeker conservatief in het kader van vuurvast cement, waar prijzen gelden voor goede kwaliteit van ca. 600-800 Euro per ton en voor de minste kwaliteit nog steeds ca 400/500 Euro per ton. Daarmee zou zelfs 300 Euro per ton voor de slak in beeld komen.

Dergelijke beton- en cementsoorten worden ook ingezet in onderwaterbeton waarbij de samenstelling corrosie door de chlorides in het zeewater tegen gaat. Deze markt en prijs van deze beton- en of cementsoort zal nader onderzocht worden.

Vormgegeven bouwstoffen is een nader te verkennen traject. Dit zou duidelijk meer opbrengen dan niet-vormgegeven bouwstoffen. De grootte van de markt en met name de technische haalbaarheid zijn te onderzoeken. Grotere vormen zullen bij afkoelen krimp-scheuren vertonen die mogelijk de grootte en vorm limiteren. Ook hier is een opening in de refractory markt als direct vormgegeven top-elementen van ca. 1 m<sup>3</sup> inhoud (dikte halve meter).

#### 5.3.4 FERROFOSFOR

Ferrofosfor komt vrij als dwang-bijproduct in de traditionele fosforindustrie. Het gehalte fosfor (gewoonlijk 22-25%) bepaalt de waarde, daarnaast is het siliciumgehalte (0-15%) van belang voor de waarde.

Er komt 10 tot 15 kt/j de EU binnen, de trend lijkt de laatste jaren naar beneden te gaan. Aanvankelijk domineerde China de import, maar er wordt sinds 2014 ook vanuit Kazachstan per trein geïmporteerd (Tabel 21 en Tabel 22).

Chinees ferrofosfor kost fob EU-grens ca. 400 €/t, Kazachse eerder 250-300. Daarnaast komt er ferrofosfor, ongetwijfeld Chinees materiaal, de EU binnen via het VK, ca 1 kt/j. De prijs ligt tussen de 300 en 500 €/t. De Kazachse prijzen liggen lager, het is niet precies bekend waarom.

De hoofdtoepassing is als bijmenging in de staalindustrie om koolstof te verdrijven. Het doseren van fosfaten aan staal tijdens het smelten kan ferrofosfor vervangen, hoewel dat meer moeite kost; de klant heeft hierdoor de macht over de prijzen en kan bepalen wat de push-markt voor haar ferrofosfor krijgt. Het lijkt verstandig om de recente Kazachse prijs (225 €/t) aan te houden voor toepassingen in de metallurgie.

TABEL 21

IMPORTHOEVEELHEDEN FERROFOSFOR, EU-27, KT/J

|      | CN   | KZ  | UK  | totaal |
|------|------|-----|-----|--------|
| 2010 | 14,8 | 0,5 | 0,3 | 16     |
| 2011 | 16,4 |     | 0,6 | 17     |
| 2012 | 10,6 | 0,1 | 0,8 | 11     |
| 2013 | 15,0 | 0,1 | 0,3 | 15     |
| 2014 | 12,2 | 3,2 | 0,1 | 16     |
| 2015 | 6,7  | 0,1 | 0,1 | 7      |
| 2016 | 11,5 | 3,4 | 1,6 | 17     |
| 2017 | 13,1 | 5,3 | 0,7 | 19     |
| 2018 | 11,6 | 0,3 | 1,2 | 13     |
| 2019 | 5,3  | 6,3 | 1,3 | 13     |
| 2020 | 4,4  | 4,5 | 1,1 | 10     |

TABEL 22

PRIJZEN PER TON, EU-27, IMPORTEN, FOB GRENS EU (CURSIEF: ONBETROUWBAAR IVM LAGE TONNAGES)

| €/ton | CN  | KZ  | UK    |
|-------|-----|-----|-------|
| 2010  | 398 | 230 | 1.017 |
| 2011  | 377 |     | 622   |
| 2012  | 411 | 307 | 530   |
| 2013  | 396 | 246 | 1.215 |
| 2014  | 372 | 181 | 2.362 |
| 2015  | 410 | 276 | 1.008 |
| 2016  | 292 | 204 | 397   |
| 2017  | 295 | 207 | 315   |
| 2018  | 332 | 208 | 355   |
| 2019  | 431 | 217 | 505   |
| 2020  | 418 | 239 | 538   |

Het is de bedoeling dat de Spodofos-ferrofosfor arm aan fosfor is. Hiermee ontstaat een afzet-probleem; klanten geven aan dat <22% P niet acceptabel is. Zolang de gebruikelijke kwaliteit tegen pushcondities op de markt blijft komen is het zeer wel mogelijk dat er gewoonweg geen metallurgiemarkt voor de ferrofosfor is.

Het verlagen van het fosforgehalte tot bv <1% zou een gietijzer-achtig product opleveren dat op basis van historische staalprijzen 600-700 €/t waard zou zijn en momenteel tegen het dubbele te verkopen is. De vraag is hoe hoog het fosforgehalte mag oplopen en in hoeverre men momenteel (gelet op de overspannen markt) bereid is tot prijsconcessies voor materialen met enige procenten P. Dit is te onderzoeken.

Los daarvan moet worden onderzocht in hoeverre rond 1% koper in het ferrofosfor (of gietijzer) de afzetbaarheid (ver)hindert. De staalindustrie geeft aan dat koper ongewenst is, maar concrete gevolgen voor de afzet worden niet voorspeld.

Als alternatief kan de ferrofosfor als zeer zwaar bouw- of vulmateriaal worden afgezet. Het materiaal is volkomen inert, loogt niet uit en roest niet. De dichtheid (7,8 t/m<sup>3</sup>, bij stort/bulk ca 5 t/m<sup>3</sup>) zou laagwaardige toepassingen mogelijk moeten maken in bv steunwallen, verzwaringen van grote machines, etc. De markt voor zware minerale bouwstoffen is enorm in Nederland (>honderdduizenden tonnen per jaar), dit zou een alternatief kunnen zijn. De prijs hangt vooral af van de transportafstand, het gaat om nul tot enkele euro's per ton.

Een verder perspectief is vervanging van zinkpoeder in roestwerende verven. De toepassing is bekend en het materiaal is in Noord-Amerika jarenlang verkocht door Oxychem voor deze toepassing. Waarom dit is stilgevallen was destijds (ca 2005) niet boven water te krijgen. Het nadeel is dat het materiaal – dat uiterst abrasief is – tot micronschaal gemalen moet worden, wat kostbaar is (energie, slijtage). De waarde zou in dat geval tot 1€/kg oplopen, maar hier moeten de zeer significante maalkosten nog vanaf.

De hoeveelheid ferrofosfor uit het Spodofos heeft een significant volume vergeleken met de importhoeveelheden. Maar in hoeverre deze markten overlappen is nader te verkennen.



### 5.3.5 STOFRESIDU

De verwachting is dat er enig stof uit de reactor vrijkomt. Dit zal verrijkt zijn aan met name zink, natrium, kalium en evt. resten cadmium (wat in zeer geringe hoeveelheden in de as zit). Omdat de fosforcondensatie nat is zal het om hydroxides gaan; of het stof wordt voordien droog afgevangen en dan geblust met water, met identiek resultaat. Mogelijk moet er nog enig kopersulfaat bij om resten P4 aan te pakken.

Er kan van worden uitgegaan dat deze stroom niet inert is, en op een daartoe geschikte stortplaats eerst moet worden geïmmobiliseerd. Typische kosten daarvoor (incl. storten) bedragen 250 €/t, daarbovenop komt nog een immer toenemende stortbelasting, die op dit moment 32,63 € per ton bedraagt. De laatste paar jaar is de toename kleiner dan 1 €/t geweest maar daarvoor is het bedrag ineens met 20 €/t opgehoogd. Dit lijkt aanstonds weer aan de orde. De storkosten van dit stof worden daarom op 300 €/t ingeschat.

## 5.4 BUSINESS CASE

In onderstaande tabel zijn voor drie verschillende capaciteiten de business cases samengevat. Hiervoor is gebruik gemaakt de raming van de investering en de operationele kosten uit paragraaf 4.6, de inkoopkosten voor aluminium uit paragraaf 5.2 en de inkomsten van de eindproducten zoals besproken in paragraaf 5.3. Voor witte fosfor is een verkoopprijs aangehouden van 2.900 €/ton en voor ferrofosfor van een kostenneutrale afzet. Voor de inkoop van aluminium is uitgegaan van een tarief van 1.025 €/ton. Voor de slakken is uitgegaan van een basis scenario van 10 €/ton. Daarnaast zijn de effecten van hogere inkomsten voor de slakken weergegeven op de terugverdientijd. De terugverdientijd is daarbij berekend als de investering gedeeld door de netto opbrengsten, zonder rekening te houden met afschrijving en rente. Daarnaast is ook de interne rentabiliteit bepaald over een periode van 10 jaar. De interne rentabiliteit (ook wel IRR) is een maat voor het rendement op de investering.

Belangrijk voor de bijdrage van de eindproducten is naast de prijs ook de yield (opbrengst per gewichtseenheid as) van deze eindproducten. Hiervoor zijn de getallen uit Tabel 11 aangehouden. Een belangrijke aanname is dat de as 10% fosfor bevat. De capaciteit, het fosforgehalte van de as en de waarde van de slak hebben de grootste invloed op het resultaat van de business case.

TABEL 23

BUSINESS CASE MET GEVOELIGHEID VOOR CAPACITEIT EN WAARDE VAN DE SLAK

|                                           | 25 kton/a     | 50 kton/a     | 75 kton/a     |
|-------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Investering in k€</b>                  | <b>12.868</b> | <b>15.183</b> | <b>17.960</b> |
| <b>Totaal Operationele kosten in k€/a</b> | <b>3.000</b>  | <b>3.800</b>  | <b>4.650</b>  |
| Bedragen in €/ton as                      |               |               |               |
| Operationele kosten                       | 120           | 76            | 62            |
| Aluminium kosten                          | 222           | 222           | 222           |
| Opbrengsten totaal                        | 248           | 248           | 248           |
| <i>Fosfor</i>                             | 241           | 241           | 241           |
| <i>Slak</i>                               | 10            | 10            | 10            |
| <i>Ferrofosfor</i>                        | 0             | 0             | 0             |
| <i>Stof</i>                               | -3            | -3            | -3            |
| Poorttarief slibas                        | 90            | 90            | 90            |
| Operationeel Resultaat EBITDA             | -5            | 39            | 53            |
| Terugverdiëntijd totaal project in jaren  | n.v.t.        | 7,7           | 4,5           |
| Terugverdiëntijd: bijdrage slak 30 €/mt   | 33            | 5,1           | 3,3           |
| Terugverdiëntijd: bijdrage slak 130 €/mt  | 4,4           | 1,9           | 1,4           |
| Interne rentabiliteit (10 jaar)           | n.v.t.        | 6%            | 16%           |
| Interne rentabiliteit: slak 30 €/mt       | -13%          | 13%           | 23%           |
| Interne rentabiliteit: slak 130 €/mt      | 16%           | 38%           | 49%           |

De basis case gaat uit van 50.000 ton capaciteit. In dit scenario en inkomsten uit de slakken van 10 €/ton komt de simpele terugverdiëntijd op basis van EBITDA (verdiensten vóór betalen van rente, belasting en zonder afschrijvingen) uit op 7,7 jaar en heeft het project een rentabiliteit van 6%.

#### GEVOELIGHEID CAPACITEIT

Een capaciteit verlaging van 50% laat zien dat er geen business case meer bestaat. In ieder geval niet bij het uitgangspunt dat de slibas geleverd aan de poort 90 €/ton zal opleveren. Bij een poorttarief van 165 €/ton as zou een terugverdiëntijd van 7,3 jaar gerealiseerd kunnen worden.

Bekijken we de case dat de capaciteit met 50% wordt vergroot, dan zien we een forse verlaging van de terugverdiëntijd naar slechts 4,5 jaar.

De belangrijkste verklaringen voor deze impact van de capaciteit zijn enerzijds dat 50% verlaging of verhoging respectievelijk slechts 20% invloed heeft op de investering. Daarnaast heeft het personeelsbestand met een kostenpost van €1.440.000 een sterke invloed omdat dit bedrag voor de drie scenario's gelijk blijft.

#### GEVOELIGHEID P-GEHALTE:

Het gehalte P in de slibas heeft een grote invloed op de business case (onderstaande tabel). Het verschil is te zien tussen de mix met ca 10% P, gebruikt als basis case en de individuele stromen met ca. 9% en ca. 11%. Dit geeft een verschil in opbrengst van ongeveer 20 Euro per

ton slibas. Om in het pessimistische scenario de terugverdiertijden op peil te houden, zou het poorttarief opgehoogd kunnen worden naar 120 Euro per ton slibas.

Daarentegen is er ook nog extra potentieel aan P opbrengst mogelijk. Uitgangspunt nu is 15% P in de ferrofosfor. In theorie zou dit ook naar 10% kunnen zakken. Dat geeft extra opbrengsten doordat meer witte fosfor wordt teruggewonnen.

TABEL 24 EFFECT VAN HET FOSFAATGEHALTE IN DE AS OP DE BUSINESS CASE (BASIS: OPBRENGST VOOR P4 = 2.900 €/TON EN KOSTEN AL = 1.025 €/TON).

|             | P<br>kg/ton | Al<br>t/t | Al<br>€/t | P4<br>t/t | P4<br>€/t | P4-AL<br>€/t | Delta t.o.v.<br>mix | P<br>rendement | Slak<br>kg/ton |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------------|----------------|----------------|
| SNB HVC mix | 100,1       | 0,217     | 222       | 0,083     | 241       | 18           | 0                   | 83%            | 1.020          |
| SNB         | 91,2        | 0,213     | 218       | 0,075     | 218       | -1           | -19                 | 82%            | 1.024          |
| HVC         | 113,9       | 0,226     | 232       | 0,096     | 278       | 47           | 28                  | 84%            | 1.013          |
| DE alles    | 62,9        | 0,183     | 188       | 0,045     | 131       | -57          | -75                 | 72%            | 1.015          |
| DE top 4    | 46,6        | 0,166     | 170       | 0,030     | 87        | -83          | -101                | 66%            | 1.020          |

#### GEVOELIGHEID PRIJZEN VAN EINDPRODUCTEN:

De gevoeligheid van de prijs van witte fosfor is relatief laag. Een prijswijziging van 150 Euro per ton witte fosfor heeft een impact van 10 Euro per ton slibas.

De gevoeligheid van ferrofosfor is verwaarloosbaar omdat de yield weliswaar 11,5% is maar de prijs rondom het 0 punt beweegt. Zelfs met storkosten van 50 Euro is het effect op het resultaat, slechts ca. 6 Euro per ton slibas. De gevoeligheid van de storkosten van stof zijn volledig te verwaarlozen. Elke 100 Euro per ton extra storkosten heeft slechts 1 Euro effect (1% yield) per ton slibas.

Het eindproduct dat een zeer groot effect op de totale business case zal hebben is de waarde van de slak. Enerzijds omdat de yield ca. 100% is. Anderzijds omdat in de basiscase slechts is uitgegaan van een opbrengst van 10 € per ton slibas als grind vervanger onder wegen. In de ontwikkeling van dit product zit nog zeer veel potentieel. Alleen al opwaardering naar grondstof voor bouwstoffen als beton zal een positief extra resultaat hebben van 20 € per ton en geeft dan terugverdiertijden van 5 jaar of korter.

Indien de slak, niet eens tegen hoogst mogelijke waarde, als grondstof voor vuurvaste stenen en beton kan worden ingezet stijgt de toegevoegde waarde per ton slibas met 110 Euro. Terugverdiertijden zakken tot rond de 1,5 jaar van het totale project

#### POTENTIE VOOR VERLAGEN AFZETKOSTEN SLIBVERBRANDINGSAS

In de bovenstaande business case is steeds gerekend met een vast poorttarief voor de slibverbrandingsas van 90 €/ton en dit komt overeen met een jaarlijkse kostenpost van € 4,5 miljoen voor de slibverbrandingsinstallaties. Dit tarief komt overeen met de huidige afzetkosten voor de vlieg-as voor de gecombineerde toepassing van de as als vulstof in asfalt en zoutmijnen. De huidige verwachting is dat terugwinning van fosfaat uit de as zal leiden tot een verdere toename van de afzetkosten. De business case voor Spodofos laat zien dat als de slakken een hoogwaardige toepassing vinden dat de rentabiliteit van het proces dan zeer gunstig is. Afhankelijk van de wijze van realisatie en financiering van een toekomstige Spodofos installatie biedt dit kansen voor een verlaging van de afzet kosten voor de slibverbrandingsas zoals weergegeven is in onderstaande tabel.

TABEL 22 EFFECT VAN VERSCHILLENDE AFZETKOSTEN OP HET NOODZAKELIJKE POORTTARIEF OM EEN TERUGVERDIENTIJD VAN 6 JAAR TE BEREIKEN

| Verwerkingscapaciteit | 25 kton/a                                                 | 50 kton/a | 75 kton/a |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Waarde slak           | Poorttarief slibverbrandings as (6 jaar terugverdientijd) |           |           |
| 10                    | 180                                                       | 100       | 75        |
| 30                    | 160                                                       | 80        | 55        |
| 130                   | 55                                                        | -20       | -45       |

# 6

## LEVENSCYCLUSANALYSE

### 6.1 INLEIDING

Als onderdeel van dit traject heeft CE Delft een milieukundige analyse van de Spodofos technologie uitgevoerd, beschreven in deze rapportage. De milieukundige analyse bestaat uit twee onderdelen.

Ten eerste, een berekening van de klimaatimpact (ook wel CO<sub>2</sub>-voetafdruk genoemd) van het verwerken van slibas met de Spodofos-technologie, inclusief het voordeel van het produceren van witte fosfor, ferrofosfor en slak. Dit perspectief maakt het mogelijk om de klimaatimpact van de Spodofos-technologie te vergelijken met de klimaatimpact van andere verwerkingsmethoden van slibas.

Het tweede deel van de milieukundige analyse bestaat uit een schaarste-analyse. Hierin analyseren we de schaarste van zowel fosfor als aluminium om tot een afweging te komen over de wenselijkheid van het gebruiken van aluminium voor de terugwinning van fosfor.

In de gevoeligheidsanalyse kijken we naar de invloed van de fosforconcentratie in de as op de resultaten, de invloed van het soort aluminium dat gebruikt wordt en het gebruik van duurzame energie in het Spodofos-proces. Aangezien de Spodofos-technologie nog niet op volledige schaal operationeel is, zit er nog een onzekerheid in de benodigde energie-inputs. Deze onzekerheid is verwerkt in de resultaten.

### 6.2 METHODE

In dit hoofdstuk beschrijven we het doel van deze studie en de gebruikte methodologie; de afbakening, de LCA-methodiek en de data.

#### 6.2.1 DOEL

Het doel van deze studie is tweeledig:

1. Het bepalen van de klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofos proces, inclusief het voordeel van het produceren van witte fosfor, ferrofosfor en slak.
2. Inzicht geven in de impact van het gebruik van schaarse materialen; hier gebruik van aluminium voor terugwinning van fosfor.

De resultaten van deze studie 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.

We houden ons in deze studie niet bezig met risico's of nut van de geproduceerde producten en indicatoren anders dan de klimaatvoetafdruk en schaarste.

## 6.2.2 AFBAKENING

### 6.2.2.1 FUNCTIONELE EENHEID

De functionele eenheid beschrijft de gewenste functie die in deze studie bekeken wordt en biedt daarmee een uniforme basis voor het bepalen van de klimaatimpact van verschillende systemen. Dit betekent dat de resultaten gebruikt kunnen worden voor vergelijkingen met dezelfde functionele eenheid; dus andere verwerkingsmethoden van slibas.

In deze studie is de functionele eenheid als volgt gedefinieerd:

Het verwerken van 1 ton slibas met een gemiddelde fosforconcentratie van 10,1%.

Slibas is afkomstig van 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.

In de gevoeligheidsanalyse kijken we ook naar de klimaatimpact van het verwerken van slibas met andere fosforconcentraties.

### 6.2.2.2 ALLOCATIE

Aangezien als functionele eenheid is gekozen voor 'het verwerken van 1 ton slibas' en we dus de klimaatimpact per ton slibas bepalen, is het niet relevant om de klimaatimpact te verdelen over de producten die geproduceerd worden.

### 6.2.2.3 SYSTEEMGRENZEN

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

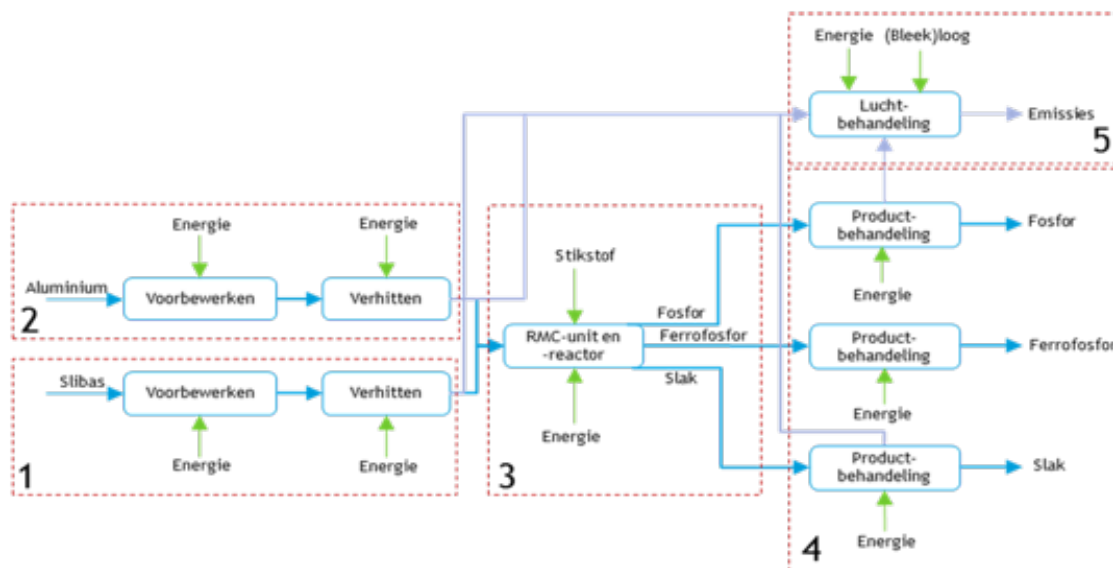
- Geografische locatie: We kijken naar de verwerking van slibas met het Spodofosproces in Nederland. Dit betekent dat we uitgaan van de Nederlandse elektriciteitsmix en Gronings aardgas. Voor de vermeden producten gaan we wel uit van productie in andere landen.
- Tijdsafbakening: De analyse richt zich op de klimaatimpact van slibasverwerking rond 2021. 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.

### 6.2.2.4 SYSTEEMBESCHRIJVING SPODOFOSPROCES

In het Spodofosproces wordt met behulp van aluminium fosfor teruggewonnen uit slibas. Bijproducten zijn ferrofosfor en slak. Het proces kan onderverdeeld worden in vijf subprocessen, zoals weergegeven in Figuur 17.

FIGUUR 17

SCHEMATISCH OVERZICHT VAN HET SPODOFOS PROCES



### 1. VOORBEWERKEN SLIBAS

Voordat de slibas met de aluminium gemengd wordt, wordt het verhit tot een temperatuur van 600 °C.

### 2. VOORBEWERKEN ALUMINIUM

In het Spodofos proces wordt aluminiumschroot 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. De aluminium wordt verhit tot een temperatuur van ongeveer 600 °C.

### 3. RMC-UNIT EN -REACTOR

In de ReactieMix Conditioneer (RMC)-unit worden de juiste hoeveelheden as en aluminium samengebracht en wordt de 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 slakkenbed. De slak koelt af en wordt bij hoge temperatuur met water geschrokken waardoor het breekt.

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

### 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 bestand-

delen. Met een bleekloogwassing wordt fosfor uit de niet-condenseerbare gassen in de fosforcondensatie en de ademlucht van de opslagen gewassen. Tot slot wordt de ventilatielucht uit de slakkenhal met een alkalische scrubber van waterstofsulfide ontdaan.

#### **6.2.2.5 VERMEDEN PRODUCTEN**

##### **FOSFOR**

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 (alleen voor nationaal gebruik), China (grotendeels nationaal gebruik), Kazachstan en Vietnam. ThermusP verwacht dat de fosfor die in het Spodofos-proces geproduceerd wordt, witte fosfor uit Kazachstan en Vietnam zal vervangen. 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.

##### **FERROFOSFOR**

De geproduceerde ferrofosfor is van mindere kwaliteit dan conventionele ferrofosfor (omdat de opbrengst als witte fosfor wordt gemaximaliseerd); het heeft een lager fosfor-gehalte (15%, waar 25% gangbaar is). Het is nog niet duidelijk of de geproduceerde ferrofosfor verkocht kan worden of dat het als afvalproduct moet worden beschouwd. We gaan er daarom in de basisanalyse vanuit dat ferrofosfor geen conventionele producten vervangt.

##### **SLAK**

De geproduceerde slak kan ingezet worden voor het vervangen van granulaat constructiemateriaal. Eventueel kan de slak ook worden ingezet in cementtoepassingen, maar dat hangt af van de samenstelling van de slak en moet nog verder onderzocht worden. We nemen die andere toepassingen daarom niet mee in de basisanalyse.

### **6.2.3 LCA-METHODIEK EN MILIEU-INDICATOREN**

#### **ATTRIBUTIELE LCA**

We voeren in deze studie een attributionele analyse uit. Dit betekent dat we kijken naar de klimaatimpact van het proces (en achterliggende processen) zelf. We kijken niet naar de klimaatimpact die veroorzaakt wordt door eventuele veranderingen in de markt als gevolg van toepassing van de Spodofos technologie op grote schaal.

#### **GEBRUIK VAN SOFTWARE EN DATABASES VOOR LCA**

Bij de uitvoer van deze studie is gebruik gemaakt van:

- LCA-softwareprogramma SimaPro, versie 9.1.1.1.;
- Ecoinventdatabase v3.6, allocation cut-off by classification voor milieugegevens van achtergrondprocessen, behalve als CE Delft beschikt over recentere of beter passende milieu-inventarisatie. Dit wordt dan duidelijk aangegeven.

#### **GEKOZEN MILIEU-INDICATOREN**

Voor deze studie kijken we naar de impact op klimaatverandering. We gebruiken de IPCC 2013 GWP 100a-methode om de klimaatimpact van het proces te bepalen.



#### 6.2.4 DATAGEBRUIK EN DATAKWALITEIT

De gebruikte gegevens zijn gebaseerd op informatie verkregen van ThermusP en literatuur. Het grootste deel van de Spodofos-installatie bestaat uit bestaande techniek, hiervan is bekend wat de energieconsumptie is. Wij houden hierbij voor de zekerheid een bandbreedte aan van 10 of 20%.

#### 6.3 INVENTARISATIE

In Tabel 26 zijn alle gegevens voor het Spodofosproces samengevat. De ‘waarschijnlijke waarde’ is gebruikt als basis voor de modellering. Voor het bepalen van de minimum- en maximumwaarde zijn de belangrijkste aannames:

- onzekerheid in aardgasgebruik: 10%;
- onzekerheid in elektriciteitsgebruik: 20%;
- voor de overige onzekerheden worden de opgegeven waarden van ThermusP aangehouden.

In de laatste kolom, ‘Opmerkingen en modellering’, noemen we de processen die we voor de modellering gebruikt hebben.

TABEL 26 GEGEVENS GEBRUIKT IN HET MODEL VAN HET SPODOFOS-PROCES, VOOR VERWERKING VAN 1 TON SLIBAS

|                                             | Eenheid         | Waarschijnlijke waarde | Minimum | Maximum | Opmerkingen en modellering<br>Ecoinvent-processen in cursief                                                                                     |
|---------------------------------------------|-----------------|------------------------|---------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Voorbewerking slibas</b>                 |                 |                        |         |         |                                                                                                                                                  |
| Slibas                                      | kg              | 1.000                  | 1.000   | 1.000   | Geen klimaatimpact                                                                                                                               |
| Elektriciteit                               | kWh             | 5,1                    | 4,1     | 6,1     | Gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix in 2018 (CE Delft, 2020)                                                                                |
| Aardgas                                     | Nm <sup>3</sup> | 20,2                   | 18,2    | 22,2    | Productie: <i>Natural gas, high pressure {NL}</i>   market for<br>Verbranding: 1,954 kg CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> (RVO, 2020)             |
| <b>Voorbewerking aluminium</b>              |                 |                        |         |         |                                                                                                                                                  |
| Aluminium                                   | kg              | 222                    | 222     | 222     | Energie voor de opwerking van 1 ton bodemas:<br>9,8 kWh elektriciteit<br>54 MJ diesel (CE Delft, 2019)                                           |
| Elektriciteit                               | kWh             | 6,3                    | 3,0     | 4,4     | Zie voorbewerking slibas                                                                                                                         |
| Aardgas                                     | Nm <sup>3</sup> | 4,2                    | 3,8     | 4,6     | Zie voorbewerking slibas                                                                                                                         |
| <b>RMC-unit en -reactor</b>                 |                 |                        |         |         |                                                                                                                                                  |
| Stikstof                                    | kg              | 2                      | 1       | 5       | <i>Nitrogen, atmospheric</i> en 0,21 kWh elektriciteit/kg N voor de productie (Parker Hannifin Corporation, 2013)                                |
| Elektriciteit                               | kWh             | 28                     | 22,4    | 33,6    | Zie voorbewerking slibas                                                                                                                         |
| <b>Productbehandeling</b>                   |                 |                        |         |         |                                                                                                                                                  |
| Elektriciteit                               | kWh             | 2                      | 1,6     | 2,4     | Zie voorbewerking slibas                                                                                                                         |
| Slakbehandeling                             | kg              | 1.023                  | 1.023   | 1.023   | SBK Breken steenachtig MRPI (NMD 2.2), de klimaatimpact is 0,0018 kg CO <sub>2</sub> -eq./kg                                                     |
| Dieselolie                                  | ltr             | 1,3                    | 1,04    | 1,56    | <i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i>   market for<br>Stookwaarde: 43,2 MJ/kg (RVO, 2020);<br>Dichtheid: 0,84 kg/ltr (Wikipedia, 2021) |
| Koelwater                                   | ltr             | 750                    | 500     | 1.000   | Water, cooling, unspecified natural origin, NL                                                                                                   |
| <b>Luchtbehandeling en afvalbehandeling</b> |                 |                        |         |         |                                                                                                                                                  |
| Elektriciteit                               | kWh             | 8                      | 6,4     | 9,6     | Zie voorbewerking slibas                                                                                                                         |
| Water                                       | Ltr             | 750                    | 500     | 1.000   | <i>Water, completely softened {RER}</i>   market for                                                                                             |

|                   | Eenheid | Waarschijnlijke waarde | Minimum | Maximum | Opmerkingen en modellering<br>Ecoinvent-processen in cursief                                                                                                                                                                                              |
|-------------------|---------|------------------------|---------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Loog (35%)        | kg      | 0,5                    | 0,1     | 1       | <i>Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}   chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell</i><br>Correction for concentration                                                                                                           |
| Bleekloog (12,5%) | kg      | 1                      | 0,5     | 1,5     | <i>Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RER}   sodium hypochlorite production, product in 15% solution state</i>                                                                                                                    |
| Kopersulfaat      | g       | 6                      | 6       | 6       | <i>Copper sulfate {GLO}   market for</i>                                                                                                                                                                                                                  |
| Stof naar stort   | kg      | 10                     | 8       | 12      | Inert waste {Europe without Switzerland}   treatment of inert waste, sanitary landfill                                                                                                                                                                    |
| Outputs           |         |                        |         |         |                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Fosfor            | kg      | 83                     | 83      | 83      | Vermijdt: <i>Phosphorus, white, liquid {RoW}   production</i><br>Transport:<br>50% <i>Lange trein, diesel, Well-to-Wheel (middelzwaar transport) (CE Delft, 2017)</i><br>50% <i>Bulk carrier (handymax), Well-to-Wheel (middelzwaar) (CE Delft, 2017)</i> |
| Ferrofosfor       | kg      | 116                    | 116     | 116     | Geen vermeden product                                                                                                                                                                                                                                     |
| Slak              | kg      | 1.023                  | 1.023   | 1.023   | Vermijdt: <i>Grind 4-32, in en nabij Nederland geproduceerd door Cascade-leden, c2</i>                                                                                                                                                                    |

## 6.4 RESULTATEN KLIMAATIMPACT

### 6.4.1 INTRODUCTIE

In deze paragraaf worden de resultaten van de levenscyclusanalyse van het Spodofos-proces gepresenteerd. In de eerste paragraaf staat de klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas voor de basiscase, zoals beschreven in 6.2.

Vervolgens volgen vier paragrafen met gevoeligheidsanalyses. In de eerste gevoeligheidsanalyse (Paragraaf 6.4.3) bepalen we de klimaatimpact van het proces bij alternatieve toepassingen van de producten. In de tweede gevoeligheidsanalyse (Paragraaf 6.4.4) kijken we naar de effecten van verschillende aluminiumbronnen op de klimaatimpact. In de derde gevoeligheidsanalyse (Paragraaf 6.4.5) onderzoeken we het effect van een duurzamere elektriciteitsmix en eventuele elektrificatie van het Spodofos-proces op de klimaatimpact en in de vierde gevoeligheidsanalyse (Paragraaf 6.4.6) bekijken we hoe de klimaatimpact van het proces beïnvloed wordt de fosforconcentratie in de slibas.

In Paragraaf 6.4.7 wordt de klimaatimpact van de afzonderlijke producten uit het Spodofos-proces gepresenteerd.

Tot slot combineren we in Paragraaf 6.4.7 een aantal van de resultaten uit de voorgaande paragrafen om te bepalen hoe bepaalde keuzes in het ontwerp van het Spodofos-proces de klimaatimpact kunnen beïnvloeden en welke combinatie van keuzes uiteindelijk de laagste klimaatimpact oplevert.

#### 6.4.2 KLIMAATIMPACT VERWERKING SLIBAS

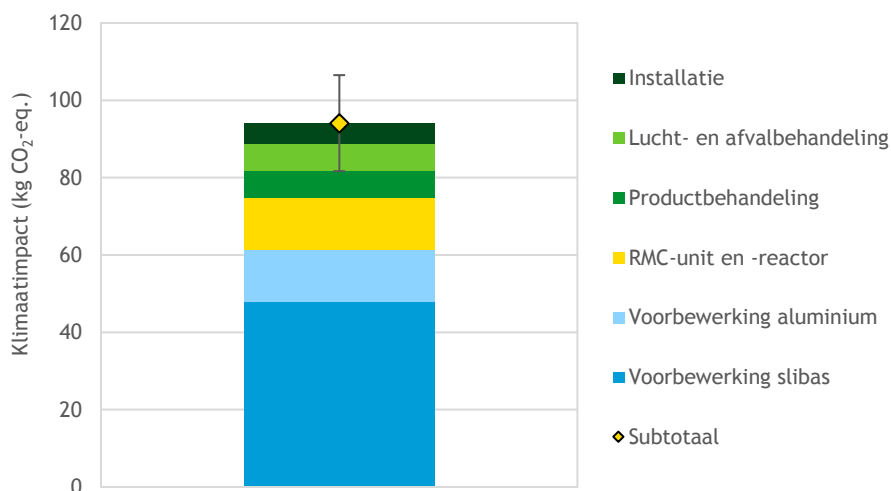
Het hoofddoel van de analyse is het bepalen van de klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofos-proces. In Figuur 18 en Figuur 19 wordt deze klimaatimpact weergegeven. We presenteren eerst de impact van het Spodofos-proces (Figuur 18), en daarna de impact waarbij ook het voordeel van vermeden producten is meegenomen (Figuur 19).

In Figuur 18 wordt de klimaatimpact van het Spodofos-proces weergegeven, zonder de vermeden impact door productie van fosfor en slak. De klimaatimpact komt uit op  $94 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq. per ton slibas. De voorbewerking van de slibas heeft het grootste aandeel in de totale klimaatimpact, doordat er veel aardgas nodig is voor het verhitten van de slibas.

Bij de andere procesonderdelen wordt de klimaatimpact vooral bepaald door het elektriciteitsgebruik.

De onzekerheid ( $\pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq.) wordt veroorzaakt door de onzekerheid in de hoeveelheden elektriciteit, aardgas en hulpstoffen die gebruikt worden in het Spodofos-proces.

FIGUUR 18 KLIMAATIMPACT VAN HET VERWERKEN VAN 1 TON SLIBAS (10,1% P) MET HET SPODOFOS-PROCES (ZONDER VOORDEEL VOOR VERMEDEN PRODUCTEN)

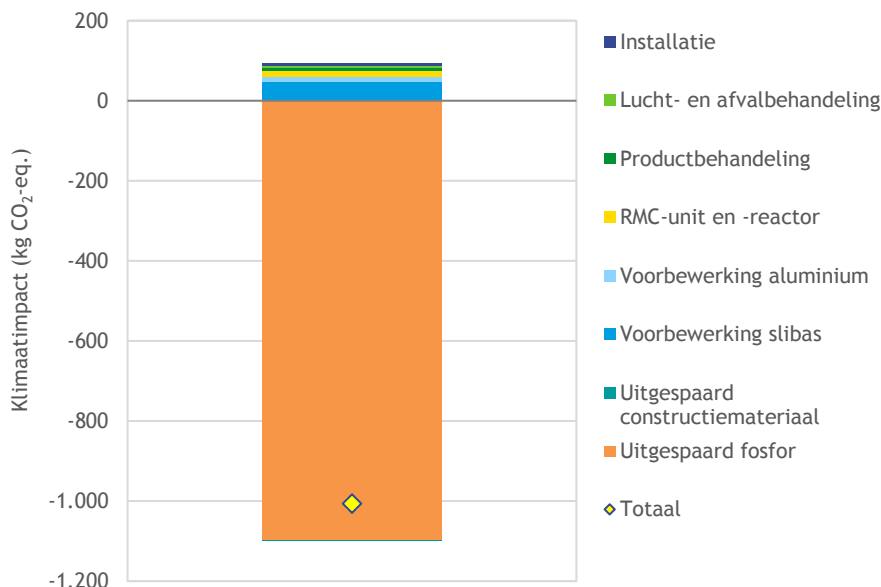


In Figuur 19 wordt de totale klimaatimpact van het Spodofos-proces weergegeven inclusief de vermeden impact door gebruik van de geproduceerde witte fosfor en slak als vervanging van respectievelijk conventionele witte fosfor en constructiemateriaal.

De totale klimaatimpact komt uit op  $-1.007 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq. Te zien is dat de klimaatimpact van het proces zelf veel kleiner is dan de vermeden klimaatimpact door de uitgespaarde witte fosfor. De conventionele productie van witte fosfor vraagt veel energie, waardoor het een zeer hoge klimaatimpact heeft (13 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg). Het vermeden transport draagt slechts 1,5% bij aan het voordeel van de uitgespaarde witte fosfor.

FIGUUR 19

KLIMAATIMPACT VAN HET VERWERKEN VAN 1 TON SLIBAS (10,1% P) MET HET SPDOFOS-PROCES (MET VOORDEEL VOOR VERMEDEN PRODUCTEN)



#### 6.4.3 GEVOELIGHEIDSANALYSE UITGESPAARDE PRODUCTEN

In de basisanalyse zijn we ervan uitgegaan dat de geproduceerde ferrofosfor geen andere toepassingen heeft, omdat de kwaliteit van dit ferrofosfor lager is dan van gangbare ferrofosfor. Voor de slak zijn we ervan uitgegaan dat dit constructiemateriaal (grind) vervangt. Er zijn echter ook andere toepassingen van deze producten mogelijk. In deze gevoeligheidsanalyse kijken we naar een alternatieve toepassing voor ferrofosfor en twee alternatieve toepassingen voor slak.

##### FERROFOSFOR WORDT TOEGEPAST ALS IJZER

We gaan ervan uit dat de ferrofosfor wordt afgevoerd naar de staalindustrie. Het vervangt daar ijzer geproduceerd via cokes (Ecoinvent-proces: *Pig iron {GLO} | market for*). We gaan ervan uit dat er geen verdere behandeling van de ferrofosfor nodig is voor het ingezet kan worden als vervanging van ijzer.

De tweede balk in Figuur 20 geeft de klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas als deze alternatieve verwerking van ferrofosfor wordt meegenomen. Toepassing van ferrofosfor als vervanging van ijzer zorgt voor een extra vermeden uitstoot van 192 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas.

##### SLAK WORDT TOEGEPAST ALS VULSTOF IN DE VUURVASTINDUSTRIE

Slakkorrels kunnen mogelijk verwerkt worden in vuurvaste species. De geproduceerde slak moet daarvoor eerst verkleind worden naar korrels van 5-10 mm. We nemen aan dat hiervoor 20 kWh/ton slak elektriciteit voor nodig is. In de vuurvaste species vervangen de slakkorrels één op één alumina (Ecoinvent).

Proces: *Aluminium oxide, metallurgical {IAI Area, EU27 & EFTA} | aluminium oxide production*).

De derde balk in Figuur 20 geeft de klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas weer als de slak wordt toegepast in de vuurvastindustrie. Deze alternatieve toepassing van slak zorgt voor een extra vermeden impact van 1.130 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas, waarmee de totale klimaatimpact uitkomt op -2.137 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas. De vermeden klimaatimpact van de toepassing

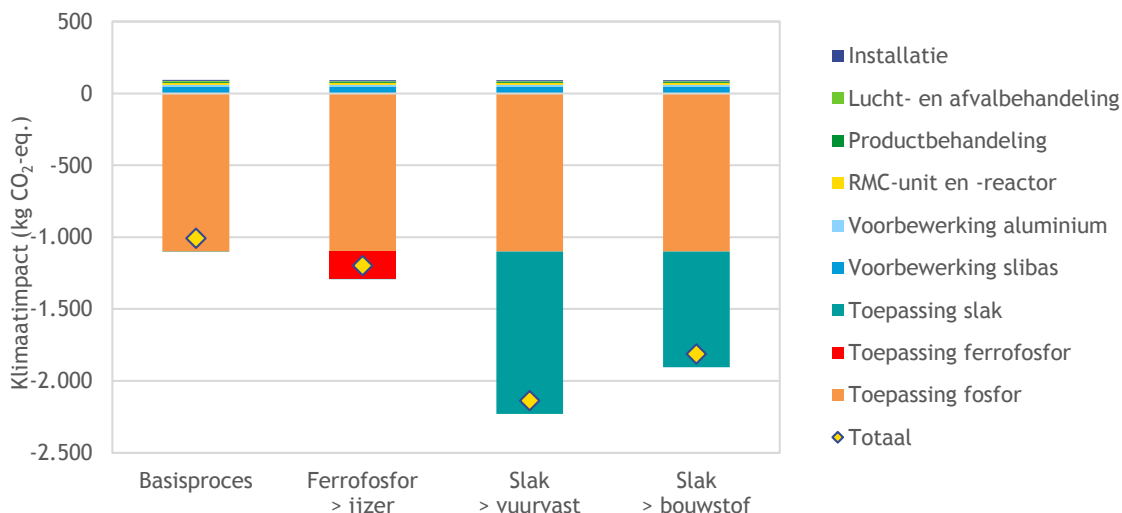
van slak is hoger dan de vermeden klimaatimpact van de toepassing van witte fosfor, ondanks de lagere klimaatimpact van alumina ( $1,1 \text{ kg CO}_2\text{-eq./kg}$ ) in vergelijking met de klimaatimpact van conventionele witte fosfor ( $13 \text{ kg CO}_2\text{-eq./kg}$ ). Dit komt doordat er veel meer alumina dan witte fosfor wordt uitgespaard.

#### SLAK WORDT TOEGEPAST IN VORMGEGEVEN BOUWSTOFFEN

Een andere alternatieve toepassing voor slak is toepassing in vormgegeven bouwstoffen zoals stoeprandtegels of legioblokken. Hiermee wordt de productie van cement uitgespaard (Ecoinvent-proces: *Cement, unspecified {Europe without Switzerland} | cement, all types to generic market for*). 1 kg slak vervangt 1 kg cement. Er is ongeveer 1 kWh/ton slak aan elektriciteit nodig voor de aandrijvingen voor het verplaatsen van de volle en lege mallen.

De vierde balk in Figuur 20 geeft de klimaatimpact weer van de verwerking van 1 ton slibas met de slak toegepast in vormgegeven bouwstoffen. Deze toepassing zorgt voor een extra vermeden klimaatimpact van  $807 \text{ kg CO}_2\text{-eq./ton}$  slibas, waarmee de totale klimaatimpact uitkomt op  $-1.813 \text{ kg CO}_2\text{-eq./ton}$  slibas.

FIGUUR 20 GEVOELIGHEIDSANALYSE: KLIMAATIMPACT VAN DE VERWERKING VAN 1 TON SLIBAS MET VERSCHILLENDE TOEPASSINGEN VOOR DE GEPRODUCEERDE FERROFOSFOR EN SLAK



#### 6.4.4 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR ALUMINIUMINPUT

In het Spodofos-proces wordt aluminium gebruikt om fosfor terug te kunnen winnen uit de slibas. In de analyse waarvan de resultaten zijn weergegeven in Paragraaf 6.4.2 zijn we uitgegaan van aluminium dat wordt teruggewonnen uit bodemassen. De klimaatimpact van dit aluminium is beperkt, alleen de impact van de energie die nodig is voor het terugwinnen is hierin meegenomen.

Het is echter de vraag of deze lage klimaatimpact recht doet aan de realiteit. Zoals is beschreven in Paragraaf 6.2.3 hebben we een attributieanalyse uitgevoerd, waarbij we de klimaatimpact van het Spodofos-proces zelf bepalen en niet kijken naar de effecten van eventuele veranderingen in de markt (dan is een consequentiële analyse nodig).

Door het gebruik van aluminium uit bodemas zouden echter wel marktveranderingen op kunnen treden die van grote invloed kunnen zijn op de klimaatimpact van het hele systeem. Volgens de minimumstandaard voor het verwerken van AVI-bodemassen uit het Landelijk Afval

Beheerplan (LAP3) moeten ferro en non-ferrometalen (waar aluminium onder valt) maximaal afgescheiden worden uit de bodemas ten behoeve van recycling (RWS, 2019). Dit betekent dat verwerkers al een verplichting hebben aluminium zo goed mogelijk terug te winnen en hoogwaardig in te zetten. Het is nog een open vraag of Spodofos gezien wordt als ‘recycling’ binnen het LAP.

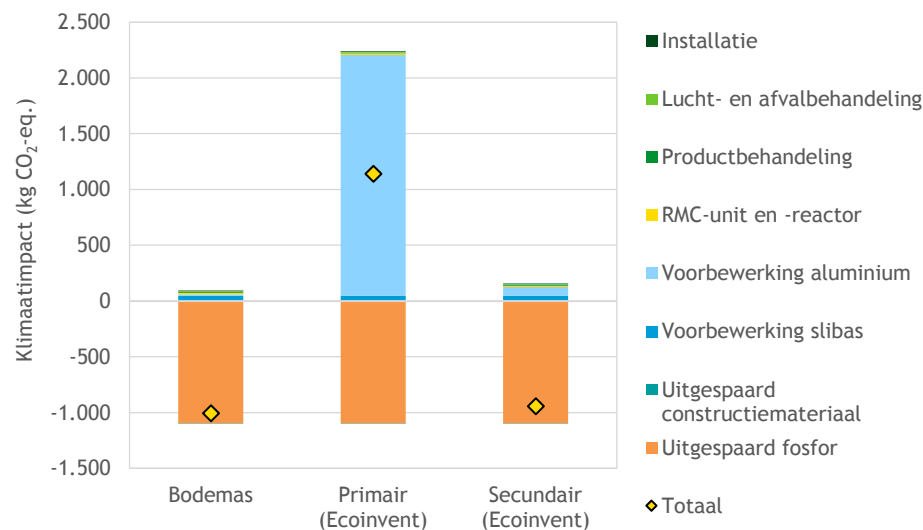
Als ThermusP ook gebruik gaat maken van aluminium uit bodemas, is die aluminium niet meer beschikbaar voor producten waar het nu voor gebruikt wordt. Het zou kunnen dat daar dan weer primair aluminium voor gebruikt wordt en dat het gebruik van aluminium uit bodemas in het Spodofos-proces er indirect voor zorgt dat er meer primair aluminium geproduceerd moet worden.

Het betekent niet direct dat deze impact aan het Spodofos-proces toegerekend moet worden. Maar om de risico's met betrekking tot de klimaatimpact in beeld te brengen is het interessant om te kijken hoe de klimaatimpact van de verwerking van slibas eruitziet met het gebruik van primair aluminium in plaats van aluminium uit bodemas. In het model vervangen we de aluminium input zoals beschreven in Tabel 26 door het Ecoinvent-proces *Aluminium, primary, ingot* {IAI Area, EU27 & EFTA} | market for. Dit is de Europese marktmix voor aluminium, zoals in meer detail beschreven wordt in Paragraaf 6.5.3.

De resultaten van de analyse met primair aluminium zijn weergegeven in Figuur 21. De klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas met behulp van primair aluminium is  $1.139 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq. Deze hoge klimaatimpact wordt veroorzaakt door de hoge klimaatimpact van primair aluminium (9,7 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg). Deze waarde is iets lager dan de klimaatimpact van conventionele witte fosfor. Maar aangezien er meer dan twee keer zoveel aluminium nodig is dan er fosfor geproduceerd wordt, wegen de klimaatimpact van het proces en de vermeden klimaatimpact door de uitgespaarde producten niet tegen elkaar op.

FIGUUR 21

GEVOELIGHEIDSANALYSE: KLIMAATIMPACT VAN DE VERWERKING VAN SLIBAS MET ALUMINIUM UIT VERSCHILLENDE BRONNEN



Naast de klimaatimpact van het gebruik van primair aluminium hebben we ook gekeken naar de klimaatimpact van het gebruik van aluminiumschroot. Voor deze analyse is in het model de aluminium input vervangen door het Ecoinvent-proces *Aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting* {RER} | treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting,

*sorting, cleaning, pressing*. Hierin is, net als bij het proces voor opwerking van de bodemas, enkel de klimaatimpact van de opwerking van het materiaal meegenomen.

De klimaatimpact van het verwerken van 1 ton slibas komt dan uit op  $-943 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq. Dit is net iets hoger dan bij het gebruik van aluminium uit bodemas, doordat er meer energie nodig is voor de bewerking van het aluminiumschroot.

De doorrekening met primair aluminium is puur hypothetisch en enkel ten bate van de gevoeligheidsanalyse opgevoerd en zal niet de praktijk zijn. Dit blijkt uit het marktanalyse voor aluminium waarvoor we verwijzen naar (paragraaf 5.2). In Hoofdstuk 6.5, de schaarste-analyse, gaan we in op aanwezigheid en beschikbaarheid van aluminium en fosfor, en over hoe LCA omgaat met verbruik van aluminium of fosfor terug te winnen.

#### 6.4.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR DUURZAME ELEKTRICITEIT EN ELEKTRIFICATIE

In de basisanalyse zijn we uitgegaan van de huidige Nederlandse elektriciteitsmix voor alle processen die onderdeel zijn van het Spodofos-proces. De Spodofos-technologie is echter nog in ontwikkeling en het zal nog enkele jaren duren voordat het proces op grote schaal uitgevoerd kan worden. De komende jaren zal de elektriciteitsmix steeds verder verduurzamen, het is daarom interessant om te kijken wat het effect van een duurzamere elektriciteitsmix op de klimaatimpact van het Spodofos-proces is.

We kijken hierbij naar twee scenario's:

1. 2030-scenario: Het Spodofos-proces maakt gebruik van de elektriciteitsmix zoals voorspeld voor 2030. Deze elektriciteitsmix heeft een klimaatimpact van 0,14 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh<sup>3</sup>. Ook voor het opwerken van de bodemassen wordt deze elektriciteitsmix gebruikt. In 2030 kan ook de conventionele productie van witte fosfor duurzamer zijn. Voor de analyse en de vergelijking gaan we ervan uit dat de klimaatimpact van de productie van witte fosfor in Kazachstan en Vietnam dan gelijk is aan de klimaatimpact van de productie van witte fosfor zoals deze in Europa geproduceerd werd (Ecoinventproces: Phosphorus, white, liquid {RER} | production). We kijken ook naar dit scenario in combinatie met het gebruik van primair aluminium in plaats van aluminium uit bodemas. Volgens het International Aluminium Institute zal het wereldwijd gemiddelde van de klimaatimpact per ton primair aluminium met 11,8% afnemen tussen 2018 en 2030<sup>4</sup> (IAI, 2021a). We gaan er voor de analyse en vergelijking vanuit dat de klimaatimpact van primair aluminium op de Europese markt ook met 11,8% zal afnemen en in 2030 dan 8,6 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg aluminium zal zijn.
2. Groen scenario: In dit scenario gaan we ervan uit dat het Spodofos-proces volledig op groene stroom draait. We gaan hierbij uit van zonne- en windstroom in dezelfde verhouding zoals deze nu in de elektriciteitsmix voorkomen (CE Delft, 2020). Dit betekent 50% onshore wind-energie, 26% offshore windenergie, 12% zonneparken en 12% zonnepanelen op daken. Voor de klimaatimpact van conventionele witte fosfor en primair aluminium houden we dezelfde waarde aan als in het eerste scenario.

3 De voorspelde klimaatimpact van de Nederlandse elektriciteitsmix in 2030 is volgens het PBL 0,12 kg CO<sub>2</sub>-eq./kWh (bepaald met de integrale methode). Dit is een projectie gebaseerd op vastgesteld en voorgenomen beleid uit het Klimaatakkoord 2019. In deze waarde zit alleen de klimaatimpact van de directe emissies van de energiecentrales (PBL, 2020). Momenteel zijn deze directe emissies goed voor 85% van de totale klimaatimpact van elektriciteit, inclusief ketenemissies (CO<sub>2</sub>-emissiefactoren.nl, 2017). We nemen aan dat de verhouding tussen directe emissies en ketenemissies gelijk blijft in 2030.

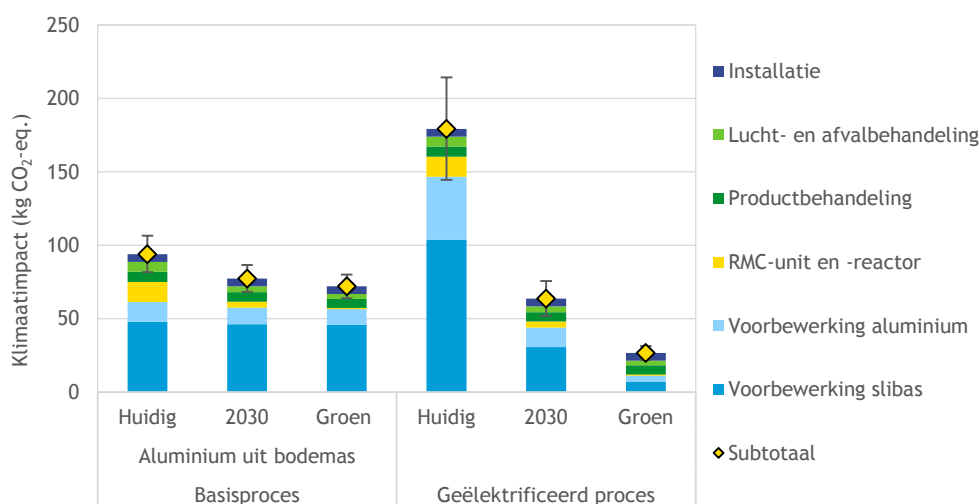
4 De IAI verwacht dat de klimaatimpact van primair aluminium na 2030 sneller af zal nemen, tot ongeveer 2,5 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg aluminium in 2050 (IAI, 2021a).

Een duurzamere elektriciteitsmix heeft vooral effect op de klimaatimpact als een groot deel van de klimaatimpact veroorzaakt wordt door het elektriciteitsgebruik. In het basisproces (Tabel 26) wordt vooral veel aardgas gebruikt. Het is echter mogelijk om het Spodofos-proces te elektrificeren en de slibas en het aluminium te verhitten met behulp van elektriciteit in plaats van aardgas. Voor de voorbereiding van de slibas is dan in totaal  $217 \pm 43$  kWh elektriciteit nodig en voor de voorbereiding van aluminium is  $85 \pm 17$  kWh elektriciteit nodig. Er is voor beide voorbereidingsstappen dan geen aardgas meer nodig.

Ook voor het geëlektrificeerde proces bepalen we de klimaatimpact bij de huidige elektriciteitsmix, de 2030-electriciteitsmix en de groene elektriciteitsmix.

In Figuur 22 staat de klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas met het basisproces en het geëlektrificeerde proces voor de huidige elektriciteitsmix, de 2030-mix en de groene mix. De vermeden impact van de uitgespaarde producten is nog niet in deze figuur meegenomen.

**FIGUUR 22** GEVOELIGHEIDSANALYSE: KLIMAATIMPACT VAN DE VERWERKING VAN 1 TON SLIBAS BIJ VERSCHILLENDE ELEKTRICITEITSMIXEN EN VOOR ELEKTRIFICATIE VAN HET SPODOFOS-PROCES



Bij het basisproces is de klimaatimpact  $94 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas bij de huidige elektriciteitsmix,  $77 \pm 9$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas bij de 2030-mix en  $72 \pm 8$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas bij de groene mix. Vooral de klimaatimpact van de RMC-unit en -reactor (gele balk) neemt sterk af bij een duurzamere elektriciteitsmix. Dit komt doordat dit sub-proces veel elektriciteit verbruikt in vergelijking met de andere sub-processen.

Bij het geëlektrificeerde proces is de klimaatimpact  $179 \pm 35$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas bij de huidige elektriciteitsmix,  $64 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas bij de 2030-mix en  $27 \pm 5$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas bij de groene mix.

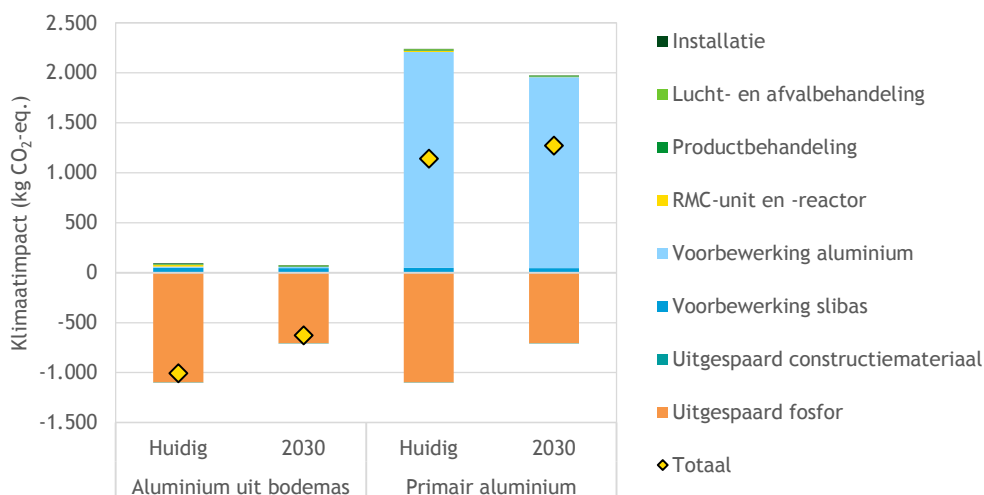
Bij de huidige elektriciteitsmix heeft het geëlektrificeerde proces een veel hogere klimaatimpact dan het basisproces. Dit komt doordat verhitten met behulp van elektriciteit veel minder efficiënt verloopt dan verhitting met behulp van aardgas. Door het hoge elektriciteitsverbruik heeft verduurzaming van de elektriciteitsmix wel een veel groter effect op de klimaatimpact. Met de 2030-mix is de klimaatimpact van het geëlektrificeerde proces ongeveer gelijk aan de klimaatimpact van het basisproces en bij een volledig groene mix is de klimaatimpact van het geëlektrificeerde proces veel lager.



In Figuur 23 staan de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse waarin ook het voordeel door uitgespaarde conventionele witte fosfor is meegenomen. In Figuur 23 worden vier cases bekeken. De twee balken links geven de klimaatimpact weer bij het gebruik van aluminium uit bodemas voor de huidige situatie (zoals in de basisanalyse) en het 2030 scenario. De twee balken rechts geven de klimaatimpact weer bij het gebruik van primair aluminium zoals in de basisanalyse en voor het 2030 scenario.

Zowel bij het gebruik van aluminium uit bodemassen als bij het gebruik van primair aluminium neemt de klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofos-proces toe in 2030. Dit komt doordat klimaatimpact van het uitgespaarde conventionele witte fosfor (volgens onze aannames) ook sterk afneemt in 2030. Hierdoor wordt de vermeden impact van het uitsparen van conventionele witte fosfor kleiner. De lagere klimaatimpact van het Spodofos-proces zelf weegt niet op tegen de lagere vermeden klimaatimpact.

FIGUUR 23 GEVOELIGHEIDSANALYSE: KLIMAATIMPACT VAN DE VERWERKING VAN 1 TON SLIBAS BIJ DE HUIDIGE OMSTANDIGHEDEN EN BIJ VERDUURZAMING VOLGENS HET 2030 SCENARIO, MET ALUMINIUM UIT BODEMAS EN PRIMAIR ALUMINIUM



#### 6.4.6 GEVOELIGHEIDSANALYSE VOOR VERSCHILLENDE FOSFORCONCENTRATIES

In basisanalyse zijn we uitgegaan van de verwerking van slibas met een fosforconcentratie van 10,1%. De fosforconcentraties in de slibas kunnen echter variëren en dit zal van invloed zijn op de inputs en outputs van het Spodofos-proces.

Om te bepalen in welke mate de fosforconcentratie van invloed is op de resultaten, voeren we de analyse uit voor twee verschillende fosforconcentraties. De laagst voorkomende fosforconcentratie is 6,3% en de hoogst voorkomende fosforconcentratie is 11,4% (paragraaf 2.3). In het model worden de volgende onderdelen aangepast:

- **Hoeveelheid aluminium:** Bij een lagere fosforconcentratie is minder aluminium nodig om het proces goed te laten verlopen (en bij een hogere concentratie meer). Doordat de hoeveelheid aluminium verandert, verandert ook de hoeveelheid elektriciteit en aardgas die nodig is voor het doseren en verhitten van het aluminium. We gaan ervan uit dat de hoeveelheid energie recht evenredig verband houdt met de hoeveelheid aluminium.
- **Producten:** De hoeveelheid fosfor, ferrofosfor en slak die geproduceerd wordt, hangt af van de samenstelling van de slibas en de fosforconcentratie. In Tabel 27 staan de hoeveelheden product bij verschillende fosforconcentraties weergegeven.

TABEL 27 DE HOEEVEELHEID PRODUCT BIJ VERSCHILLENDE FOSFORCONCENTRATIES (IN KG/TON SLIBAS)

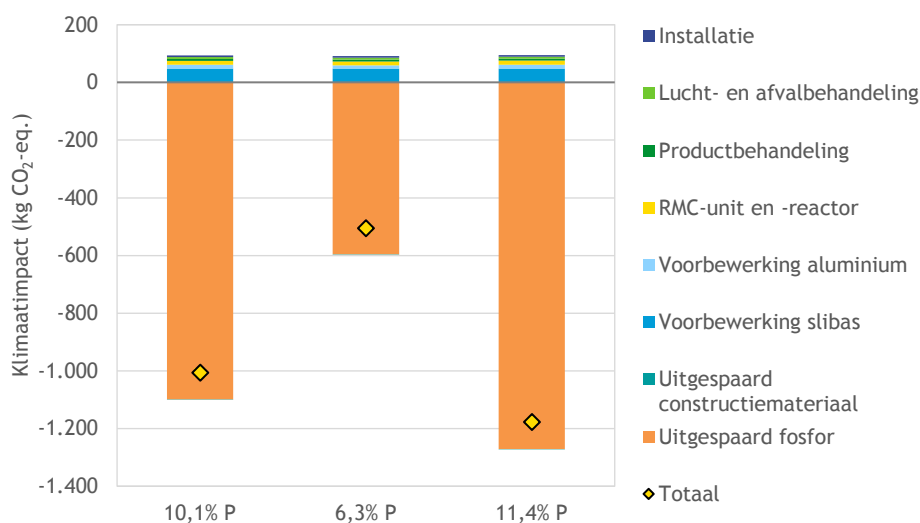
| Product (kg/ton) | 10,1% P | 6,3% P | 11,4% P |
|------------------|---------|--------|---------|
| Fosfor           | 83      | 45     | 96      |
| Ferrofosfor      | 116     | 115    | 120     |
| Slak             | 1.023   | 1.015  | 1.013   |

In Figuur 24 staan de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor de verschillende fosforconcentraties. Te zien is dat de klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofos-proces bij een lagere fosforconcentratie minder negatief en dus hoger wordt (er wordt minder klimaatimpact vermeden). Bij een hogere fosforconcentratie wordt de klimaatimpact meer negatief en dus lager.

Dit effect wordt veroorzaakt doordat bij een lagere fosforconcentratie veel minder fosfor geproduceerd wordt met het Spodofos-proces. Er wordt dan dus ook minder conventioneel fosfor uitgespaard, waardoor de bonus voor vermeden fosforproductie lager wordt.

De klimaatimpact van het Spodofos-proces zelf (het deel van de grafiek boven de x-as) neemt wel af bij een lagere fosforconcentratie, doordat er minder aluminium nodig is en voorbewerkt hoeft te worden. Dit effect is echter te klein om zichtbaar te worden in de resultaten in de grafiek.

FIGUUR 24 GEVOELIGHEIDSANALYSE: KLIMAATIMPACT VAN DE VERWERKING VAN SLIBAS MET VERSCHILLENDE FOSFORCONCENTRATIES



#### 6.4.7 KLIMAATIMPACT VAN DE PRODUCTEN

In de basisanalyse hebben we de klimaatimpact berekend van de verwerking van 1 ton slibas met het Spodofos-proces. Op basis van deze analyse is het ook mogelijk om de klimaatimpact van de afzonderlijke producten (witte fosfor, ferrofosfor en slak) te berekenen.

Voor deze benadering worden de systeemgrenzen van de analyse enigszins aangepast. We nemen nu niet meer de uitgespaarde producten door toepassing van witte fosfor en slak mee in de analyse. Daarentegen wordt wel het voorkomen van de verwerking van 1 ton slibas op de gangbare manier meegenomen. Voor de gangbare verwerking van slibas gaan we ervan uit dat slibas wordt ingezet als vulstof in zoutmijnen, als vulstof voor afdekking van stortplaatsen, als vulstof voor asfalt en als vulstof voor beton.

De totale klimaatimpact van het proces wordt verdeeld over de producten. De toekenning van de klimaatimpact aan de verschillende producten gebeurt op basis van economische allocatie. Dit betekent dat producten met een hogere economische waarde een hogere klimaatimpact krijgen toegekend. In Tabel 28 staan van de verschillende producten de geproduceerde hoeveelheid, prijs en berekende klimaatimpact genoemd.

**TABEL 28 DE HOEEVEELHEID, PRIJS EN KLIMAATIMPACT VAN DE VERSCHILLENDE PRODUCTEN VAN HET SPODOFOS-PROCES**

| Product      | Hoeveelheid (kg/ton slibas) | Prijs (€/kg) | Klimaatimpact (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg) |
|--------------|-----------------------------|--------------|--------------------------------------------|
| Witte fosfor | 83                          | € 2,9        | 0,77 ± 0,14                                |
| Ferrofosfor  | 116                         | € 0          | 0                                          |
| Slak         | 1.023                       | € 0,010      | 0,003 ± 0,0005                             |

De totale klimaatimpact van de witte fosfor geproduceerd met het Spodofos-proces komt dan op  $0,76 \pm 0,14$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton witte fosfor. Dit is veel lager dan de klimaatimpact van conventionele witte fosfor uit Azië (13 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg) dat het vervangt.

De klimaatimpact van de slak geproduceerd met het Spodofos-proces en ingezet als vulstof (vervanging van grind) is  $0,003 \pm 0,0005$  kg CO<sub>2</sub>-eq./kg. Deze klimaatimpact is net iets hoger dan de klimaatimpact van het grind (0,002 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg) dat vervangen wordt in de basis-analyse.

Als de slak in alternatieve toepassingen wordt ingezet en daardoor een hogere economische waarde krijgt, verandert zowel de klimaatimpact van de slak als van de witte fosfor. In Tabel 29 staat de klimaatimpact van witte fosfor en slak bij verschillende toepassing van slak en bij verschillende aluminiumbronnen. Bij toepassing als vormgegeven bouwstof nemen we een prijs aan van € 30/ton, bij toepassing in de vuurvastindustrie een prijs van € 130/ton.

TABEL 29 DE KLIMAATIMPACT VAN DE PRODUCTEN BIJ VERSCHILLENDE ECONOMISCHE WAARDES SLAK (BIJ GEBRUIK SECUNDAIR ALUMINIUM)

|              | Slak als vulstof<br>(€ 10/ton) | Klimaatimpact (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg)  |                                             |
|--------------|--------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
|              |                                | Slak als vormgegeven bouwstof<br>(€ 30/ton) | Slak in de vuurvastindustrie<br>(€ 130/ton) |
| Witte fosfor | 0,77 ± 0,14                    | 0,71 ± 0,13                                 | 0,51 ± 0,10                                 |
| Slak         | 0,003 ± 0,0005                 | 0,007 ± 0,001                               | 0,023 ± 0,004                               |

#### 6.4.8 CONCLUSIES

In de basisanalyse zijn we uitgegaan van de basiscase voor het Spodofos-proces, waarin gebruik wordt gemaakt van aluminium uit bodemas en conservatieve aannames zijn gedaan voor de toepassingen van de producten. Zoals hierboven ook in de verschillende gevoeligheidsanalyses is beschreven, zijn er ook andere opties voor het Spodofos-proces mogelijk waarin andere aluminiumbronnen worden gebruikt of de producten op andere manieren worden toegepast. In deze paragraaf combineren we een aantal van de resultaten uit de gevoeligheidsanalyse om te kijken hoe bepaalde keuzes in het ontwerp van het Spodofos-proces de klimaatimpact kunnen beïnvloeden. We geven hiermee inzicht in de mogelijke bandbreedte in de resultaten.

We kijken naar zes verschillende scenario's, in drie daarvan wordt aluminium uit bodemas gebruikt (Basis-scenario's), in de andere drie wordt primair aluminium gebruikt (Primair Al-scenario's). Voor zowel aluminium uit bodemas als primair aluminium kijken we naar de combinatie van de toepassing van ferrofosfor als ijzer en slak als bouwstof en de combinatie van de toepassing van ferrofosfor als ijzer en slak als vuurvastmateriaal. In Tabel 30 staat welke processen in welk scenario worden meegenomen.

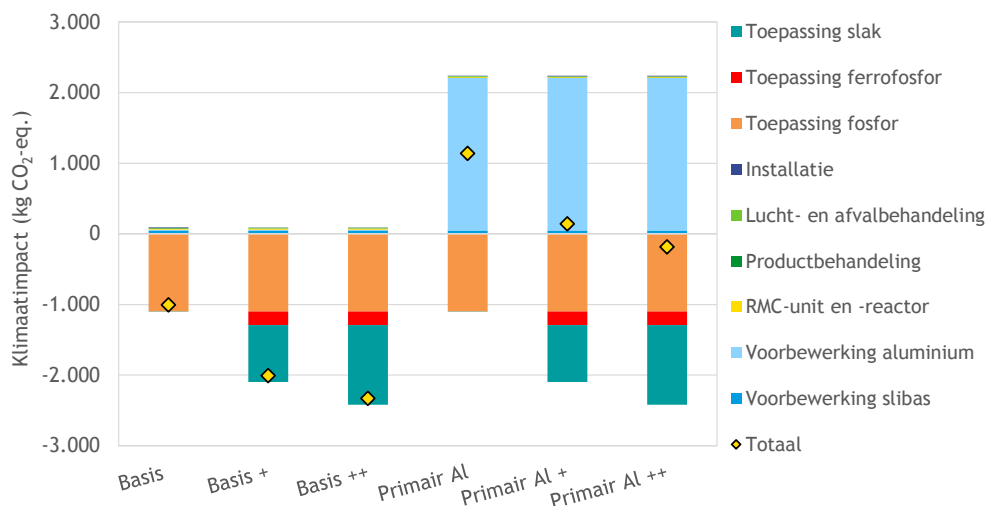
TABEL 30 PROCESSEN MEEGENOMEN IN DE VERSCHILLENDE SCENARIO'S EN DE TOTALE KLIMAATIMPACT VAN DE VERWERKING VAN 1 TON SLIBAS PER SCENARIO

| Scenario     | Aluminium uit<br>bodemas | Primair<br>aluminium | Ferrofosfor<br>→ ijzer | Slak<br>→ bouwstof | Slak<br>→ vuurvastmateriaal | Klimaatimpact<br>(kg CO <sub>2</sub> -eq./kg slibas) |
|--------------|--------------------------|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------|
| Basis        | X                        |                      |                        |                    |                             | -1.007                                               |
| Basis+       | X                        |                      | X                      | X                  |                             | -2.005                                               |
| Basis++      | X                        |                      | X                      |                    | X                           | -2.328                                               |
| Primair Al   |                          | X                    |                        |                    |                             | 1.139                                                |
| Primair Al+  |                          | X                    | X                      | X                  |                             | 141                                                  |
| Primair Al++ |                          | X                    | X                      |                    | X                           | -138                                                 |

In Figuur 25 staat de klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas met het Spodofos-proces voor de zes verschillende scenario's. De totale klimaatimpact per scenario staat ook in Tabel 30.

FIGUUR 25

DE KLIMAATIMPACT VAN DE VERWERKING VAN 1 TON SLIBAS MET HET SPODOFOS-PROCES VOOR VERSCHILLENDE SCENARIO'S



In de 'Basis'-scenario's wordt aluminium uit bodemas gebruikt, in de 'Primair Al'-scenario's wordt primair aluminium gebruikt. In de '+'-scenario's wordt ferrofosfor toegepast als vervanging van ijzer en slak als vormgegeven bouwstof. In de '++'-scenario's wordt ferrofosfor toegepast als vervanging van ijzer en slak als vervanging van alumina in de vuurvastindustrie.

Bij alle drie de scenario's waarin aluminium uit bodemas gebruikt wordt, is de klimaatimpact negatief, wat betekent dat er meer uitstoot vermeden dan uitgestoten wordt. Het resultaat is het gunstigst als het gebruik van aluminium uit bodemas gecombineerd wordt met de toepassing van ferrofosfor als ijzer en de toepassing van slak als vuurvastmateriaal.

Bij het gebruik van primair aluminium is de klimaatimpact positief bij toepassing van ferrofosfor als ijzer gecombineerd met de toepassing van slak als vormgegeven bouwstof. Er wordt dan dus meer CO<sub>2</sub> uitgestoten dan er uitstoot vermeden wordt. De laagste klimaatimpact in de Primair Al-scenario's is als ferrofosfor als ijzervervanging ingezet wordt en slak toegepast wordt als vuurvastmateriaal. De klimaatimpact is dan negatief en er wordt dan dus minder CO<sub>2</sub> uitgestoten dan er vermeden wordt.

## 6.5 SCHAARSTE-ANALYSE

Dit hoofdstuk heeft als doel om input te geven voor de discussie over de bijdrage van het Spodofos-proces aan (het voorkomen van) schaarste van minerale grondstoffen. Hoe schaars een grondstof is heeft te maken met de aanwezigheid en de toegankelijkheid van een grondstof, en met de vraag naar een grondstof in de economie. Achter de discussie over schaarste ligt de vraag of het terugwinnen van fosfor met het Spodofos-proces, waarbij aluminium verbruikt wordt en verloren gaat, een voldoende zinvolle bijdrage levert op deze aspecten.

Als er uit 1 ton as 83 kg fosfor wordt teruggewonnen met het Spodofos-proces, wordt er tegelijkertijd 222 kg aluminium verbruikt. Meer toegespitst luidt de vraag dan: 'Weegt het voordeel van het terugwinnen van fosfor met het Spodofos-proces op tegen het nadeel van verbruik van aluminium?' In dit hoofdstuk gaan wij in op de aanwezigheid en toegankelijkheid van, en de vraag naar deze eindige grondstoffen. Dit legt de basis om, in combinatie met een economische en strategische analyse, een keuze te maken voor toepassing van het Spodofos-proces.

### 6.5.1 OVERZICHTSTABEL VERGELIJKING ALUMINIUM EN WITTE FOSFOR

De belangrijkste bevindingen uit de schaarste-analyse worden in Tabel 31 weergegeven. Meer informatie over deze bevindingen is te vinden in de Paragrafen 6.5.2 t/m 6.5.4.

TABEL 31 BELANGRIJKSTE BEVINDINGEN UIT DE SCHAARSTE-ANALYSE, OP VERSCHILLENDE INDICATOREN

| Indicator                             | Fosfor                                                                                                                             | Aluminium                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Grootte reserves erts                 | 72.000 Mton fosforeerts                                                                                                            | 55.000-75.000 Mton bauxiet                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Jaarlijkse winning                    | 223 Mton fosforeerts/jaar                                                                                                          | 371 Mton bauxiet/jaar                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Locatie reserves erts                 | Marokko (50.000 Mton), China, kleinere reserves in andere landen                                                                   | Afrika (32%), Oceanië (vooral Australië) (23%), Zuid-Amerika en de Caribbean (21%), Azië (18%), en andere locaties (6%)                                                                                                                                                                                       |
| Status in de EU                       | Kritieke grondstof                                                                                                                 | Geen kritieke grondstof                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Afhankelijkheid EU                    | Geen productie in EU, import geheel uit Vietnam en Kazachstan                                                                      | - Eigen productie primair: 3,2 Mton<br>- Eigen productie secundair: 5,2 Mton<br>- Import: 4,3 Mton                                                                                                                                                                                                            |
| Mogelijkheden voor terugwinning       | Fosfor en fosfaat wordt nog maar zeer beperkt teruggewonnen. In de landbouw spoelt fosfaat op grote schaal uit naar het milieu.    | Aluminium wordt op grote schaal gerecycled. Bijna al het aluminium dat vrij komt is als secundair aluminium opnieuw in te zetten. Het aanbod van secundair aluminium stijgt.                                                                                                                                  |
| Kwaliteit in/voor Spodofos-proces     | Witte fosfor ( $P_4$ ) wordt teruggewonnen, dit is een hoogwaardige grondstof in de chemische industrie                            | Secundair aluminium uit verschillende bronnen is geschikt voor het Spodofos-proces                                                                                                                                                                                                                            |
| Effecten Spodofos-proces op schaarste | Witte fosfor wordt teruggewonnen uit slibas, waar het anders in de slibas als vulstof in zoutmijnen of asfalt toegepast zou worden | Aluminium wordt verbruikt en komt als aluminiumoxide in de slak terecht. Doordat aluminium verbruikt wordt, kan dit als effect hebben dat wereldwijd meer primair aluminium geproduceerd moet worden. Als de slak wordt toegepast in de vuurvastindustrie en daar alumina vervangt, speelt dit probleem niet. |

### 6.5.2 MONDIALE AANWEZIGHEID VAN DE GRONDSTOFFEN

#### WAAR BEVINDEN ZICH WELKE FOSFORRESERVES?

De grondstof voor primaire fosforproductie is fosfaaterts. Volgens de meest recente schatting zijn er wereldwijd 72.000 miljoen ton (Mton) fosforeerts aanwezig in toegankelijke reservoirs. Deze voorraad is geografisch ongelijk verdeeld. In Marokko liggen met afstand de grootste reservoirs (50.000 Mton). Ook in andere Noord-Afrikaanse landen komt fosfaaterts voor, maar in veel mindere mate. In Egypte ligt bijvoorbeeld het op één na grootste reservoir in Noord-Afrika (2.800 Mton) (USGS, 2021b). China is het land met de op één na grootste fosforvoorraad (3.200 Mton).

De grootste productie en winning van fosfaaterts vindt plaats in China (90 Mton/jaar; data van 2020 (USGS, 2021b) Daarna volgt Marokko met 37 Mton/jaar, de VS met 24 Mton/jaar, en Rusland met 13 Mton/jaar. De wereldwijde productie was in 2020 223 Mton fosforeerts (USGS, 2021b).

#### WAAR BEVINDEN ZICH WELKE ALUMINIUMRESERVES?

De grondstof voor primaire aluminiumproductie is bauxiet. Bauxiet wordt vervolgens in raffinaderijen opgewerkt tot 'alumina', ofwel aluminiumoxide. Alumina worden uiteindelijk als grondstof gebruikt in aluminiumsmelterijen. Volgens de meest recente schatting zijn er wereldwijd 55.000-75.000 Mton bauxiet aanwezig in toegankelijke reservoirs (USGS, 2021a). Deze reserves zijn als volgt verdeeld: Afrika (32%), Oceanië (vooral Australië) (23%), Zuid-Amerika en de Caribbean (21%), Azië (18%), en andere locaties (6%)(USGS, 2021a). In 2020 werden er wereldwijd 371 Mton aan bauxiet gewonnen.

USGS (2021a) zegt over de uitputbaarheid van grondstoffen voor aluminium dat de reserves de behoefte zullen dekken “well into the future”, en dat zelfs landen als de VS, waar geen bauxietreserves aanwezig zijn, in essentie onuitputbare sub-economische reserves voor aluminium aanwezig zijn die géén bauxiet zijn<sup>5</sup>.

#### **WAARVOOR WORDT ALUMINIUM UIT BODEMAS NU GEBRUIKT?**

Het aluminium dat uit bodemassen wordt gewonnen bestaat uit korrels aluminium dat met sorteerprocessen uit de rest van de bodemas wordt gescheiden. Dit aluminium kan worden ingesmolten. Consultant Doradztwo die de marktanalyse uitgevoerd heeft (Doradztwo, 2021b) geeft aan dat dit aluminium waarschijnlijk op dezelfde manier inzetbaar is als andere soorten post-consumerschroot. Dit wordt vooral gebruikt in giettoepassingen. Voor wals- en extrusietoepassingen is een hogere kwaliteit aluminium nodig (Hatayama et al., 2012).

#### **WELKE INVLOED OP DE MARKT HEEFT AFNAME VAN SECUNDAIR ALUMINIUM DOOR HET SPODOFOS-PROCES?**

Het feit dat aluminium uit bodemas waarschijnlijk op dezelfde manier inzetbaar is als andere soorten post-consumerschroot, betekent dat het mogelijk is dat Spodofos met andere markten concurreert om dit materiaal. Bij toepassing van een mix aan typen schroot zoals voorgesteld door Doradztwo, (2021b) is dat zeker het geval. Toepassing van het Spodofos-proces kan zo indirect de productie van primair aluminium verhogen. Op dit moment is dit onduidelijk, maar bovenstaande geeft aan dat dit een reëel risico is.

Als gebruik van secundair aluminium door het Spodofos-proces indirect zorgt voor meer productie primair aluminium, is de vraag of het terugwinnen van fosfor dan opweegt tegen het gebruik van aluminium. Dit is een vraag waar we met behulp van LCA een antwoord op gezocht hebben, toegelicht in Paragraaf 6.5.4.

### **6.5.3 TOEGANKELIJKHEID**

#### **HOE KRITIEK ZIJN FOSFOR EN ALUMINIUM ALS GRONDSTOF VOLGENS DE EU?**

P4 en fosforiet (fosfaatgesteente) zijn in 2017 toegevoegd aan de EU-lijst met 27 kritieke grondstoffen (EC, 2017). Voor grondstoffen op deze lijst is “het risico op een ontoereikende voorziening en de daaruit voortvloeiende economische effecten groter [...] dan bij de meeste andere grondstoffen” (EC, 2017). Voor deze stoffen wordt bijzondere nadruk gelegd op het belang van innovatie en initiatieven om de stoffen beter te kunnen recyclen, te mijnen of te vervangen. Aluminium staat niet op deze lijst.

#### **HOE LANG BESTAAN ER NOG TOEGANKELIJKE FOSFORRESERVES?**

De fosforkringloop is nog ver van gesloten. Fosfor belandt via rioolwater en afspoelen van (bemeste) landbouwgrond in het oppervlaktewater, en wordt daardoor ontoegankelijk als grondstof. De schattingen voor de termijn waarop de voorraad aan fosfor de jaarlijkse behoefte aan fosfor kan dekken, lopen uiteen en liggen tussen 60-130 jaar (Schroder et al., 2010). Dit heeft te maken met aannames over de ontwikkeling van de vraag, en de efficiëntie waarmee fosfor uit het fosforerts en de mijnen wordt onttrokken. Een studie van (Cooper et al., 2011) zegt dat 70% van de huidige productie uit mijnen komt die in 2100 uitgeput zullen zijn. In combinatie met een stijgende vraag zou dit ertoe leiden dat het productiedeficit in 2070 groter is dan de huidige vraag (Cooper et al., 2011).

5 “Domestic resources of bauxite are inadequate to meet long-term U.S. demand, but the United States and most other major aluminum-producing countries have essentially inexhaustible subeconomic resources of aluminum in materials other than bauxite.” (USGS, 2021a)

### HOE AFHANKELIJK IS EUROPA VAN FOSFORIMPORT (FOSFOR ALGEMEEN)?

Volgens Cooper et al. (2011), heeft Marokko bijna 77% van alle wereldwijde reserves in handen. Als Marokko de productie voor 2075 met 700% verhoogt, kan het dreigende deficit verregaand worden gedekt. Als dit gebeurt, zal Marokko's aandeel aan de wereldproductie van ongeveer 15% (in 2010) groeien naar rond de 80% in 2100. Ook is de kans groot dat de productie-efficiëntie in Marokko nog hoger wordt, waarmee fosfor hier nog beter toegankelijk wordt. Dit kan ervoor zorgen dat Marokko's aandeel van de wereldvoorraad gaat groeien van 77% naar 89%. Hiermee impliceert het onderzoek van (Cooper et al., 2011) dat de wereldwijde voorziening van fosfor tegen het einde van de eeuw voor het allergrootste deel afhankelijk is van één land. Dit kan worden voorkomen als er nieuwe bronnen ontdekt en/ of toegankelijk worden gemaakt, en als fosforrecycling op beduidend grotere schaal mogelijk en toegepast wordt (Cooper et al., 2011).

### HOE AFHANKELIJK IS EUROPA VAN IMPORT VAN ELEMENTAIRE/WITTE FOSFOR ( $P_4$ )?

In Europa vindt sinds 2012 geen productie van  $P_4$  meer plaats (ESPP, 2017). De huidige importafhankelijkheid van  $P_4$  is ongeveer 50-60 kt  $P_4$ /jaar (ESPP, 2020).  $P_4$  komt voornamelijk uit Vietnam en Kazachstan (ESPP, 2017). In de VS en China vindt ook aanzienlijke  $P_4$ -productie plaats. Dit is voornamelijk voor eigen gebruik in deze landen bestemd. Er is enige export van  $P_4$ -producten en fosforzuur uit de VS en China. Echter, het transport van deze stoffen is gecompliceerd, waardoor deze producten meestal niet van ver worden geïmporteerd (ESPP, 2020).

### HOE AFHANKELIJK IS EUROPA VAN DE IMPORT VAN PRIMAIR ALUMINIUM?

Wereldwijd wordt jaarlijks rond de 65 Mton primair aluminium geproduceerd. Meer dan de helft van de productie vindt plaats in China (rond de 35 Mton). Acht andere regio's produceren ieder 1-5 Mton. De aluminiumproductie binnen de EU bedraagt jaarlijks rond de 3,8 Mton. Hiervoor komt klein een deel van het benodigde bauxiet uit Europese mijnen (rond de 0,2 Mton). Het overige (opgewerkte) bauxiet dat in Europa wordt verwerkt komt voornamelijk van 'overige regio's'<sup>6</sup> en voor een deel uit Zuid Amerika.

In Europa werd in 2020 12,7 Mton aluminium gebruikt. 8,4 Mton daarvan kwam uit eigen productie. Hiervan is ongeveer 5,2 Mton secundair aluminium van Europese bodem. 4,3 Mton aluminium kwam uit import. Europa importeert dus ongeveer één derde van haar jaarlijkse aluminiumbehoefte (IAI, 2021b)

### HOE GAAN HET AANBOD EN DE VRAAG NAAR SECUNDAIR ALUMINIUM ZICH IN DE TOEKOMST ONTWIKKELEN?

Het aanbod van secundair aluminium gaat stijgen naarmate aluminium vrijkomt uit de toepassingen waar het nu in verwerkt is. Dit gebeurt als deze toepassingen hun einde-levensfase bereiken. De European Aluminium Association (EAA) schat dat tegen 2050 ongeveer de helft van de Europese aluminiumvraag door gerecycled aluminium ingevuld wordt (European Aluminium, 2021). Nu dekken pre- en post-consumerschroot 36% van de aluminiumvraag in Europa (paragraaf 5.2). Omdat aluminium goed recyclebaar is, is het aannemelijk dat de vraag naar gerecycled aluminium blijft toenemen met het toenemende aanbod van secundair aluminium; al het gerecycled aluminium zal een hoogwaardige toepassing kennen. Paragraaf 5.2 laat zien dat de markt voor aluminiumschroot groot genoeg is om de vraag van het Spodofos-proces (12kt aluminium/jaar voor de full-scale opstelling waar in dit project van uit wordt gegaan) te dekken, en dat er geen problemen zullen zijn met de voorziening.

<sup>6</sup> De bron noemt niet welke landen hieronder vallen, maar regio's die hier in ieder geval niet onder vallen zijn China, rest van Azië, Midden-Oosten en Noord-Amerika.



Eén van de industrieën die de grootste invloed heeft op aanbod en vraag naar secundair aluminium is de auto-industrie. Een ontwikkeling om in het oog te houden voltrekt zich in de toepassing van secundair aluminium in de vorm van gietmetaal dat wordt gebruikt voor de omkasting van motorblokken van brandstofmotoren (Hatayama et al., 2012). Met de transitie naar elektrisch vervoer wordt de vraag naar deze toepassing kleiner (ibid.). De omkasting van elektromotoren wordt nu namelijk hoofdzakelijk van primair aluminium gemaakt. Echter, door zwaardere eisen van de Europese overheid stijgt ook het gebruik van secundair aluminiumgebruik in de omkasting van elektromotoren (paragraaf 5.2). Hoe de balans tussen vraag en aanbod hierdoor verandert is niet eenduidig te voorzien.

#### **HOE VERHOUDT GEBRUIK VAN ALUMINIUM DOOR HET SPODOFOS-PROCES ZICH TOT TOEKOMST-VERWACHTINGEN?**

In paragraaf 5.2 wordt voorgesteld dat Spodofos een mix zal gebruiken van drie soorten schroot, die samen bijna 40% van al het beschikbare schroot beslaan: 'dross and granules' (16%), 'turnings' (14%), en 'incinerator aluminium' (= uit bodemas; 8%). Als Spodofos uitsluitend aluminium uit bodemas gebruikt, komt de hele aluminiumvraag van het proces dus uit 8% van het totale schrootaanbod in plaats van uit 40% van het aanbod. Het aandeel dat Spodofos van deze ene schrootstroom gebruikt, wordt dus ook groter. Het is niet bekend wat dit betekent voor andere markten die vraag hebben naar dezelfde grondstof. De meest actuele schattingen voor het aanbod van aluminium uit bodemas zijn gemaakt in 2014. Deze projecteerden een groei van ca. 110 kt in 2006 naar ca. 300-500 kt in 2020 in Europa (European Aluminium, 2014). De aluminiumvraag van Spodofos is 12 kt/jaar.

#### **HOE TOEGANKELIJK IS ALUMINIUM NA GEBRUIK IN HET SPODOFOS-PROCES?**

Aluminium wordt bij Spodofos geoxideerd en is daarna niet meer (direct) beschikbaar als secundair materiaal. Dit maakt secundair aluminium schaarser. Mogelijk kan het opgewaardeerd worden door het, net als aluminiumoxide uit bauxiet, te reduceren. Hiervoor is energie nodig. In dat geval blijft aluminium als element wel toegankelijk, maar de terugwinning ervan voor bruikbaar materiaal is energie-intensief, mogelijk net zo energie-intensief als de productie van primair aluminium uit aluminiumoxide. Het aandeel in de klimaatimpact van aluminium dat wordt veroorzaakt door het mijnen van bauxiet, is namelijk kleiner dan 1% (Data van (IAI, 2018)). Daarnaast is het de vraag of er terugwinprocessen zijn waarvoor de reststroom (slak) van het Spodofos-proces als input kan dienen. Als dit niet het geval is, is het aluminium in de slak niet meer toegankelijk, waarmee aluminium schaarser wordt. Zoals toegelicht in Paragraaf 6.4.3, is een potentiële toepassing van de slak de vuurvastindustrie, waar het mogelijk alumina kan vervangen.

#### **WAAR WORDT FOSFOR NU VOOR GEBRUIKT, EN WELK AANDEEL SPEELT WITTE FOSFOR DAARIN?**

Maar 4% van het gewonnen primaire fosfaat wordt gebruikt om witte (elementaire) fosfor te produceren voor de toepassingen, waar ook het fosfor uit het Spodofos-proces voor is bestemd (ESPP, 2020). De andere 96% worden toegepast als meststof of supplementen in (dier)voeding. Als de fosforkringloop in de landbouw- en voedselketen beter gesloten wordt, kan dit dus veel uitmaken voor de beschikbare voorraad aan primair fosforeerts.

#### **WAAR WORDT WITTE FOSFOR VOOR GEBRUIKT, NU EN IN DE TOEKOMST?**

Het is nog onzeker of de vraag naar witte fosfor in de EU gaat groeien of dalen. Voor beide richtingen zijn er ontwikkelingen aan te wijzen (ESPP, 2020). Hierna worden vier groepen van toepassingen genoemd, waarvoor hoeveelheden gebruikte  $P_4$  bekend zijn, of zijn ingeschat. Samen is dit een inschatting van het totale  $P_4$ -gebruik in Europa.

1. Landbouwchemicaliën: 10 kt P/jaar (ESPP, 2020).
2. Brandvertragers: 10 kt P/jaar (ESPP, 2020).
3. Fosfonaten (antiscalant in membraantechnologie, wasmiddelen): 16 kt P/jaar (ESPP, 2020).
4. Katalysatoren, chemicaliën voor metaalwinning, farmaceutische producten, electronic-grade fosforzuur, vuurwerk, lithium-ion- en lithium-ijzerbatterijen: Geen data. Het gebruik voor deze toepassingen is waarschijnlijk relatief klein, ondanks hun hoge relevantie voor sommige industrieën (bijvoorbeeld elektronica, katalysatoren, productie van zeldzame metalen). Een grove inschatting van 5-15 kt P/jaar zal het gebruik voor deze toepassingen afdekken (ESPP, 2020).

Op dit moment is het gebruik van  $P_4$  over de verschillende (groepen van) toepassingen vergelijkbaar groot. Het is waarschijnlijk dat het gebruik in de groep agrochemicaliën gaat afnemen, door uitfasering van een aantal omstreden bestrijdingsmiddelen (ESPP, 2020)<sup>7</sup>. Het gebruik in brandvertragers en lithium-ionbatterijen zal toenemen met een stijgend gebruik van isolatiemateriaal in verband met de energietransitie en goede werking van  $P_4$ -brandvertragers. Ook een stijgende vraag naar lithium-ionbatterijen door elektrificatie/opslag van groene energie zal een toename in  $P_4$ -verbruik met zich meebrengen (ESPP, 2020). Voor fosfonaten zijn er geen aannames bekend over de ontwikkeling van de vraag in de toekomst.

#### 6.5.4 HOE GAAT LCA OM MET DEZE ASPECTEN VAN SCHAARSTE, EN WAT ZEGGEN DE MODELBEREKENINGEN?

Een LCA-berekening op het aspect schaarste van minerale grondstoffen kan helpen bij het beantwoorden van de vraag: 'Weegt het voordeel van het terugwinnen van fosfor met het Spodofos-proces op tegen het nadeel van verbruik van aluminium?' Zowel de veroorzaakte schaarste door het gebruik van aluminium (en andere grondstoffen) wordt berekend, als ook de schaarste die door het terugwinnen van het product witte fosfor wordt vermeden. De som van de schaarste veroorzaakt door gebruikte en vermeden grondstoffen kan dan positief of negatief zijn, waarbij negatieve schaarste betekent dat er in totaal schaarste wordt vermeden.

#### VERSCHILLENDE METHODEN, VERSCHILLENDE UITKOMSTEN

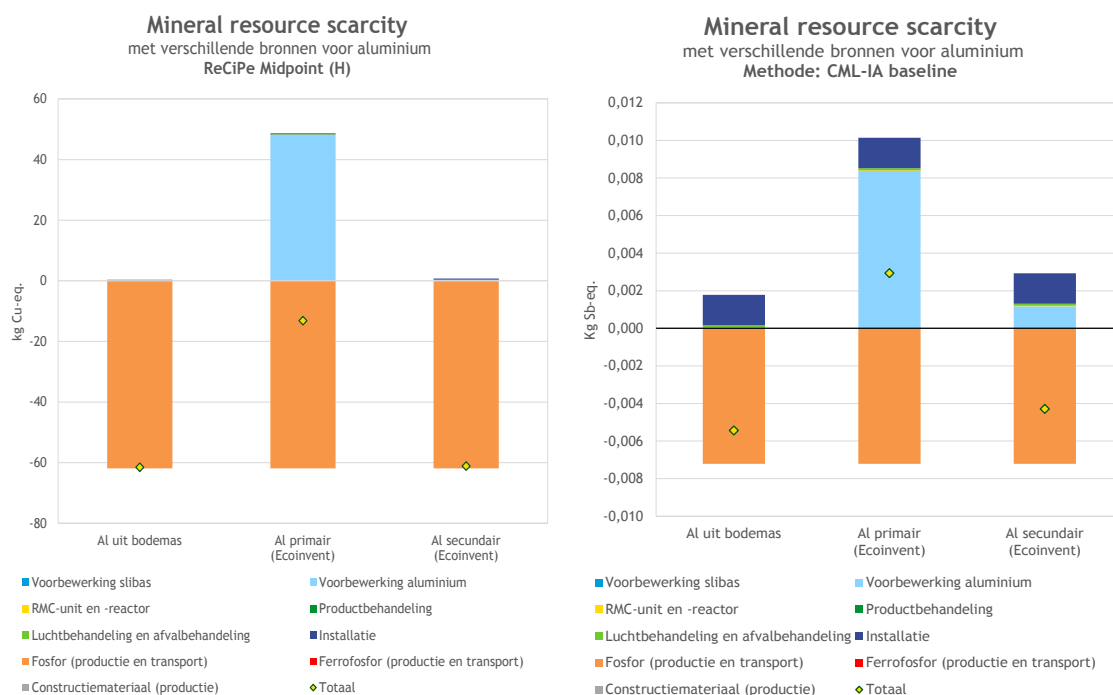
We hebben twee methodes gebruikt om de schaarste te analyseren voor het Spodofos-proces, namelijk ReCiPe Midpoint (H) (hierna aan gerefereerd als 'ReCiPe') en CML-IA baseline (hierna aan gerefereerd als 'CML'). De CML-methode wordt in de Product Environmental Footprint methode gebruikt voor de schaarstedoorrekening. Net als bij de gevoeligheidsanalyse van de klimaatimpact voor aluminiuminput (zie Paragraaf 6.4.4) hebben we drie scenario's doorge-rekend.

1. Het uitgangsscenario, waarbij aluminium uit bodemas van AVI's wordt gebruikt, zoals voor-genomen voor het Spodofos-proces.
2. Scenario waarbij primair aluminium wordt gebruikt. Dit heeft hetzelfde effect als wanneer er wordt aangenomen dat het secundaire aluminium uit de bodemas ook had kunnen worden ingezet om primair aluminium uit te sparen.
3. Scenario waarbij ander aluminiumschroot wordt ingezet. Hierbij wordt hetzelfde proces uit Ecoinvent gebruikt als voor de gevoeligheidsanalyse van de klimaatimpact (zie Paragraaf 6.4.4).

<sup>7</sup> Bijvoorbeeld glyfosaat, nu goedgekeurd voor gebruik in de EU tot eind 2022.

De resultaten blijken te leiden tot twee tegenovergestelde antwoorden op de hoofdvraag van de schaarste-analyse: 'Weegt het voordeel van het terugwinnen van fosfor met het Spodofos-proces op tegen het nadeel van verbruik van aluminium?' Figuur 26 toont de resultaten van de LCA-berekeningen op de impactcategorie schaarste van minerale grondstoffen voor de drie scenario's met twee verschillende LCA-methoden. Voor beide methoden geldt dat de impact op schaarste het laagst is bij het gebruik van aluminium uit bodemas (linker balk), en het hoogst bij het gebruik van primair aluminium (middelste balk). Het grote verschil tussen de twee methodes is dat het totaal bij het gebruik van primair aluminium bij ReCiPe negatief (aantrekkelijk voor Spodofos) is (Figuur 26 Links) en bij CML positief (onaantrekkelijk voor Spodofos) (Figuur 26 Rechts). Als de totale veroorzaakte schaarste van minerale grondstoffen negatief is, betekent dit dat het gunstige effect van het terugwinnen van fosfor opweegt tegen de ongunstige effecten van het benodigde aluminium voor het proces. Dit is in de resultaten van de analyse met ReCiPe het geval (Figuur 26 Rechts). In de analyse met CML is de uitkomst tegenovergesteld: hier is de totale veroorzaakte schaarste bij het gebruik van primair aluminium positief (zie Figuur 26 Rechts). Dit zou betekenen dat het gunstige effect van het terugwinnen van fosfor niet opweegt tegen de ongunstige effecten van het benodigde aluminium. Dit zijn twee tegenovergestelde antwoorden op de hoofdvraag van de schaarste-analyse.

**FIGUUR 26** MINERAL RESOURCE SCARCITY MET VERSCHILLENDE BRONNEN VOOR ALUMINIUM. BEREKEND MET TWEE METHODEN: LINKS: RECIPE 2016 MIDPOINT (H) EN RECHTS: CML-IA BASELINE V.3.06



Waar komt dit verschil vandaan? Als we kijken naar de karakterisatiefactoren in beide methoden voor onttrekking van fosfor en van aluminium zien we het volgende: de verhouding tussen de karakterisatiefactoren van fosfor en van aluminium is verschillend. Dit is samengevat in Tabel 32. Zoals weergegeven wordt fosfor veel zwaarder doorgerekend dan aluminium in de CML-methode. Bij ReCiPe wordt koper (Cu) gebruikt als element waarmee alle andere elementen worden vergeleken, bij CML is dit antimoon (Sb). Of dit laatste de oorzaak is van de verschillen in relatieve karakterisatiefactoren is onduidelijk.

TABEL 32 KARAKTERISATIEFACTOREN VAN P EN AL IN CML EN RECIPE

| Methode                 | ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04/<br>World (2010) H | CML-IA baseline V3.06/EU25 |
|-------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|
| Karakterisatie-eenheid  | kg Cu eq./kg stof                                 | kg Sb eq./kg stof          |
| Karakterisatiefactor P  | 1,67E-01                                          | 5,52E-06                   |
| Karakterisatiefactor Al | 1,69E-01                                          | 1,09E-09                   |
| Verhouding P : Al       | ~1                                                | 5.064                      |

Op basis hiervan zou de verwachting zijn dat de schaarste-analyse doorgerekend met de CML-methode voor het Spodofos-proces voordeliger zou uitpakken dan doorgerekend met ReCiPe. De reden dat dit niet zo is, ligt in de keten: andere materialen die in het proces (en in de keten) gebruikt worden, worden ook anders gewaardeerd in beide methoden. Hierbij geldt dat er bij doorrekening met de CML-methode méér van de schaarste-impact toegerekend wordt aan P en Al. Het voordeel dat we voor het Spodofos-proces presenteren in Figuur 26 is het voordeel van het vermeden  $P_4$  proces, en daarin spelen blijkbaar verschillende materialen een rol.

De hiervoor beschreven situatie – tegenovergestelde uitkomsten met verschillende methodes, en de reden hiervoor – duidt erop dat deze LCA-berekeningen niet geschikt zijn om de vraag eenduidig te beantwoorden of het voordeel van het terugwinnen van fosfor met het Spodofos-proces opweegt tegen het nadeel van het verbruik van aluminium.

#### WAT ZIJN DE METHODOLOGISCHE ONTWIKKELINGEN?

##### *Ontwikkelingen in de methodiek*

Schaarste is een impactcategorie van LCA-berekeningen waar in de wetenschap nog gewerkt wordt richting consensus over de betekenis van, en de omgang met schaarste (Schulze et al., 2020a). Recente publicaties beschrijven processen om gezamenlijk met stakeholders uit wetenschap, bedrijfsleven, industrie en mijnbouw tot de meest praktische en representatieve manieren te komen om via LCI-data tot uitspraken over de impact op schaarste van een materiaal te komen (Schulze et al., 2020a, Schulze et al., 2020b, van Oers et al., 2012). Deze processen leidden tot de conclusie dat de methode van schaarste-analyses zullen veranderen ten opzichte van huidige praktijken. Deze veranderingen zullen gaan over uitgangspunten en berekeningen die ten grondslag liggen aan de methodes. De verschillen zitten in opvattingen over de rol van grondstoffen, het doel en de afbakening, en het probleem van het gebruik van grondstoffen (Schulze et al., 2020a).

##### *Hoe wordt schaarste berekend en wat zijn bepalende factoren?*

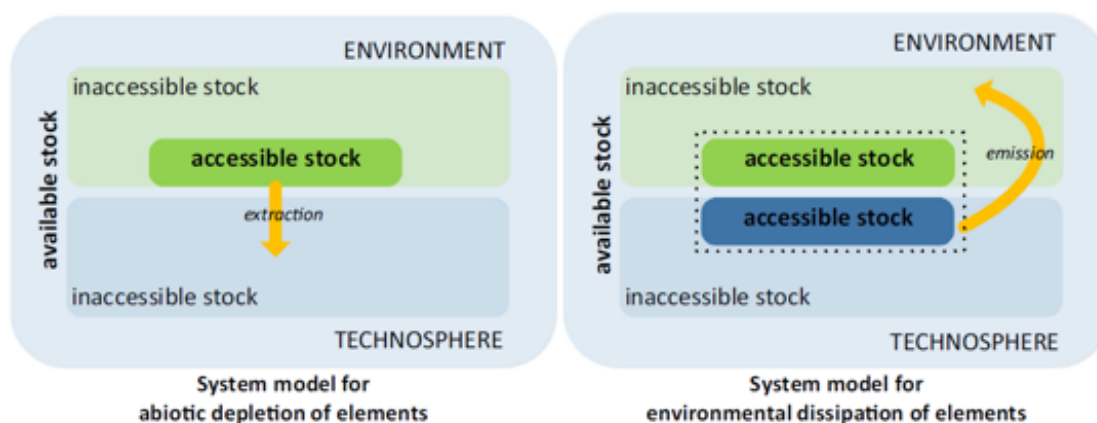
Sinds 1995 zeggen berekeningen over schaarste in LCA-methodes iets over de impactcategorie *Abiotic depletion of elements* (ADP, NL: uitputting van abiotische grondstoffen). Aan ADP ligt de gedachte ten grondslag dat de uitputting van een grondstof groter wordt op het moment dat de grondstof uit zijn natuurlijke reservoir wordt onttrokken. Hierdoor wordt de primaire grondstof op lange termijn minder toegankelijk, en dát is een probleem dat door het gebruik van grondstoffen ontstaat (van Oers et al., 2012). Hierbij wordt gekeken naar de elementen waar een grondstof uit bestaat. Deze methode ligt ten grondslag aan de resultaten zoals gepresenteerd in Figuur 26.

Het consensusproces in 2020 door van Schulze et al., (2020a) (2020b) leidde tot een nieuwe impactcategorie, namelijk *Environmental dissipation of elements* (EDP, NL: verlies van elementen aan het milieu). Er zijn twee grote verschillen tussen ADP en EDP. Het eerste verschil is dat

niet het onttrekken van een grondstof voor schaarste zorgt, maar het onbeschikbaar worden door emissies van de grondstof aan het milieu. Deze emissies zorgen er namelijk voor dat de grondstof niet meer toegankelijk is voor gebruik, en dat is een probleem dat door het gebruik van grondstoffen ontstaat. Hierbij worden individuele elementen bekeken, bijvoorbeeld ijzer en niet ijzererts. Het tweede verschil met ADP is dat secundaire grondstoffen meetellen als beschikbare grondstof, en niet alleen primaire grondstoffen.

Materiaal dat in gebruik is, wordt gezien als grondstof die op de lange termijn steeds beschikbaar blijft voor nieuwe toepassingen, totdat de elementen waaruit het materiaal bestaat als emissie vrijkomen en in het milieu belanden (van Oers, Guinée, & Schulze, 2020b). Figuur 27 geeft de verschillen tussen ADP en EDP schematisch weer.

FIGUUR 27 VISUALISATIE VAN VERSCHILLEN TUSSEN ADP EN EDP



Bron: (van Oers et al., 2012).

#### Betekenis voor het Spodofos-proces

Tot op heden maken LCA-modellen voor schaarste-analyses gebruik van ADP. Als de LCA-community het advies van Van Oers (2012) opvolgt, zullen de berekeningen van modellen veranderen, en daarmee ook de uitkomsten. Resultaten van berekeningen die op de huidige manier worden gemaakt, kunnen kritisch worden bekeken in het licht van de recente ontwikkelingen in de methodologie richting EDP. Het verschil tussen ADP en EDP is relevant in dit onderzoek, omdat het terugwinnen van fosfor met Spodofos-emissies naar het milieu juist voorkomt, en de grondstof (het element P) dus toegankelijk houdt. Tegelijkertijd wordt de aluminium mogelijk volledig ontoegankelijk voor recycling van de aluminium als aluminium.

## 6.6 DISCUSSIE EN CONCLUSIE

### 6.6.1 KLIMAATIMPACT

De klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas met het Spodofos-proces is  $94 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq. als we alleen kijken naar de klimaatimpact van het proces zelf. Het proces produceert witte fosfor en slak, deze producten vermijden de productie van conventionele witte fosfor en grind. Als we de vermeden impact door uitsparing van deze producten meenemen, komt de totale klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas met het Spodofos-proces op  $-1.007 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq. De totale klimaatimpact kan oplopen tot  $-2.328$  kg CO<sub>2</sub>-eq. als we kijken naar de gevoeligheidsanalyses zoals die hieronder beschreven zijn.

Aangezien de Spodofos-technologie nog in ontwikkeling is, hebben we voor de hoeveelheden voor de inputs in het proces een bandbreedte van 10% of 20% aangenomen. Voor de vermeden producten hebben we de meest conservatieve optie gekozen; geen vermeden product voor ferrofosfor en het vermijden van grind voor slak.

Bij deze berekening gaan we ervan uit dat het aluminium die in het Spodofos-proces verbruikt wordt, afkomstig is uit bodemassen. Als in plaats hiervan primair aluminium gebruikt zou worden, komt de totale klimaatimpact uit op  $1.139 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas.

Uit de analyse vanuit het productperspectief blijkt dat de klimaatimpact van de witte fosfor geproduceerd met het Spodofos-proces  $0,77 \pm 0,14$  kg CO<sub>2</sub>-eq./kg is. De klimaatimpact van de slak is  $0,003 \pm 0,0005$  kg CO<sub>2</sub>-eq./kg.

### GEVOELIGHEIDSANALYSES

De klimaatimpact van de verwerking van slibas met het Spodofos-proces kan nog verder verlaagd worden door de producten op andere manieren toe te passen dan is aangenomen in de basisanalyse. Toepassing van ferrofosfor als vervanging van ijzer levert een extra vermeden impact van 192 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas op. Toepassing van slak als vervanging van alumina in de vuurvastindustrie levert een extra vermeden impact op van 1.130 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas en toepassing van slak als vervanging van cement in vormgegeven bouwstoffen levert een extra vermeden klimaatimpact op van 807 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas.

De effecten van een duurzamere elektriciteitsmix op de klimaatimpact van het Spodofos-proces (zonder vermeden impacts) is beperkt, doordat er relatief weinig elektriciteit en juist veel aardgas gebruikt wordt. Bij de huidige elektriciteitsmix geeft elektrificatie een hogere klimaatimpact dan het basisproces dat grotendeels op aardgas draait. Echter, bij elektrificatie van het proces is het effect van een duurzame elektriciteitsmix groter en kan een grotere reductie van de klimaatimpact van het proces zelf bereikt worden.

De klimaatimpact van de verwerking van 1 ton slibas met het Spodofos-proces is afhankelijk van de fosforconcentratie in de slibas. Bij lagere fosforconcentraties wordt er minder fosfor geproduceerd en dus ook minder conventionele fosfor uitgespaard, waardoor de klimaatimpact hoger wordt. Bij hogere fosforconcentraties geldt het omgekeerde.

### 6.6.2 SCHAARSTE-ANALYSE

Schaarste-analyses van minerale grondstoffen met huidige LCA-methodes geven geen eenduidig antwoord op de vraag: 'Weegt het voordeel van het terugwinnen van fosfor met het Spodofos-proces op tegen het nadeel van verbruik van aluminium?' Met de ReCiPe-methode scoort het Spodofos-proces negatief, en is er dus minder uitputting, bij doorrekening met de CML-methode scoort het Spodofos-proces positief, en is er dus extra uitputting. Er zijn recente methodologische ontwikkelingen in de kijk op schaarste, van *Abiotic depletion of elements* (ADP) naar *Environmental dissipation of elements* (EDP), die in de huidige methodes nog niet zijn meegenomen. Dit maakt het nu moeilijk om definitieve conclusies te baseren op de LCA-analyse voor schaarste.

In het licht van de verschuiving van ADP naar EDP in de methodologie voor schaarsteberekeningen, is het goed mogelijk dat het 'probleem' wat betreft schaarste voor aluminium kleiner uit toekomstige analyses komt dan voor fosfor. Aluminium is makkelijk beschikbaar te houden door recycling, in tegenstelling tot fosfor, dat snel diffuus in het milieu belandt. Dit is inherent aan de toepassingen van fosfor, bijvoorbeeld in de landbouw.

Europa is voor zowel aluminium als voor fosfor afhankelijk van import. De EAA schat dat tegen 2050 aan de helft van de Europese aluminiumbehoefte kan worden voldaan met secundair aluminium. Voor de andere helft is Europa afhankelijk van import van grondstoffen voor primaire productie. Deze komen uit verschillende regio's. Voor witte fosfor is Europa afhankelijk van productie in Vietnam en Kazachstan; voor de grondstof, fosforeerts, is het goed mogelijk dat er tegen het einde van de eeuw wereldwijd grotendeels een afhankelijkheid ontstaat van één land (Marokko). De Europese Commissie classificeert fosfaatgesteente en  $P_4$  als één van 27 kritieke grondstoffen. Hiermee legt de EC nadruk op het belang om innovaties te stimuleren die deze stoffen beter recyclebaar maken. Aluminium staat niet op deze lijst.

Aluminium wordt bij het Spodofos-proces verbruikt, in de zin dat het daarna niet meer als materiaal aanwezig is, maar als oxide in de slak. Zoals toegelicht in Paragraaf 6.4.3, is een potentiële toepassing van de slak de vuurvastindustrie, waar het mogelijk alumina kan vervangen. In dat geval is het risico van verschuivingseffecten (van gebruik van secundair naar primair in andere sectoren) ondervangen.

Omdat de LCA-schaarste-analyse geen eenduidig antwoord geeft, en resultaten met toekomstige methodes nog niet bekend zijn, is onze aanbeveling om zo laagwaardig mogelijk aluminium in te zetten in het Spodofos-proces, zodat de verschuivingseffecten (gebruik van primair aluminium elders) zo veel mogelijk worden geminimaliseerd. Laagwaardig kan hier geïnterpreteerd worden als zo moeilijk mogelijk toepasbaar in andere sectoren.

### 6.6.3 RISICO'S EN KANSEN

#### RISICO'S

Gebruik van secundair aluminium, liefst zo laagwaardig mogelijk, is noodzakelijk voor een lage klimaatimpact. We identificeren hierbij twee risico's voor het Spodofos-proces:

1. Wordt gebruik van aluminium in het Spodofos gezien als recycling? Komt het proces dus in aanmerking voor afname van secundaire stromen die 'zo hoogwaardig mogelijk' toegepast dienen te worden (zoals aluminium uit bodemas volgens het LAP)?
2. Welke rekenregels worden op termijn gehanteerd voor toepassing van secundair aluminium? In de staalindustrie wordt voor alle staal gerekend met het gemiddelde percentage gerecycled. Enkel bij additionele toepassing van gerecyclede input kan een voordeel toegerekend worden. Als dit op termijn ook best practice wordt voor aluminium betekent dit dat de carbon footprint voor aluminiumverbruik in het Spodofos-proces flink toeneemt.

#### KANSEN: CIRCULARITEIT

Er is een mogelijkheid dat de slak die geproduceerd wordt in het Spodofos-proces kan worden ingezet in de vuurvastindustrie, waarbij aluminiumoxide wordt uitgespaard. In dat geval zou zowel de kritieke stof  $P_4$  teruggewonnen worden, als de voor terugwinning van  $P_4$  benodigde aluminium als aluminiumoxide toegepast worden in de economie. In dat geval is er zelfs bij toepassing van primair aluminium een klimaatvoordeel. Een zeker klimaatvoordeel én geen discussie over schaarste is dus mogelijk bij toepassing van slak in de vuurvastindustrie, waarbij aluminiumoxide uitgespaard wordt.

# 7

## DISCUSSIE

### 7.1 TECHNOLOGISCHE EVALUATIE

In de voorgaande hoofdstukken is de haalbaarheid van het Spodofos proces vanuit verschillende invalshoeken beoordeeld. De technologische evaluatie laat zien dat het Spodofos principe vanuit thermodynamisch oogpunt plausibel en uitvoerbaar is. Voor verschillende bekende samenstellingen van slibverbrandingsassen uit Nederland en Duitsland is het principe haalbaar en genereert de reactie voldoende warmte om het proces te kunnen laten verlopen. Daarvoor is het wel nodig dat de uitgangsmaterialen worden voorverhit tot een temperatuur van 600 °C om de reactie te kunnen starten.

Wel zullen aanvullende proeven nodig zijn om meer specifieke kwaliteit gerelateerde vragen te kunnen beantwoorden. Zo zal vrijwel alle arseen uit de as in de geproduceerde witte fosfor terecht komen. Het arseengehalte zal dan ook hoger liggen dan de witte fosfor die nu op de markt beschikbaar is. Dit zal een deel van de markt uitsluiten, maar naar verwachting is dit voor een groot deel van de markt geen probleem.

Verder lijkt de reactie te leiden tot een ferrofosfor als bijproduct met een lager gehalte aan fosfor dan nu verkregen wordt bij de conventionele productie van witte fosfor. Enerzijds is dit positief omdat dat betekent dat de omzetting naar fosfor met een hoger rendement plaatsvindt. De potentiële afnemers voor ferrofosfor wensen echter een fosfor gehalte van meer dan 22%. Als met het Spodofos een ijzer met een heel laag fosforgehalte kan worden gekregen zijn misschien wel nieuwe toepassingen haalbaar in de staalindustrie. De sturing van het ferrofosfor is daarom een belangrijke parameter van onderzoek. In theorie zou dit kunnen door keuze van de reactietemperaturen en toevoegen van temperatuurboosters zoals gips. Verder zal ook het koper gehalte in de ferrofosfor aan de hoge kant zijn (1-2% terwijl <0,1% gebruikelijk is). De precieze grenzen voor de afnemers zijn niet duidelijk maar dit zal nader moeten worden onderzocht.

Het Spodofos principe lijkt grotendeels uitvoerbaar met beschikbare apparatuur en kennis, waarbij echter wel de menging van ingrediënten (in de Reaction Mixture Condition unit) en de reactor zelf nieuwe, innovatieve ontwikkelingen zijn die nog moeten worden ontworpen, getest en opgeschaald.

Het Spodofos proces zet de slibverbrandingsas om in een aluminiumrijke slak. Het voordeel van deze omzetting is dat hierdoor eventuele zware metalen volledig worden geïmmobiliseerd en niet zullen uitlogen. In die zin lijkt het proces op processen voor verglazing van slibverbrandingsas die eind vorige eeuw werden ontwikkeld voor immobilisatie van de stoffen in de as. De hoge temperatuur tijdens het Spodofos proces (>1.600 °C) zal alle eventueel met aangevoerde grondstoffen organische stoffen (zelfs PFAS-verbindingen) volledig afbreken.



De doorrekening van de massabalans laat zien dat er ongeveer 0,2 kg aluminium schroot nodig is om 1 kg slibverbrandingsas te behandelen. Het Spodofos proces produceert dan per kg as ongeveer 80 g witte fosfor. Daarnaast ontstaat ca. 1 kg slak en 0,1 kg ferrofosfor.

Vanuit het oogpunt van de massabalans zijn de twee belangrijkste kenmerken van het Spodofos proces: het gebruik van aluminium en de productie van slak. Aluminiumschroot is een relatief hoogwaardige grondstof waarvoor betaald moet worden en bovendien moet het gebruik van een dergelijke hoogwaardige grondstof ook vanuit milieuoogpunt opwegen tegen de productie van witte fosfor. De slakproductie is relatief groot en hoe hoogwaardiger deze slak af gezet kan worden, hoe beter de evaluatie uitpakt voor het Spodofos proces.

Deze massabalans geeft daarmee de belangrijkste achterliggende vraag rondom de haalbaarheid van het Spodofos proces:

*Weegt de waarde van de Spodofos producten (witte fosfor, ferrofosfor en slak) op tegen de inzet van aluminium en energie voor de omzetting?*

Deze vraag dient zowel vanuit economisch oogpunt als milieuoogpunt positief te kunnen worden beantwoord.

## 7.2 ECONOMISCHE AFWEGING

De investering voor een Spodofos installatie (50.000 ton as/jaar) wordt in dit rapport geschat op 15,1 miljoen Euro en het bedrijven ervan op 3,6 miljoen Euro per jaar. Daar komen nog de kosten voor de inkoop van aluminiumschroot bij. De markt voor aluminiumschroot is groot in vergelijking met de aluminiumbehoefte voor een Spodofos installatie en de behoefte van Spodofos zal daarom niet leiden tot een verstoring van die markt. Voor een installatie met een capaciteit van 50.000 ton as per jaar is ongeveer 10.900 ton aluminiumschroot nodig. De meest laagwaardige bron van aluminiumschroot is aluminium gewonnen uit de bodemas van afvalverbrandingsinstallaties. De totale Europese productie van aluminiumschroot uit bodemas was in 2020 110.000 ton met een verwachte groei naar 300.000-500.000 ton. De totale markt voor aluminiumschroot die geschikt is voor het Spodofos proces is 1.100.000-2.100.000 ton. Realisatie van een Spodofos installatie zal daarom wel impact hebben op de markt voor aluminium uit bodemas, maar nauwelijks op de totale markt voor aluminiumschroot.

De inkoopkosten voor dit aluminiumschroot worden ingeschat op 11,1 miljoen €/jaar. Daarmee kan 4.150 ton witte fosfor geproduceerd worden die een marktwaarde heeft van ongeveer 12 miljoen €/jaar. Dit laat zien dat de productie van witte fosfor alleen niet leidt tot een positieve business case en dat aanvullende inkomstenbronnen cruciaal zijn. De productie van 4.150 ton witte fosfor is significant op een Europees marktvolume die geschat wordt op 50-60 kton, maar is tegelijk ook niet zo groot dat zij erg marktverstrend zal zijn.

Een tweede belangrijke inkomstenbron is de afzet van Spodofos slakken. In tegenstelling tot slibverbrandingsas hebben de slakken een positieve waarde en in volume is de slakproductie ongeveer gelijk aan de as toevoer in het proces. Door de versmelting van de as is de slak vanuit milieuoogpunt minder bezwaarlijk en dus makkelijker te gebruiken als bouwstof.

Uitgaande van een poorttarief van 90 €/ton as vertegenwoordigt de as voor Spodofos een inkomstenbron van 4,5 miljoen €. Als de slak (in het slechtste geval) slechts te gebruiken is

als bouwstof vertegenwoordigt de slak een waarde van 0,5 miljoen €/jaar. Door de omzetting van een slibverbrandingsas met een negatieve waarde naar een slak met een positieve waarde ontstaat dus een voordeel van 5,0 miljoen €/jaar.

De combinatie van het hoge aluminium en silicaat gehalte van de slak biedt reële mogelijkheden om het materiaal in te zetten als vuurvast materiaal met een hoge toegevoegde waarde. De markt hiervoor is groot en kan zonder meer het volume van een Spodofos installatie opnemen. Als deze laatste toepassing inderdaad mogelijk is neemt het netto-effect van de omzetting van de as naar slak toe van 5,0 miljoen €/jaar naar 11 miljoen €/jaar. Een dergelijke toepassing heeft dus een enorm effect op de economische haalbaarheid.

Tenslotte biedt ook de afzet van het ferrofosfor een inkomstenbron die ligt tussen 0 en 1,3 miljoen €/jaar waarbij de ondergrens de afzet is als bouwstof en de bovengrens bij afzet naar de staalindustrie. In de voorgaande paragraaf werd besproken dat het fosfor gehalte bepalend is voor de afzetmogelijkheden en dat sturing van het fosforgehalte kan helpen in de afzet waarbij aanbevolen werd op sturing richting maximale fosforproductie en een zo laag mogelijk fosforgehalte in de ferrofosfor.

Alles samengenomen realiseert Spodofos in het beste geval (130 €/ton inkomsten uit de slakken) een netto economisch voordeel van 8,1 miljoen € per jaar (EBITDA) en daarmee is de investering in een Spodofos installatie (ter waarde van 15,1 miljoen €) binnen twee jaar terug te verdienen. De slakken zijn dan af te zetten in vuurvaste toepassingen en de ferrofosfor in de staalindustrie. Als de afzet van deze reststromen tegenvalt en de slakken en ferrofosfor slechts als bouwstoffen zijn in te zetten daalt het voordeel tot 2,0 miljoen €/jaar en duurt het 8 jaar voordat de investering is terugverdiend en is de economische rentabiliteit lager, maar wel acceptabel.

### 7.3 DUURZAAMHEIDSAFWEGING

Een belangrijk duurzaamheidsaspect van het Spodofos proces is de inzet van aluminium. Het proces maakt weliswaar gebruik van aluminiumschroot, ofwel secundair aluminium, maar ook dit materiaal kan worden omgesmolten en opgewerkt tot nieuw aluminium, maar nooit tot primair aluminium vanwege diverse legeringen van andere metalen die allerlei aluminiumschrootsoorten bevatten. De productie van primair aluminium uit erts is een energie-intensief proces en de energie die eigenlijk besloten zit in het aluminium wordt in het Spodofos proces gebruikt om het fosfaat tot fosfor te reduceren. Een positief bijeffect is dan nog wel dat de zware metalen in de as door deze thermische behandeling worden geïmmobiliseerd en eventuele organische microverontreinigingen (bv PFAS) worden afgebroken. Van alle producten uit het proces zal hooguit een bijzonder kleine fractie (stof) niet herbruikbaar zijn.

De levenscyclusanalyse door CE Delft laat zien dat de klimaatimpact van alleen het Spodofos proces zelf (dus het gebruik van energie en hulpstoffen)  $94 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq is/ton as is. In de praktijk wordt gebruikgemaakt van aluminiumschroot en in deze berekening is uitgegaan van secundair aluminium, ofwel schroot, uit bodemassen als hulpstof wordt gebruikt. Omdat dit een restproduct is, is de klimaatimpact hiervan relatief laag. Het Spodofos proces maakt witte fosfor en slakken en deze producten kunnen andere producten met een hogere klimaatimpact vervangen. Als aangenomen wordt dat de witte fosfor import van fosfor van buiten de EU vervangt en de slakken grind vervangen ontstaat een klimaatimpact van  $-1.007 \pm 12$  kg CO<sub>2</sub>-eq per ton as. Daarmee zou Spodofos dus een belangrijk CO<sub>2</sub> voordeel realiseren.

De klimaatimpact kan ook per ton product uitgedrukt worden. De huidige klimaatimpact van witte fosfor die uit Azië wordt geïmporteerd bedraagt 13 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg fosfor terwijl de klimaatimpact van Spodofos fosfor slechts 0,77 ± 0,14 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg bedraagt.

De klimaatimpact verbetert nog verder als hoogwaardigere toepassingen worden aangenomen voor de geproduceerde slakken en ferrofosfor. Als de slak gezien kan worden als vervanger van de inzet van alumina in de vuurvast industrie ontstaat een extra voordeel van -1.130 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas, terwijl een alternatieve inzet in vormgegeven bouwstoffen een extra vermeden klimaatimpact oplevert van -807 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas. Inzet van het ferrofosfor als vervanger van ijzer in de staalindustrie levert ook nog eens -192 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas. In dit scenario komt de klimaatimpact zelfs uit op -2.329 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas.

Het Spodofos proces realiseert dus bij gebruik van secundair aluminium een groot duurzaamheidsvoordeel. Het gebruik van secundair aluminium in het Spodofos proces onttrekt dit aluminium echter uit de markt voor aluminium recycling. Een belangrijk ongewenst effect dat daardoor in theorie zou kunnen ontstaan is dat hierdoor de productie van primair aluminium zou toenemen. Echter in de praktijk zijn niet alle aluminiumschrootsoorten, vanwege de kwaliteit, volledig te benutten voor recycling. En, er is voldoende aluminiumschroot in de EU om in de behoefte te voorzien zonder dat dit een negatieve invloed heeft op de bestaande markt. In de duurzaamheidsanalyse, is bij wijze van hypothese, ook doorgerekend wat het effect zou zijn als Spodofos primair aluminium gebruikt. In dat geval slaat de klimaatimpact in het basisscenario (gebruik van de slak als grind) volledig om van -1007 kg CO<sub>2</sub>-eq per ton as naar +1.139 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas. In het meest positieve scenario (gebruik van slak in de vuurvastindustrie en ferrofosfor in staal) is er wel nog steeds een reductie van de klimaatimpact ter grootte van -138 kg CO<sub>2</sub>-eq per ton as.

Voor het Spodofos proces is het van belang hoe men aankijkt tegen het belang van witte fosfor versus aluminium. Dit soort schaarste afwegingen worden nu niet goed meegenomen in bovenstaande LCA-berekeningen en verschillende methodieken geven verschillende antwoorden voor het Spodofos-proces (zie paragraaf 6.5). Verwachte verschuivingen in de methodologie lijken gunstig uit te pakken voor de productie van fosfor versus die van aluminium. Aluminium is namelijk makkelijk beschikbaar te houden voor recycling terwijl producten die gemaakt worden uit witte fosfor een diffuus gebruik hebben en daarna moeilijker zijn te recyclen. Ook de Europese afhankelijkheid van witte fosfor kan men als kritischer beoordelen dan die voor aluminium. De Europese Unie heeft witte fosfor geclassificeerd als een van de 27 kritieke grondstoffen terwijl aluminium niet op deze lijst staat. Ook voor aluminium is de EU afhankelijk van import, maar de helft van de behoefte kan worden voldaan uit secundair aluminium.

Al met al pakt de duurzaamheidsafweging voor het Spodofos-proces positief uit waarbij het gebruik van aluminium wel een aandachtspunt is en zal blijven. Daarom is het belangrijk om hier bij de verdere ontwikkeling van het proces rekening mee te houden. Dit kan op twee manieren. Enerzijds is het raadzaam om in te zetten op het gebruik van de meest laagwaardige stromen voor secundair aluminium die anders moeilijk te recyclen zouden zijn. Anderzijds kan dit door gericht te werken aan het ontwikkelen van toepassingen voor de aluminiumrijke slak waarbij juist het aluminium gehalte waarde toevoegt voor de toepassing. Een voorbeeld hiervan die in dit onderzoek al ter sprake is gekomen is het gebruik van de slak in vuurvast toepassingen. Als deze toepassing mogelijk is, is er zonder meer een groot duurzaamheidsvoordeel voor het Spodofos-proces.

## 7.4 VERDERE ONTWIKKELING

Het Spodofos proces bevindt zich in een vroeg stadium van de ontwikkeling. Het chemische principe is nu op labschaal aangetoond en is met thermodynamische modelleringen gevalideerd. Daarmee bevindt de ontwikkeling zich op dit moment op een “Technology Readiness Level” (TRL) van 3 op een schaal van 1 tot 9. De technologische en technische evaluatie die in dit onderzoek is uitgevoerd laat zien dat het proces technisch uitvoerbaar zou moeten zijn. Daarnaast is er perspectief op een interessante business case en heeft het proces duurzaamheidsvoordelen.

Daarmee lijkt er dus voldoende reden om het Spodofos proces verder te gaan ontwikkelen. Paragraaf 3.6 geeft een uitgebreide beschouwing op de technische ontwikkelstappen die nodig zijn om de unieke onderdelen (RMC eenheid en reactor) van het Spodofos proces te testen en verder op te schalen. Allereerst is het doel om op een schaal van 0,3-0,5 kg onder laboratorium condities meer ervaring op te doen met het proces zelf en daarmee TRL niveau 4 te bereiken. Daarna volgt een opschaling naar een schaalgrootte van ongeveer 100 kg/h die semi-continu begint en uiteindelijk een continue bedrijfsvoering moet aantonen zodat uiteindelijk TRL niveau 6 wordt bereikt. Zonder rekening te houden met wachttijden voor financiering en bouw van de installaties vergt de proeffase circa 2 jaar. In totaal zal het daarom minimaal 3 jaar duren om van de huidige fase naar TRL 6 te komen.

Na deze fase wordt aanbevolen eerst nog een demonstratie installatie te realiseren (TRL 7) met een capaciteit van ongeveer 1.000 kg/h die minimaal een jaar zal moeten draaien om voldoende informatie te verkrijgen voor een gedegen en betrouwbaar ontwerp voor de eerste commerciële installatie met een capaciteit van 50.000 ton as per jaar (TRL 8-9). ThermusP schat in dat de ontwikkeling vanaf het huidige niveau (TRL3) tot aan de in bedrijfname van de eerste commerciële installatie 6 jaar zal duren. Hierbij is er wel van uitgegaan dat geen tijd verloren gaat rondom verkrijgen van financiering, contractvorming en besluitvorming. Ook loopt de opschaling van de ontwikkeling dan in parallel met het regelen van de locatie en vergunningen voor de volgende fase. De praktijk leert dat de totale ontwikkelduur kan oplopen en niet alleen bepaald wordt door de technische ontwikkeltijd.

Op dit moment staan de huidige slibeindverwerkers op het punt om investeringen te doen of contracten voor lange termijn af te sluiten voor nieuwe technieken voor fosfaatruiswinning uit de as. Deze technieken zijn voornamelijk gebaseerd op een natte, zure ontsluiting van het fosfaat uit de as. Na enkele jaren ontwikkeling zijn deze technieken nu rijp om de stap te nemen naar commerciële productie. Hierdoor kan er een “lock-in” situatie ontstaan als de huidige besluiten en contracten echter voor lange perioden worden afgesloten of te weinig flexibiliteit bieden om andere technieken testen. Hoe groot dit risico is hangt, naast het ontwikkelingsstadium, vooral ook af van de economische en duurzaamheidsaspecten. Het zou interessant zijn de business-case en CO<sub>2</sub>-footprint van de nat-chemische processen te kennen. Een dergelijke benchmark is buiten de scope van dit rapport is gelaten.

# 8

## CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

### 8.1 CONCLUSIES

Het Spodofos proces is een geheel nieuwe manier om witte fosfor te produceren uit slibverbrandingsas. Dit thermische proces is gebaseerd op een thermiet reactie tussen aluminium en de as waarvan het principe op laboratoriumschaal is aangetoond. Dit rapport beschrijft de resultaten van een studie waarin de haalbaarheid van dit proces is geëvalueerd. Daarbij is allereerst de technologische haalbaarheid gevalideerd door thermodynamische modelleringen en een expert beoordeling. Vervolgens is het proces vertaald naar een technisch ontwerp en een investeringsraming voor een full scale installatie met een capaciteit van 50.000 ton. Op basis van deze gegevens is vervolgens een marktanalyse uitgevoerd voor de inkoop van het benodigde aluminium en de verkoop van de Spodofos producten (witte fosfor, slakken, ferrofosfor). Op basis daarvan is de economische haalbaarheid vastgesteld en is een duurzaamheidsanalyse uitgevoerd.

Dit onderzoek leidt tot de volgende conclusies over de haalbaarheid van Spodofos.

1. De technologische analyse laat zien dat de chemische principes van het Spodofos proces plausibel zijn. Deze conclusie is gebaseerd op thermodynamische modelleringen en een expert beoordeling van de resultaten van labproeven. Voor verschillende assamenstellingen kan de reactie voldoende energie opleveren om deze volledig te laten verlopen en de gewenste producten te produceren. Wel zullen aanvullende proeven nodig zijn om meer specifieke kwaliteit gerelateerde vragen te kunnen beantwoorden (bijvoorbeeld fosfor en koper gehalte in de ferrofosfor, arseen in de witte fosfor).
2. Het Spodofos principe is te vertalen is naar een technische installatie met grotendeels bekende techniek. De belangrijkste nieuwe elementen die ontwikkeld moeten worden zijn de RMC (reaction mixture conditioning) unit en de reactor. Hiervoor kan weliswaar aangesloten worden bij bekende principes, maar de uitvoering voor Spodofos is uniek. Met name voor deze installatie onderdelen is ontwikkeling nodig, eerst op laboratoriumschaal en vervolgens op pilot en demonstratieschaal. Als alleen de techniekontwikkeling bepalend is schatten de initiatiefnemers 6 jaar nodig te hebben tot aan de inbedrijfname van een eerste commerciële installatie. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat zaken als vergunningaanvragen parallel lopen aan de techniekontwikkeling en dat er wachttijden zijn voor besluitvorming en financiering van de verschillende ontwikkelstappen. De praktijk leert echter dat de totale ontwikkelduur daardoor kan oplopen en niet alleen bepaald wordt door de technische ontwikkeltijd.
3. Het Spodofos proces maakt gebruik van aluminium als reductor voor de productie van witte fosfor. Het is de bedoeling hiervoor aluminiumschroot te gebruiken, bijvoorbeeld gewonnen uit de bodemas van de huisvuilverbranding. De inkoopkosten voor dit aluminium zijn niet-temin significant en ongeveer in balans met de opbrengsten voor de geproduceerde witte fosfor. De financiële winst voor het Spodofos proces zit hem daarom vooral in de omzetting van slibverbrandingsas met een negatieve waarde in een Spodofos slak met een positieve waarde.

4. Voor elke ton verwerkte as produceert het Spodofos proces ongeveer 1 ton slak. De afzetmogelijkheden van de Spodofos slak bepalen daarom in hoge mate de financiële rentabiliteit van het Spodofosproces. Vanwege het hoge aluminiumgehalte van de slakken wordt verwacht dat de slak toegepast kan worden als grondstof voor vuurvast materiaal. Als dat inderdaad mogelijk blijkt is er sprake van een relatief korte terugverdientijd (investering gedeeld door netto opbrengsten) van 2 jaar en heeft het project een hoge interne rentabiliteit (IRR) van 38%. In het slechtste scenario is de slak bruikbaar als grindvervanger en dan ligt de terugverdientijd op 8 jaar en een IRR van 6%. Toepassing van de as in vormgegeven bouwstoffen leidt tot een scenario die tussen deze uitersten in ligt (5 jaar terugverdientijd, IRR 13%).
5. Voor de rentabiliteit van het proces is steeds uitgegaan van een poorttarief van de slibverbrandingsas van 90 €/ton (excl. BTW). Bij korte terugverdientijden kan er ook voor gekozen worden om dit poorttarief te verlagen. In het meest gunstige scenario is het zelfs mogelijk te betalen voor de as (ca. 45 €/ton) en nog steeds een terugverdientijd van 6 jaar te hebben.
6. Voor de duurzaamheid van het Spodofos proces zijn twee aspecten van belang: de manier waarop de inzet van aluminium wordt afgewogen tegen de productie van witte fosfor en de aannames die worden gedaan over de afzet van de geproduceerde slakken.
7. Een levenscyclusanalyse laat zien dat het Spodofos een gunstige klimaat impact heeft van -1.007 kg CO<sub>2</sub>-eq per ton as omdat secundair aluminium wordt gebruikt.
8. Het kental voor de klimaatimpact houdt geen rekening met aspecten zoals schaarste van grondstoffen. De duurzaamheidsanalyse laat zien dat de huidige beschikbare methodieken die rekening houden met schaarste geen eenduidig antwoord geven op het relatieve belang van productie van fosfor versus aluminium. Wel lijkt het belang van de productie van witte fosfor groter omdat de Europese unie dit als een kritische grondstof beoordeelt en aluminium niet. Bovendien is het eenvoudiger om aluminium in een kringloop te houden dan fosfor her te gebruiken.
9. Ook de afzetmogelijkheden voor de slakken hebben een grote invloed op de duurzaamheidsafweging. Als de slakken bruikbaar blijken voor vuurvast materiaal dan voorkomt deze hoogwaardige toepassing het branden van alumina bij hoge temperatuur en ontstaat een gunstig klimaateffect van -1.130 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas. Als ook de ferrofosfor toegepast kan worden in de staalindustrie ontstaat nog een extra voordeel van -192 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas. In die situatie (toepassing slakken in de vuurvast industrie en ferrofosfor in de staalindustrie) heeft het Spodofos proces een positief effect van -2.328 kg CO<sub>2</sub>-eq./ton slibas.
10. Het Spodofos proces richt zich op grote asvolumes. Voor deze assen zijn momenteel ook plannen om fosfaat via een zure extractie terug te gaan winnen. Deze technieken zijn in een vergevorderd ontwikkelstadium en vermoedelijk worden dergelijke installaties binnen enkele jaren gerealiseerd. Omdat ook deze installaties een bepaalde afschrijving nodig hebben bestaat het risico op een lock-in en dit kan invloed hebben op de ontwikkeling van Spodofos. Hoe groot dit risico is hangt, naast het ontwikkelingsstadium, vooral ook af van de economische en duurzaamheidsaspecten.
11. Het resultaat van de technologische evaluatie, de economische evaluatie en de duurzaamheidsafweging laat zien dat er een reële kans is op een succesvolle ontwikkeling die leidt tot een economisch rendabele en duurzame productie van witte fosfor.

## 8.2 AANBEVELINGEN

De conclusies van dit onderzoek leiden tot de volgende aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling van het Spodofos proces.

1. Voor zowel de economische rentabiliteit als de duurzaamheidsafweging is het van doorslaggevend belang dat de geproduceerde slakken een zo hoogwaardig mogelijke afzet (bijvoorbeeld als vuurvast materiaal) vinden. Daarom moet hier vanaf het begin van de ontwikkeling op in

gezet worden en een centrale plaats hebben in verder onderzoek en opschalingsactiviteiten.

2. Verder is het van belang dat het proces zich zo veel mogelijk richt op het gebruik van secundaire aluminiumbronnen die moeilijker te recyclen zijn.
3. De ontwikkeling van Spodofos zal verlopen via lab, pilot en demonstratieschaal. Het is raadzaam voor elke stap duidelijke ontwikkeldoelen te definiëren en tussentijds de haalbaarheid te opnieuw te evalueren, zoals dat ook in dit rapport is gedaan.
4. Een vergelijking met andere technieken voor terugwinning van fosfaat uit slibverbrandingsas viel buiten de scope van dit onderzoek. Niettemin is het aan te bevelen om aan de hand van de resultaten van dit onderzoek een gedegen vergelijking te maken met dergelijke alternatieve technieken. Beloftevol aan het Spodofos proces is dat het een zeer hoogwaardig product maakt (witte fosfor) en dat vrijwel het hele asvolume omgezet kan worden in nuttige producten.

# 9

## REFERENTIES

1. Phosphorrecycling aus Klärschlammasche in Hamburg, Rohstoffgewinnung von Hamburg Wasser nach dem TetraPhos-Verfahren, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2016 (63) 10, pp886-893, DOI: 10.3242/kae2016.10.003
2. Umweltbundesamt, Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik” 2014, ([https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_49\\_2015\\_monitoring\\_von\\_klaerschlammbrennungsaschen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_49_2015_monitoring_von_klaerschlammbrennungsaschen.pdf))
3. Symposium verglazen van zuiveringsslib (Den Bosch, 10/11 nov. 1992):
  - a. Samenvatting: Uitlooggedrag van residuen van verglazingsprocessen, H.v.d. Sloot, Bodem- en Reststoffenonderzoek, ECN
  - b. Mineralogische eigenschappen en mogelijk nuttige toepassingen van verglaasd slib, C.J.J.H. Schouten (gedeeltelijk beschikbaar)
  - c. Application of vitrification techniques for hazardous waste immobilisation, J. Bijen, Intron / TU Delft
  - d. Vortex melting and crystallization process, Minami, Tsukishima Kikai Co. Ltd
  - e. Melting treatment of Sewage Sludges and residues Employing the KSMF-Process of ML, J. Rizzon, KSMF
  - f. Verglasung von Klaerschlammbrennungsaschen nach dem Corminverfahren, J. Rizzon
4. K.S. Wang, Melting and recycling of MSWI Fly ash by waste-derived thermite reaction, universiteit van Taiwan (2005)
5. ECN, Smelten van biomassa-reststromen en afval tot (duurzame) energie en grondstoffen, docnr 7.5266 (2006)
6. M. van Houten, Expertisecentrum PFAS, Witteveen en Bos (2019)
7. CE Delft, 2017. STREAM Goederenvervoer 2016 : Emissies van modaliteiten in het goederenvervoer. Delft, CE Delft.
8. CE Delft, 2019. Verwerkingsscenario's Vlaams huishoudelijk afval en gelijkaardig bedrijfsafval 2020-2030. Delft: CE Delft.
9. CE Delft, 2020. Emissiekentallen elektriciteit. Delft: CE Delft.
10. CO2emissiefactoren.nl. 2017. *Lijst emissiefactoren* [Online]. Available: <https://co2emissiefactoren.nl/lijs-emissiefactoren/#elektriciteit> [Accessed 17 april 2019].
11. Cooper, Lombardi, Boardman & Carliell-Marquet, 2011. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 78-86.



12. Doradztwo, 2021. Persoonlijke communicatie.
13. EC, 2017. Mededeling van de Commissie aan het Europees Parlement, de Raad, het Europees Economisch en sociaal comité en het Comité van de Regio's over de lijst van 2017 van voor de EU kritieke grondstoffen COM (2017)490 final. Brussels, Europese Commissie.
14. ESPP. 2017. *Scope Newsletter no. 123* [Online]. European Sustainable Phosphorus Platform. Available: <https://phosphorusplatform.eu/scope-in-print/scopenewsletter> [Accessed 2021].
15. ESPP. 2020. *Summary of joint European Commission – ESPP webinar : on P4 (phosphorus) Critical Raw Material, 9th July 2020* [Online]. European Sustainable Phosphorus Platform. Available: <https://phosphorusplatform.eu/images/scope/ScopeNewsletter136.pdf> [Accessed 2021].
16. European Aluminium. 2014. *More aluminium packaging recovered from incinerator bottom ashes than expected!* [Online]. Available: [https://www.european-aluminium.eu/media/1337/fact\\_sheet-alu\\_recovery\\_bottom\\_ashes\\_feb14final-1.pdf](https://www.european-aluminium.eu/media/1337/fact_sheet-alu_recovery_bottom_ashes_feb14final-1.pdf) [Accessed 4 juni 2021].
17. European Aluminium. 2021. *Vision 2050 : European Aluminium's Contribution to the EU Mid-Century Low Carbon Roadmap* [Online]. Brussels: European Aluminium. Available: <https://www.european-aluminium.eu/vision-2050/> [Accessed 2021].
18. Hatayama, Daigo, Matsuno & Adachi, 2012. Evolution of aluminum recycling initiated by the introduction of next-generation vehicles and scrap sorting technology. *Resources, Conservation and Recycling*, 8-14.
19. IAI. 2018. *2015 Life Cycle Inventory Data and Environmental Metrics (2018)* [Online]. London: International Aluminium Institute (IAI). Available: <https://www.world-aluminium.org/publications/tagged/life%20cycle/> [Accessed].
20. IAI, 2021a. *Aluminium Sector Greenhouse gas pathways to2050*. Londen, International Aluminium Institute (IAI).
21. IAI. 2021b. *Global Aluminium Cycle 2019* [Online]. London: International Aluminium Institute (IAI). Available: <https://alucycle.world-aluminium.org/public-access/> [Accessed 2021].
22. Parker Hannifin Corporation, 2013. *Sustainable approach to nitrogen*. Haverhill, Parker Hannifin Corporation.
23. PBL, 2020. *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2020*. Den Haag, Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
24. RVO, 2020. *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren, januari 2020*. Den Haag, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).
25. RWS, 2019. *LAP3. Sectorplan 20; AVI-bodemas*. Den Haag, Ministerie van I&W.
26. Schroder, Cordell, Smit. & Rosemarin, 2010. *Sustainable Use of Phosphorus*. Wageningen, DLO Foundation, Plant Research International.
27. Schulze, Guin  e, van Oers, Alvarenga, Dewulf & Drielsma, 2020a. Abiotic resource use in life cycle impact assessment—Part I- towards a common perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104596.
28. Schulze, Guin  e, van Oers, Alvarenga, Dewulf & Drielsma, 2020b. Abiotic resource use in life cycle impact assessment—Part II – Linking perspectives and modelling concepts. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104595.

29. USGS. 2021a. *Bauxiet and Alumina* [Online]. U.S. Geological Survey (USGS). Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-bauxite-alumina.pdf> [Accessed 2021].
30. USGS. 2021b. *Phosphate Rock (Data in thousand metric tons unless otherwise noted)* [Online]. U.S. Geological Survey (USGS). Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-phosphate.pdf> [Accessed 2021].
31. van Oers, van der Voet & Grundmann 2012. Additives in the Plastics Industry. In: Bilitewski, B., Darbra, R. M. & Barceló, D. (eds.) *Global Risk-Based Management of Chemical Additives I: Production, Usage and Environmental Occurrence*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
32. Wikipedia. 2021. *Soortelijke massa van vloeistoffen* [Online]. Available: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Soortelijke\\_massa\\_van\\_vloeistoffen](https://nl.wikipedia.org/wiki/Soortelijke_massa_van_vloeistoffen) [Accessed].