

# Onderzoek naar het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclageprocessen:

Een economische en ecologische analyse van  
aluminiumrecyclage via warmextrusie en  
vonkplasma'sinteren.

Matthias Floru

Thesis voorgedragen tot het behalen  
van de graad van Master of Science  
in de ingenieurswetenschappen:  
werktuigkunde

**Promotor:**

Prof. dr. ir. Joost Duflou

**Assessoren:**

Prof. dr. ir. Farid Al-Bender

dr. ing. Karel Kellens

**Begeleider:**

dr. ir. Dimos Paraskevas

Academiejaar 2015 - 2016

© Copyright by K.U.Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot de K.U.Leuven, Faculteit Ingenieurswetenschappen - Kasteelpark Arenberg 1, B-3001 Heverlee (België). Telefoon +32-16-32 13 50 & Fax. +32-16-32 19 88.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in dit afstudeerwerk beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

© Copyright by K.U.Leuven

Without written permission of the supervisor(s) and the authors it is forbidden to reproduce or adapt in any form or by any means any part of this publication. Requests for obtaining the right to reproduce or utilize parts of this publication should be addressed to K.U.Leuven, Faculty of Engineering - Kasteelpark Arenberg 1, B-3001 Heverlee (Belgium). Telephone +32-16-32 13 50 & Fax. +32-16-32 19 88.

A written permission of the supervisor(s) is also required to use the methods, products, schematics and programs described in this work for industrial or commercial use, and for submitting this publication in scientific contests.

好好学习天天向上

*Matthias Floru, 3 Mei 2016*

# Inhoudstafel

Inhoudstafel .....	iv
Abstract.....	viii
Lijst van figuren en tabellen .....	ix
Lijst van figuren .....	ix
Lijst van tabellen .....	x
Lijst van afkortingen en symbolen.....	xiii
Hoofdstuk 1: Inleiding.....	1
1.1 Smeltloze recyclage van aluminium.....	1
1.1.1 Waaron aluminium recycleren.....	1
1.1.2 Waaron smeltloos recycleren .....	2
1.2 Relevantie van de onderzoeksvraag .....	3
1.2.1 ASSuRe en het industrieel opschalen van smeltloze recyclage.....	3
1.2.2 Probleemstelling: is smeltloze recyclage valoriseerbaar? .....	4
1.2.3 Omvang van de studie: systeemgrenzen .....	5
1.3 Opbouw van de thesis.....	6
Hoofdstuk 2: Literatuurstudie .....	8
2.1 Overzicht .....	8
2.2 Bespreking.....	11
2.2.1 Extrusie.....	11
2.2.2 Extrusie met hevige plastische vervorming (SPD) .....	16
2.2.3 Hevige plastische vervorming (SPD).....	20
2.2.4 Andere methodes .....	21
2.2.5 Combinaties .....	23
2.2.6 Voorbehandeling .....	25
2.2.7 Potentieel voor industriële toepassing.....	25
2.2.7.2 Ecologisch .....	26
2.9 Conclusie .....	26

Hoofdstuk 3: Potentiele eind-toepassingen: vraag en aanbod.....	29
3.1 De vraag : schatting van de hoeveelheid toepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium .....	29
3.1.1 Evolutie van het aluminiumgebruik in Europa.....	30
3.1.2 Gecombineerd model van de eindtoepassingen van aluminium in Europa.....	31
3.1.3 Toepassingen van aluminium : kunnen smeltloze recyclagetechnieken de benodigde eigenschappen leveren? .....	34
3.1.4 Totale potentiële vraag naar smeltloos gerecycleerd aluminium in Europa.....	34
3.1.5 Potentiële eindtoepassing voor aluminium gerecycleerd door ASSuRe .....	42
3.2 Het aanbod : de beschikbaarheid van verspaningsafval .....	43
3.2.1 Op Europees niveau.....	43
3.2.2 Op Belgisch niveau.....	45
3.3 Conclusie .....	45
Hoofdstuk 4: Het ASSuRe recyclageproces – beschrijving en kost.....	47
4.1 Het ASSuRe recyclageproces : overzicht en massabalans.....	47
4.1.1 Massabalans.....	48
4.1.2 Alternatieve route: vonkplasma'sinteren.....	49
4.2 Inzameling & aankoop verspaningsafval .....	49
4.3 Reiniging.....	50
4.3.1 Grondstoffen.....	51
4.3.2 Energie.....	52
4.3.3 Arbeid.....	53
4.4 Precompactie.....	54
4.4.1 Grondstoffen.....	55
4.4.2 Energie.....	56
4.4.3 Arbeid.....	56
4.5 Vonkplasma'sintering .....	57
4.5.1 Grondstoffen.....	58
4.5.2 Energie.....	58
4.5.3 Arbeid.....	58
4.6 Warmextrusie.....	59
4.7 Transport .....	59
4.8 Conclusie: totale kost ASSuRe proces.....	61
4.8.1 Warmextrusie .....	62
4.8.2 Vonkplasma'sinteren .....	64
Hoofdstuk 5: Ecologische impact .....	65

5.1 Methodologie.....	66
5.2 Definitie van doel & omvang LCA.....	67
5.3 Levenscyclus inventarisatie .....	68
5.3.1 Reiniging.....	68
5.3.2 Precompactie.....	70
5.3.3 Extrusie.....	70
5.3.4 Transport.....	70
5.3.5 Hersmelting .....	71
5.3.6 Inventarisatie van het volledige proces .....	72
5.4 Beoordeling en interpretatie van de levenscyclusimpact.....	72
5.4.1 Eindpunt niveau.....	72
5.4.2 Midpunt niveau .....	74
5.5 Sensitiviteitsanalyse: de impact van gewijzigde processen.....	76
5.5.1 Smeltverliezen.....	76
5.5.2 Reiniging .....	77
5.5.3 Precompactie.....	80
5.5.4 Reflectie op de impact .....	80
5.6 Macro-impact op Europees niveau.....	82
5.7 Conclusie .....	83
Hoofdstuk 6: aanbevolen kost-effectieve procesverbeteringen.....	84
6.1 Efficiëntieverbeteringen huidige processen.....	84
6.1.1 Transport en logistiek .....	84
6.1.2 Reiniging.....	86
6.1.3 Precompactie.....	88
6.1.4 Vonkplasmasinteren .....	89
6.1.5 Evaluatie van de efficiëntieverbeteringen .....	90
6.2 Alternatieven voor de huidige processen.....	91
6.2.1 Transport en logistiek .....	92
6.2.2 Reiniging .....	92
6.2.3 Precompactie.....	99
6.2.4 Extrusie.....	100
6.3 Conclusie en keuze van het beste proces.....	102
Hoofdstuk 7: businessmodellen die smeltloze recyclage een succes kunnen maken .....	105
7.1 Het huidige businessmodel.....	105
7.1.1 Beschrijving van het huidige businessmodel.....	105

7.1.2 Problemen voor smeltloze recyclage met het huidige businessmodel .....	106
7.2 Een voorgesteld businessmodel voor smeltloze recyclage .....	107
7.2.1 Beschrijving .....	107
7.2.2 Opbrengsten .....	108
7.2.3 Uitdagingen .....	109
7.3 Toetsing van het voorgestelde model bij de ASSuRe partners .....	111
7.3.1 Case study Vasco .....	111
7.3.2 Case study Wuyts .....	112
7.4 Conclusie .....	114
Hoofdstuk 8: Conclusie .....	116
Appendices .....	120
Appendix A: Vergelijking eigenschappen en toepassingen .....	121
Appendix B: prijs verspaningsafval .....	136
Appendix C: test reinigingsmiddel .....	139
Appendix D: substitutie met allocatie van kwaliteitsdegradatie .....	141
Deel 1: methode om kwaliteitsverliezen in rekening te brengen .....	142
Deel 2: Schatting voor Q en toepassing op ASSuRe .....	143
Appendix E: tabellen levenscyclus inventarisatie .....	146
Reiniging .....	146
Precompactie .....	147
Extrusie .....	147
Transport .....	147
Hersmelting .....	148
Volledige smeltloze proces .....	150
Appendix F: De reinheid testen .....	151
<b>Bibliografie</b> .....	153
Master's Thesis file .....	169

# Abstract

Deze thesis bestudeert het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclage van aluminium verspaningsafval via warmextrusie en vonkplasmasinteren door het antwoord te zoeken op de vragen naar marktvrage en aanbod, kost-competitiviteit, ecologische impact en nood aan businessmodelinnovatie. Smeltloos gerecycleerd aluminium is het meest waarschijnlijk toepasbaar in de bouwsector en niet veiligheidskritieke toepassingen in de transportsector. De totale maximale vraag naar smeltloos gerecycleerd aluminium in Europa bedraagt 3 miljoen ton per jaar, veel hoger dan het aanbod van 330kton geschikt verspaningsafval. De ecologische impact van smeltloze recyclage via warmextrusie is 2 tot 4 keer lager dan de impact van recyclage via hersmelten. Om dit te bereiken moet echter het reinigingsproces veel efficiënter dan in de experimentele testopstelling. Europa kan een totale jaarlijkse impact van 75 miljoen ecopunten en 1 miljoen ton CO<sub>2</sub> equivalenten vermijden bij volledige valorisatie van smeltloze recyclage. Met een geschatte operationele kost van 0,30€/kg is smeltloze recyclage tot biljet goedkoper dan recyclage via hersmelten, rekening houdend met de vermeden smeltverliezen. Om deze kost te bereiken moet het proces in een volautomatische productielijn plaatsvinden. Partners zijn voorgesteld om deze productielijn te ontwikkelen. Een circulair businessmodel kan het risico bij opstart en opschalen van smeltloze recyclage beperken en de winst voor de betrokken partners maximaliseren.

This master thesis assesses the valorization potential of solid state recycling of aluminium machining scrap by means of hot extrusion and spark plasma sintering by answering the questions of supply and demand, cost competitiveness, environmental impact and the need for business model innovation. Solid state recycled aluminium can most likely find application in the construction sector and non critical applications in the transport sector. The total maximal demand for solid state recycled aluminium in Europe is 3 million ton per year, exceeding the maximal supply of 330kton suitable machining scrap. The environmental impact of solid state recycling by means of hot extrusion is 2 to 4 times lower compared to the impact of recycling by means of remelting. However, to achieve this impact reduction, the cleaning process of the experimental setup has to be improved significantly. Europe can avoid a total yearly impact of 75 million ecopoints and 1 million ton CO<sub>2</sub> equivalents after complete valorization of solid state recycling. With an estimated operational cost of 0,30€/kg is solid state recycling competitive with recycling by remelting, taking into account the avoided melting losses. To achieve this cost, the process has to be integrated in an automated production line. Partners are proposed to develop that production line. A circular business model can reduce the start-up risk of solid state recycling and maximize the profit for the involved partners.



# Lijst van figuren en tabellen

## Lijst van figuren

Figuur 1: het aantal significante smeltloze recyclagepapers gepubliceerd per jaar .....	8
Figuur 2: Beschrijving van het schroefextrusieproces (Wideroe, 2012).....	16
Figuur 3: De ECAP-extrusiematrijs (Haaset et al., 2015).....	17
Figuur 4: De opstelling van wrijvingsroerextrusie (Tang en Reynolds, 2010) .....	18
Figuur 5: Schema van een cyclische extrusie compressie cyclus (Peng et al., 2009).....	19
Figuur 6: Schema van een BMA cyclus (Luangvaranunt, 2002) .....	24
Figuur 7: Evolutie van de Europese aluminiumproductie tussen 2004 en 2013.....	30
Figuur 8: Samenstelling Europees verspaningsafval .....	44
Figuur 9: schema van het ASSuRe recyclageproces voor 1 ton extrusieprofiel.....	48
Figuur 10: weergave van het ASSuRe recyclageproces voor 1 ton near-net-shape product.....	49
Figuur 11: Vulmassa per persstap .....	55
Figuur 12: Operationele kost en marges ASSuRe recyclage (a) schrootverwerker (b) schroothandelaar .....	64
Figuur 13: Vergelijking ecologische impact op eindpuntniveau .....	73
Figuur 14: impact van de deelprocessen bij de experimentele smeltloze recyclage .....	73
Figuur 15: Vergelijking van de broeikasgasuitstoot.....	76
Figuur 16: Sensitiviteit van het verschil tussen de impact van hersmelten en smeltloze recyclage op de smeltverliezen.....	77
Figuur 17: Sensitiviteit van de eco-impact op het hergebruik van het reinigingswater .....	79

Figuur 18: Eco-impact van de reiniging onder verschillende scenario's.....	80
Figuur 19: Totale eco-impact onder verschillende scenario's .....	81
Figuur 20: Sensitiviteit van het verschil tussen de impact van hersmelten en smeltloze recyclage op de smeltverliezen.....	82
Figuur 21: Operationele kost en marges schroothandelaar .....	85
Figuur 22: Energie- en grondstofkost reiniging als functie van (a) de concentratie reinigingsmiddel (b) het hergebruik van het reinigingswater .....	86
Figuur 23: Scenario's voor de energie- en grondstofkost reiniging.....	87
Figuur 24: scenario's voor de arbeidskost tijdens de reiniging.....	88
Figuur 25: scenario's voor de precompactiekost.....	89
Figuur 26: Scenario's voor de kost van vonkplasma'sinteren.....	90
Figuur 27: operationele kost en marges schrootverwerker mid- en basisscenario .....	91
Figuur 28: De 4 stappen van het briketteerproces (National Conveyors Company, 2015).....	99
Figuur 29: Conform™ ronddraaiende schijf met extrusiematrijs (Katsas et al. , 2010).....	101
Figuur 30: Het businessmodel bij recyclage via hersmelten .....	106
Figuur 31: (a) circulair businessmodel en (b) semi-circulair businessmodel.....	108
Figuur 32: Vergroten van de marge via smeltloze recyclage en het voorgestelde businessmodel .....	109
Figuur 33: risicobeperkend circulair businessmodel met tollingsovereenkomst .....	110
Figuur 34 : De benodigde eigenschappen voor aluminiumtoepassingen in vliegtuigen (Starke, Staley 1996) .....	129
Figuur 35: Evolutie prijsratio verspaningsafval.....	137
Figuur 36: schematische voorstelling van de nieuwe substitutiemethode .....	142

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht van alle behandelde smeltloze recyclageprocessen.....	10
--	----

Tabel 2: Gecombineerd model van de eindtoepassingen van aluminium in Europa.....	33
Tabel 3: Potentiele eindtoepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium.....	37
Tabel 4: Producenten van binnentoepassingen in de bouwsector.....	42
Tabel 5: Grondstofkost reiniging.....	52
Tabel 6: Energiekost reiniging.....	53
Tabel 7: Arbeidskost reiniging.....	54
Tabel 8: Procesparameters experimentele precompactie tot billets.....	55
Tabel 9: Energiekost precompactie.....	56
Tabel 10: Arbeidskost precompactie.....	57
Tabel 11: Energiekost vonkplasmasinteren (SPS).....	58
Tabel 12: Arbeidskost vonkplasmasinteren.....	59
Tabel 13: Afstanden en tijden tussen de verschillende bedrijven betrokken bij ASSuRe.....	60
Tabel 14: De totale operationele kost van de experimentele recyclage tot billet.....	62
Tabel 15: Marges voor de bedrijven betrokken bij recyclage.....	63
Tabel 16: Oppervlakte/ massa ratio van spanen met verschillende dimensies.....	69
Tabel 17: inventarisatie van het ASSuRe reinigingsproces.....	69
Tabel 18: vergelijking impact op midpunt niveau: SRL= smeltloze recyclage op basis van literatuur, SRE= experimentele smeltloze recyclage, RH= recyclage via hersmelten.....	74
Tabel 19: Hoeveelheid water, energie en reinigingsmiddel bij hergebruik reinigingswater.....	78
Tabel 20: De kost van centrifugeren.....	95
Tabel 21: De kost van thermische reiniging.....	96
Tabel 22: Vergelijking van de alternatieve reinigingsprocessen.....	104
Tabel 23: karakteristieke hoeveelheid legeringselementen per legeringsfamilie.....	144
Tabel 24: vraag naar aluminium en aanbod gerecycleerd aluminium per categorie.....	144
Tabel 25: Vraag naar aluminium per legeringsfamilie voor de 4 categorieën.....	144
Tabel 26: Gemiddelde hoeveelheid legeringselementen in aluminium per categorie.....	145
Tabel 27: Richtwaarden voor de ingrediënten van het reinigingsmiddel.....	146
Tabel 28: Inventarisatie van het reinigingsmiddel.....	146
Tabel 29: Inventarisatie van de precompactie.....	147

Tabel 30: Inventarisatie van het extrusieproces.....	147
Tabel 31: Inventarisatie van het transport .....	148
Tabel 32: overkoepelende inventarisatie van het hersmeltproces.....	148
Tabel 33: inventarisatie hersmelten met substitutie en transport.....	148
Tabel 34: inventarisatie primair aluminium voor substitutie.....	149
Tabel 35: inventarisatie hersmeltproces .....	150
Tabel 36: inventarisatie smeltloze recyclageproces .....	150

# Lijst van afkortingen en symbolen

ASSuRe Aluminium Solid State Recycling

BMA Bulkmechanisch legeren

CKW Gechloreerde koolwaterstoffen

EAA European Aluminium Association

ECAP Equal Channel Angular Pressing

FSE Wrijvingsroerextrusie

IAA International Aluminium Association

iECAP Geïntegreerde ECAP

HPT Hoge druk Torsie

KW Koolwaterstoffen

LCA Levenscyclusanalyse

LME London Metal Exchange

SPD Hevige plastische vervorming

SPS Vonkplasma'sinteren

# Hoofdstuk 1: Inleiding

Dit hoofdstuk wil de lezer de nodige informatie aanreiken om de onderzoeksdoelstellingen van deze master thesis te begrijpen. Eerst wordt het belang van aluminiumrecyclage en de nood aan smeltloze recyclagetechnieken aangetoond. Waarom de onderzoeksvraag naar het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclagetechnieken relevant is voor het onderzoeksdomein komt in het middenstuk van deze inleiding. De wisselwerking tussen het Aluminium Solid State Recycling (ASSuRe) project en deze thesis komt daar ook aan bod. Tot slot volgt een overzicht van de opbouw van het onderzoek en de tekst van deze thesis om tot een antwoord te komen op de onderzoeksvraag.

## 1.1 Smeltloze recyclage van aluminium

### 1.1.1 Waarom aluminium recycleren

Aluminium is een wijdverspreid metaal omwille van zijn eigenschappen, waarvan de hoge specifieke sterkte de meest belangrijke is. Het jaarlijks gebruik van aluminium per persoon in Europa steeg van 19,2 tot 25,2-27,2kg tussen 1997 en 2008 (EAA, 2010). Recyclage van aluminium is niet opportuun om de uitputting van grondstoffen tegen te gaan. Aluminium is het derde meestvoorkomende element op aarde (Van de Voorde, 2015). Wel is de productie van aluminium, via het Bayer proces om alumina uit bauxiet te isoleren en vervolgens via het Hall-Héroult proces om aluminium uit alumina te maken, zeer energie-intensief. De energieconsumptie voor de productie van 1kg primair aluminium in Europa bedraagt gemiddeld 156MJ (EAA, 2013). De energieconsumptie voor de productie van 1kg secundair aluminium via recyclage daarentegen bedraagt gemiddeld slechts 8,5MJ (EAA, 2013). Dat betekent een reductie van de nodige energie met 95%.

De schaal van aluminiumproductie gecombineerd met deze hoge nodige energie zorgt ervoor dat aluminiumproductie een belangrijke bron van broeikasgassen is. Allwood et al. stellen dat 3% van de industrie-gerelateerde broeikasgasemissies afkomstig zijn van aluminiumproductie (2012). Van de Voorde berekende dat 1,6% van alle broeikasgasemissies wereldwijd in 2012 afkomstig waren van aluminiumproductie (2015). Aluminiumrecyclage kan dus helpen om de doelstellingen die Europa zich

gesteld heeft na de klimaatconferentie van Parijs in 2015 te behalen. Daarnaast is aluminiumrecyclage ook van strategisch belang. Het produceren van primair aluminium in Europa is, omwille van de strikte emissievoorschriften, weinig competitief met wereldwijde productie van primair aluminium (EAA, 2010). Europa importeert steeds meer aluminium. Recyclage van aluminium in Europa verzekert een strategische eigen productie van secundair aluminium dat de import van primair aluminium beperkt.

### 1.1.2 Waarom smeltloos recycleren

Niet alle fracties zijn éénvoudig te recycleren. Een fractie die problemen oplevert bij hersmelten is verspaningsafval. Spanen, een volumineuze afvalfractie bij het omvormen van aluminium halfabrikaten tot eindproducten met verspanende processen zoals draaien, frezen of boren, hebben een zeer grote oppervlakte/volumeverhouding. Om deze reden komen ze tijdens het recycleren bovendien in de smelt en oxideert een groot deel van het materiaal. Waar de smeltverliezen bij het hersmelten van een gemiddelde aluminium afvalstroom slechts 4% bedragen (EAA, 2013), kunnen die bij verspaningsafval oplopen tot 20% en meer (Duflou, 2015). Deze smeltverliezen zijn een groot probleem, aangezien ze in tegenstelling tot het meeste aluminium afval tijdens productie niet een fractie zijn die gerecycleerd kan worden, maar een werkelijk verlies van aluminium zijn. Een nieuwe techniek, die spanen kan recyclen zonder de smeltverliezen, is gewenst. Wetende dat verspaningsafval 18% van al het nieuw afval bedraagt (Boin, Bertram, 2005) en dat in 2013 2,82 miljoen ton nieuw aluminium afval werd geproduceerd in Europa (Bertram, 2014), kan hiermee tot 81000ton aluminium per jaar bespaard worden. Met een aluminiumprijs die in maart 2016 ongeveer 1380 euro per ton bedraagt op de London Metal Exchange (LME), betekent dit een opportuniteit van 112 miljoen euro voor de Europese economie.

Onder de noemer 'smeltloze recyclagetechnieken' zijn reeds zeer uiteenlopende technieken voorgesteld die de smeltverliezen vermijden doordat de smeltstap geëlimineerd wordt uit het recyclageproces. Reeds in 1945 nam Stern een patent op een methode om spanen rechtstreeks te recyclen via extrusie (Stern, 1945). Vooral de laatste jaren zijn deze technieken sterk onderzocht door onderzoeksgroepen over de hele wereld. Het is technisch mogelijk om deze opportuniteit voor de Europese economie te grijpen.

Een tweede probleem met de huidige recyclage van aluminium zijn de kwaliteitsverliezen tijdens hersmelten. Als gevolg van het slecht scheiden van afvalstromen voor de smelt en het thermodynamisch moeilijk verwijderen van legeringselementen wordt aluminium meestal gerecycleerd naar legeringen met een hoger gehalte aan legeringselementen (Paraskevas, 2013). Het meeste gerecycleerde aluminium wordt vandaag gebruikt in gietlegeringen met een hoog gehalte aan legeringselementen, geschikt voor motorblokken van auto's. De opkomst van elektrische voertuigen zal die vraag naar motorblokken echter sterk verminderen.

Hatayama et al. schatten dat er daardoor tegen 2030 wereldwijd 6,1 Mton onrecycleerbaar aluminium afval is (2012). Modaresi en Müller schatten dat vanaf 2018, met een fouteninterval van vijf jaar, er een surplus aan onrecycleerbaar aluminium komt (2012). Tegen 2050 zal dit leiden tot een verlies van wereldwijd 43-240 TWh elektriciteitsbesparing per jaar, omdat het potentieel van aluminium afval om de gemiddelde energiekost om aluminium te maken omlaag te halen niet ten volle benut wordt. Er is dus dringend nood aan betere scheiding van aluminium afval en methodes om deze kwaliteitsverliezen tegen te gaan.

Smeltloze recyclage dwingt bedrijven om deze cascade recyclage tegen te gaan. Het is immers niet mogelijk om, zoals in een smelt, verschillende legeringen en extra legeringselementen of zuiver aluminium samen te voegen. De afvalstroom moet gescheiden gehouden worden om na smeltloze recyclage weer tot dezelfde legering te komen. Bijgevolg biedt smeltloze recyclage niet alleen het voordeel van het vermijden van smeltverliezen, maar ook van het vermijden van kwaliteitsverliezen.

## 1.2 Relevantie van de onderzoeksvraag

Tot op heden is bij de auteur nog geen onderzoek bekend dat het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclageprocessen voor aluminium op een holistische manier behandelt. Samuel bespreekt het economisch potentieel van smeltloze recyclagetechnieken voor aluminium (2002). Deze cijfers zijn echter weinig gedetailleerd en hebben nood aan een recentere update, rekening houdend met de procesontwikkelingen in smeltloze recyclagetechnieken. Duflou et al. bespreken het ecologische potentieel van smeltloze recyclagetechnieken, maar besteden weinig aandacht aan de economische kant van de zaak (2015). Deze master thesis onderzoekt het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclagetechnieken voor aluminium, zowel op microniveau – creëert smeltloze recyclage een economische en eventueel ecologische opportuniteit voor het bedrijf of systeem van bedrijven dat dit gaat toepassen – als op macroniveau – creëert smeltloze recyclage een voldoende verschil, in de eerste plaats ecologisch, daarnaast ook economisch, voor Europa? en op een zo holistisch mogelijke manier. Daarbij sluit de master thesis aan bij het Aluminium Solid State Recycling (ASSuRe) project. Dit project wil in eerste plaats onderzoeken of het überhaupt technologisch mogelijk is om smeltloos recycleren op te schalen van laboschaal naar industriële schaal en in tweede plaats of het economisch en ecologisch wenselijk is om dit te doen. Deze sectie geeft eerst een inleiding tot het ASSuRe project. Vervolgens bespreekt het de onderzoeksvraag in meer detail en tenslotte bakent het de grenzen van de studie af.

### 1.2.1 ASSuRe en het industrieel opschalen van smeltloze recyclage

Het ASSuRe project is een project financieel gesteund door het Milieu- en energietechnologie Innovatie Platform (MIP). Het bestaat uit een consortium van onderzoekspartners (KU Leuven, Sirris), een middenveldorganisatie (Aluminium



Center België) en bedrijfspartners (E-Max, Vasco, Wuyts). De bedrijfspartners omvatten zowel de activiteiten van het produceren van verspaningsafval, het hersmelten en extruderen van aluminium afval en het aankopen van (gerecycleerd) aluminium als grondstof. De projectleider is Carlos Kampen, R&D manager van E-Max. De onderzoeksleider is professor Duflou, hoofd van de subdivisie Ontwerpmethodologie en Levenscyclusengineering binnen het departement werktuigkunde van de KU Leuven en tevens promotor van deze master thesis.

Het ASSuRe project heeft als doelstelling het grondig en experimenteel onderzoeken van de fundamentele onderzoeksvragen en uitdagingen verbonden aan het smeltloos recycleren van industriële aluminium afvalstromen (ASSuRe, 2014). Meerbepaald focust ASSuRe op een grondige experimentele analyse van twee smeltloze recyclagetechnieken : warmextrusie en vonkplasma-sinteren. Dit met industriële afvalstromen en op een industriële schaal. De werkelijke industriële implementatie van de processen komt pas in een vervolgproject indien ASSuRe de technologische en economische haalbaarheid van smeltloze recyclage bewijst. Met de onderzoeksvraag naar het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclagetechnieken voor aluminium past deze master thesis past binnen dit ASSuRe project.

### 1.2.2 Probleemstelling: is smeltloze recyclage valoriseerbaar?

De vraag naar de valoriseerbaarheid van smeltloze recyclagetechnieken valt uiteen in vier subvragen.

- 1) Kunnen we een markt vinden en kwantificeren van toepassingen die kunnen gebruik maken van smeltloos gerecycleerd aluminium?

De eigenschappen van smeltloos gerecycleerd aluminium zijn licht verschillend van de eigenschappen van primair aluminium of aluminium gerecycleerd via hersmelten. De eerste vraag die men zich dus moet stellen is of er wel effectief toepassingen voor aluminium zijn die kunnen gebruik maken van smeltloos gerecycleerd aluminium. Indien er geen markt is voor dit materiaal is het immers niet valoriseerbaar.

- 2) Biedt smeltloze recyclage op industriële schaal inderdaad de verwachte ecologische voordelen tegenover recyclage via hersmelten?

De voornaamste drijfveer voor het huidige onderzoek naar smeltloze recyclagetechnieken is de verhoopte lagere ecologische impact. De vraag of de ecologische impact inderdaad lager is dan de impact bij hersmelten, ook op industriële schaal, raakt aan de bestaansredenen van smeltloze recyclagetechnieken en moet dus gekend zijn alvorens deze technieken te valoriseren.

- 3) Kan de kost van smeltloze recyclage competitief worden ten opzichte van recyclage via hersmelten?

Nieuwe technologieën zijn meestal nog niet kost-competitief met bestaande en geoptimaliseerde processen. De vraag is dus niet of smeltloze recyclageprocessen

vandaag al competitief zijn met hersmeltprocessen, wel of ze in de nabije toekomst het potentieel hebben om competitief te worden. Indien niet, zullen bedrijven smeltloze recyclagetechnieken nooit willen valoriseren.

- 4) Bestaan er business modellen die het toepassen van smeltloze recyclage tot een win-winsituatie maken voor alle betrokken partners?

Indien er een markt voor smeltloze recyclagetechnieken is, ze ecologisch gewenst zijn en kost-competitief zijn, kan er gezocht naar de beste manier om er voor de deelnemende bedrijven een economisch win-winverhaal van te maken. Een businessmodel dat verder gaat dan de bedrijfsgrens en het systeem van bedrijven dat deelneemt optimaliseert moet zich aandienen.

Indien al deze vragen positief zijn, kunnen we stellen dat er een valorisatiepotentieel is voor smeltloze recyclage. De verwachte uitkomst is dat een aantal deelproblemen met de huidige stand van kennis nog niet positief zijn. Deze thesis wil de deelproblemen localiseren die moeten onderzocht worden om smeltloze recyclage te valoriseren en op die manier richting geven aan het huidige onderzoek naar smeltloze recyclage.

### 1.2.3 Omvang van de studie: systeemgrenzen

De omvang van deze thesis is afgebakend in de volgende domeinen: materiaal, afvalsoort, processen en geografie.

#### Materiaal

Deze thesis behandelt aluminium en haar legeringen, met uitzonderingen van de gietlegeringen. Gietlegeringen moeten gesmolten worden om er gietstukken mee te maken en hebben bijgevolg weinig potentieel voor smeltloze recyclage. De literatuurstudie is het enige deel van de thesis dat naast aluminium ook magnesium en titanium behandelt, omdat de resultaten van onderzoek naar deze twee materialen ook nuttig kunnen zijn om bij te leren over smeltloze recyclage van aluminium.

#### Afvalsoort

De thesis focust op verspaningsafval, omwille van de grote smeltverliezen bij deze afvalfractie. Verspaningsafval kan bestaan uit spanen van het draaien, frezen, boren en andere verspaningsprocessen. Bijgevolg gaat het enkel om nieuw aluminium afval, rechtstreeks uit productiebedrijven, en niet over einde-levensafval na consumptie.

#### Proces

De literatuurstudie behandelt zoveel mogelijk verschillende smeltloze recyclageprocessen. Voor het onderzoek naar het valorisatiepotentieel focust deze thesis echter vooral op warmextrusie. Dit proces is het meest gekende proces omdat hier al het meeste onderzoek naar gedaan is. Daarnaast heeft het zich reeds bewezen op laboschaal als een manier om verspaningsafval perfect te consolideren. Naast

warmextrusie behandelt deze thesis ook het vonkplasma-sinteren. Deze methode is, voor het recyclen van verspaningsafval, ontwikkeld aan de KU Leuven en leidt ook tot perfect geconsolideerd aluminium. Het ASSuRe project doet testen met zowel warmextrusie als vonkplasma-sinteren op industriële schaal.

## Geografie

Geografisch gezien bestrijkt deze thesis Europa, met een focus op België. Enkel naar België kijken zou het valorisatiepotentieel onderschatten en is weinig relevant in een wereld waarin productie en gebruik van grondstoffen en producten op een globale wijze gebeuren. Europa is binnen deze geglobaliseerde context het grootst mogelijke geografische gebied waar recyclage van aluminium op een zeer vergelijkbare manier met België gebeurt. De bijkomende focus op België is er vooral om praktische redenen. Het ASSuRe project is immers een Belgisch project. De grootste kans dat de aanbevelingen uit deze thesis om smeltloze recyclage te valoriseren worden uitgevoerd is wanneer deze aanbevelingen relevant zijn voor de ASSuRe projectpartners en bijgevolg betrekking hebben op een Belgische context.

## 1.3 Opbouw van de thesis

De opbouw van deze master thesis probeert te helpen in het bieden van een antwoord op de onderzoeksvragen door de verschillende deelvragen in een opbouwende volgorde te behandelen.

Voor de eerste vraag, naar de mogelijke markt voor smeltloos gerecycleerd aluminium, is het van belang om goed te begrijpen welke eigenschappen bekomen kunnen worden met smeltloos gerecycleerd aluminium. Om te weten hoe dit moet gebeuren is het ook van belang kennis van de huidige mogelijke processen te hebben. Daarom begint deze thesis in Hoofdstuk 2 met een literatuurstudie over deze processen en bekomen eigenschappen.

Hoofdstuk 3 zoekt naar die markt voor smeltloos gerecycleerd aluminium door eerst alle eindtoepassingen voor aluminium in Europa systematisch te catalogiseren en kwantificeren en vervolgens de link te maken tussen de eigenschappen gevraagd door deze eindtoepassingen en de eigenschappen die smeltloos gerecycleerd aluminium kan bieden, gebaseerd op de literatuurstudie uit Hoofdstuk 2. Daarnaast bekijkt Hoofdstuk 3 ook wat het aanbod aan smeltloos gerecycleerd aluminium kan zijn door de jaarlijkse hoeveelheid geproduceerd verspaningsafval in Europa in te schatten.

Hoofdstuk 4 vormt de basis voor het onderzoek naar de economische en ecologische kost van smeltloze recyclage op industriële schaal door middel van een beschrijving de testen van smeltloze recyclage op industriële schaal tijdens het ASSuRe project. Deze beschrijving bevat een massabalans, alle gebruikte materialen en processen en een schatting van de gemaakte kosten.

Hoofdstuk 5 gaat dieper in op de ecologische kost door middel van een levenscyclusanalyse (LCA). Deze studie vergelijkt de impact van recycleren via hersmelten met de impact van smeltloos recycleren. Dit smeltloos recycleren zowel met theoretische parameters uit de literatuur als de experimentele parameters uit het ASSuRe project. Vervolgens bespreekt dit hoofdstuk de sensitiviteit van het veranderen van procesparameters op de ecologische impact van smeltloze recyclage.

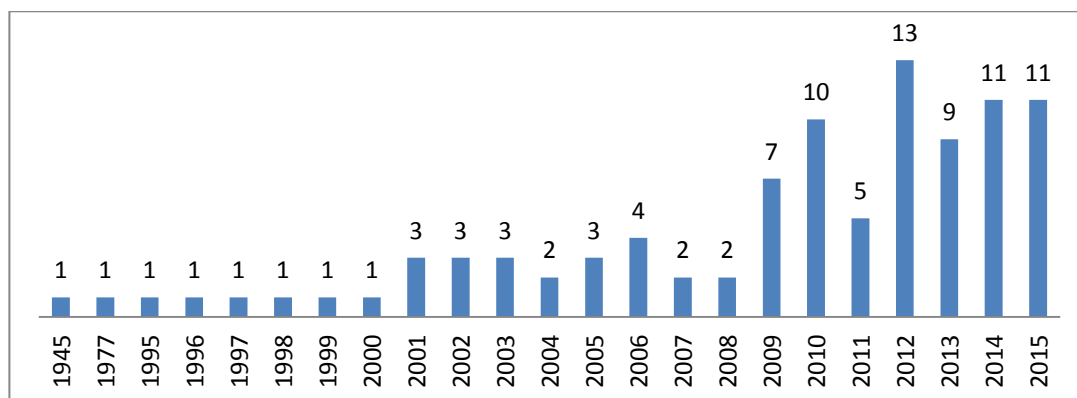
Uit Hoofdstuk 4 en 5 zal blijken dat smeltloze recyclage, zoals experimenteel uitgevoerd op industriële schaal tijdens het ASSuRe project, economisch gezien nog niet rendabel is en ecologisch gezien nog niet dezelfde lage impact heeft als smeltloze recyclage theoretisch kan hebben. Hoofdstuk 6 bespreekt de nodige procesverbeteringen om smeltloze recyclage een competitief alternatief voor recyclage via hersmelten te maken.

Hoofdstuk 7 bespreekt hoe geschikte business modellen de waardecreatie van smeltloze recyclagetechnieken kunnen vergroten en zo het valorisatiepotentieel zo goed mogelijk benutten. Het doel van hoofdstuk 7 is om een manier te vinden die smeltloze recyclage tot een win-winsituatie kan maken voor elke betrokken partner in het systeem.

Hoofdstuk 8 tenslotte concludeert of smeltloze recyclage van aluminium al dan niet valoriseerbaar is aan de hand van de resultaten en antwoorden op de deelvragen uit alle vorige hoofdstukken. Verder lijst hoofdstuk 8 de hordes op die moeten overwonnen worden om smeltloos gerecycleerd aluminium te valoriseren. Zo probeert deze thesis richting te geven aan het verdere onderzoek naar smeltloze recyclagetechnieken, zodat het potentieel van deze technieken gerealiseerd kan worden.

## Hoofdstuk 2: Literatuurstudie

Een eerste stap in het bepalen van het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclagetechnieken is het begrijpen van de technieken zelf. Meerbepaald zijn drie aspecten van belang : de metalen en legeringen die gerecycleerd kunnen worden, de gebruikte processen en hun parameters en de resulterende eigenschappen van de gerecycleerde materialen. De kennis van deze drie parameters vormt de basis voor een ecologische en economische mapping van het smeltloos recyclageproces en is de eerste stap in het vinden van potentiële markten voor smeltloos gerecycleerde materialen. Figuur 1 illustreert de omvang van het onderzoek naar smeltloze recyclagetechnieken gedurende de laatste 60 jaar.



**Figuur 1: het aantal significante smeltloze recyclagepapers gepubliceerd per jaar**

### 2.1 Overzicht

Tabel 1 vat alle onderzochte processen samen, met informatie over processen en materialen en de onderzoeken zelf. Sectie 2.2 bespreekt het huidige gepubliceerde onderzoek naar smeltloze recyclagetechnieken en Sectie 2.3 vat dit samen en trekt er conclusies uit.

Proces		Materiaal			onderzoek	
Hoofd-proces	Sub-proces	Legering	Type schroot	Gerecycleerd product	Referenties	Opmerkingen
Extrusie	Warmextrusie	Aluminium	Spanen	Profiel	(Stern, 1945), (Gronostajski, 1997), (Chino, 2003), (Lee, 2005), (Tekkaya, 2009), (Pantke, 2012), (Güley, 2010; 2013)	Eerste patent, treksterkte, vloeispanning en breukrek, lage corrosieweerstand
				Composiet	(Gronostajski 2002), (Fogagnolo, 2003), (Chmura, 2006)	Lagermaterialen met brons, recycleren van composiet
				Andere	(Chiba, 2015)	In C-profielen en blikjes
		Poeder & spanen	Profiel	(Sherafat 2009; 2010)	Sterkte stijgt en ductiliteit daalt met stijgende hoeveelheid spanen	
			Composiet	(Gronostajski 1996; 1999; 2000; 2001), (Vatansever, 2011)	Hardheid met W, hoge temperatuur met FeCr, lichtgewicht met vliegass	
			Andere	Profiel	(Güley, 2010)	Extrusieschroot
	Magnesium	Spanen	Profiel	(Mabuchi, 1995), (Nakanishi, 1998), (Watanabe, 2001), (Chino, 2006a; 2006b, 2006c), (Wang, 2006), (Wen, 2008), (Hu, 2008; 2010), (Wu, 2009), (Ji, 2009), (Peng, 2009; 2010), (Zhang, 2011), (Li, 2011), (Anilchandra 2010; 2012; 2013), (Miao, 2013)	Meest onderzocht proces, excellente hardheid & treksterkte, herhaalde recyclage moeilijk, slechte vermoeiingsweerstand, goede corrosieweerstand	
			Andere	Profiel	(Hu, 2010)	gieterijschroot
			Schroef-extrusie	Aluminium	Draad	Profiel
Extrusie met hevige plastische vervorming	Extrusie met ECAP matrijs	Aluminium	Spanen	Profiel	(Misiolek, 2012), (Haase, 2012, 2015a), (Kocisko, 2014)	Extra achterwaartse druk, excellente mechanische eigenschappen
				Andere	(Haase, 2015b)	+koudextrusie tot blik en staaf

	Wrijvingsroer-extrusie	Aluminium	Spanen	Draad	(Tang, 2010), (Hosseini, 2012), (Behnagh, 2014), (Li, 2016)	Wrijvingswarming, niet stationair
		Magnesium	Spanen	Draad	(Behnagh, 2015), (Sharifzadeh, 2015)	Slijtvast, goede corrosieweerstand
	Cyclische extrusie compressie	Magnesium	Spanen	Profiel	(Peng, 2009; 2011)	Vele compressiecycli resulteren in excellente ductiliteit
Hevige plastische vervorming	ECAP	Titanium	Spanen	Billet	(Luo, 2010; 2012a; 2012b; 2013), (McDonald, 2012; 2014),	Achterwaardse druk geeft zeer fijne microstructuur
	HPT	Aluminium	Spanen	Billet	(El Aal, 2013)	Hoge druk torsie
Andere methodes	Vonkplasma-sinteren	Aluminium	Spanen	Billet	(Paraskevas, 2014)	Potentieel voor near-net-shape producten
			Plaat	Billet	(Paraskevas, 2015)	Mechanische druk en gepulseerde elektrische verwarming
	Smeden	Aluminium	Spanen	Billet	(Yusuf, 2013), (Shahrom, 2013), (Behrens, 2014)	Potentieel voor near-net-shape producten, lage treksterkte
	Persen	Aluminium	Spanen	Composiet	(Canakci, 2014)	Niet volledig geconsolideerd
Combinatie	extrusie + walsen	Aluminium	Spanen	Plaat	(Chino, 2004), (Suzuki, 2007), (Chiba, 2011)	Differentieel snelheidswalsen voor oppervlaktekwaliteit, matige vervormbaarheid
	extrusie + walsen + verbinden	Aluminium	Spanen	Plaat	(Shigematsu, 2005)	wrijvingsroerlassen
	Hevige plastische vervorming + smeden	Aluminium	Spanen	Billet	(Aizawa, 2002), (Luangvaranunt, 2002)	Oplossen ijzercontaminaties met bulk mechanisch legeren
Voor-behandeling	Precompactie	Aluminium	Spanen	Precompact	(Kacmarcik, 2012)	Kleine invloed spaangrootte, grote invloed perskracht
	Reiniging	Aluminium	Spanen	Spanen	(Cui, 2010)	Chemisch en thermisch
Potentieel voor industrie	Economisch	Aluminium	Draad, spanen	Billet	(Samuel, 2003)	Voordeliger dan hersmelten
	Ecologisch	Aluminium	Spanen	Billet	(Dufrou, 2015)	LCA, lagere impact dan hersmelten

**Tabel 1: Overzicht van alle behandelde smeltloze recyclageprocessen**

Naast aluminium en al haar legeringen, bestudeert deze literatuurstudie ook titanium, magnesium en hun legeringen om meer inzicht te krijgen in de bestaande smeltloze recyclageprocessen. Daarnaast is dit een eerste aanzet voor de uitbreiding van het onderzoek naar het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclagetechnieken tot andere metalen. Om dezelfde redenen is de literatuurstudie niet beperkt tot warmextrusie en vonkplasmasinteren, maar tracht de studie een overzicht te bieden van alle bekende smeltloze recyclageprocessen. Bijna al deze recyclageprocessen leiden tot een verfijnde microstructuur. Ook resulteert het oxidelaagje op het oppervlak van spanen meestal in een verhardend effect. Tussen de verschillende smeltloze recyclagemethodes is er echter wel een grote variatie in deze eindeigenschappen. Om die reden gebeurt in de meeste onderzoeken een vergelijking met een referentiespecimen. Dit referentiespecimen is, tenzij anders vermeld, gedefinieerd als een profiel, uit primair metaal van dezelfde legering als de in het onderzoek bestudeerde te recycleren reststroom en op dezelfde manier verwerkt.

## 2.2 Bespreking

### 2.2.1 Extrusie

Extrusie is het meest gekende proces voor het smeltloos recycleren van verspaningsafval en ander klein afval van non-ferrometalen tot profielen. Stern patenteerde deze methode voor het eerst in 1945 (Stern, 1945). Het huidige proces bestaat meestal uit het reinigen, koud precompacteren en vervolgens warm extruderen van verspaningsafval tot profielen.

#### 2.2.1.1 Warmextrusie

##### *Aluminium*

Gronostajski et al. recycleren spanen van de AlCu<sub>4</sub> legering (1996) en van AlMg<sub>2</sub>, AlMg<sub>2</sub>-W en AlC legeringen (1999) tot composieten via warmextrusie. Het proces bestaat uit het vermalen van spanen, het toevoegen van wolfram poeder, koud precompacteren aan 210 MPa, warm extruderen op 510°C en een warmtebehandeling op 170°C met variërende tijdsduur. Het gerecycleerd product vertoont vergelijkbare eigenschappen met metallurgisch geproduceerde metaalcomposieten. Toevoegen van Wolfram tot 0,6% geeft een iets betere treksterkte en hardheid maar vermindert de plastische eigenschappen lichtjes. Boven de 0,6% wolfram is er geen significant verschil in eigenschappen meer. Een langere warmtebehandeling geeft ook een betere treksterkte en hardheid maar slechtere plastische eigenschappen (Gronostajski et al., 1996).

Het toevoegen van FeCr poeder aan aluminium spanen verbetert de mechanische eigenschappen bij hoge temperatuur, nuttig voor gebruik in auto's (Gronostajski et al., 2001). Bij temperaturen tot 150°C geeft 6% FeCr het beste resultaat. Een recycleaat van



een mengsel van aluminium spanen en fijn vermaalde aluminium-brons spanen geeft wrijvingslagermaterialen met hoge sterkte en weerstand tegen slijtage (Gronostajski et al., 2002). De beste eigenschappen bekomt een composiet met 16-22% aluminium-brons fase. Een grote hoeveelheid plastische vervorming en drukspanning zijn nodig om de binding te verzekeren. Een theoretisch criterium kan deze nodige hoeveelheid voorspellen (Chmura et al., 2006).

Omdat het vermalen van spanen lang duurt, onderzocht dezelfde onderzoeksgroep of het versnijden van spanen een bevredigend resultaat geeft. Tweemaal snijden van spanen aan een snijsnelheid van 4,6m/s is voldoende (Gronostajski et al., 1997). Ook sinteren voor warmextrusie is niet nodig en heeft weinig effect (Gronostajski et al., 2000). Het diffusietransport van materiaal tijdens een sinterstap zonder plastische vervorming is zeer beperkt omdat het oppervlak van deze deeltjes geoxideerd is. Pas tijdens de extrusie is er een groot diffusietransport tussen de deeltjes.

Fogagnolo et al. introduceerden een verder vereenvoudigd proces (2003). Het weglaten van het vermalen en versnijden van spanen levert nog steeds een goed resultaat. Ook is het niet nodig om de spanen te verwarmen bij het precompacteren. Koudpersen aan 650MPa resulteert in een billet met een dichtheid van 2,48 g/cm<sup>3</sup>, 92% van de dichtheid van aluminium. Na warmextrusie heeft het koudgeperste profiel een treksterkte van 292 MPA en het warmgeperste profiel (aan 700MPa, 500°C) een slechts iets betere treksterkte van 309 MPA.

Chino et al. recycleerden de aluminium 5083 legering via extrusie op 450°C en een extrusieratio van 44:1, zonder precompactie (2003). Bij kamertemperatuur bedragen Treksterkte, vloeispanning en breukrek 329 Mpa, 179 MPa en 16%, vergelijkbaar met de 345 MPa, 187 MPa en 17% van de referentielegering. Aan hogere temperaturen, boven de 300°C, is de breukrek echter slechts ongeveer half zo groot als de breukrek van de referentie, te verklaren door de harde oxidedeeltjes die in de weg zitten voor het ductiel aluminium. Bij een onderdompeling van 12 tot 24u in een 3 gewichts% NaCl-oplossing is het massaverlies door corrosie bij het recycelaat dubbel zo hoog als bij het referentiespecimen. Dit is te wijten aan de contaminatie van de spanen met ijzerdeeltjes, afkomstig van snijgereedschappen, die galvanische corrosie veroorzaken. Lee et al. voerden een gelijkaardig experiment uit en concluderen dat de lagere breukrek van het recycelaat bij hoge temperatuur enkel voorkomen wanneer de vervormingssnelheid groot is (2005).

Sherafat et al. experimenteerden met het recycleren van Al7075 spanen en zuiver aluminium poeder tot een tweefasig materiaal (2009; 2010). Tot 90% spanen leidt tot het verhogen van de hoeveelheid spanen tot een verhoogde treksterkte maar lagere breukrek, boven de 90% spanen vormt het materiaal geen goede binding. Tussen 10% en 60% spanen varieert de treksterkte van 146 tot 248MPa en de breukrek van 20,4 tot 14,4%. Vatansever et al. vermalen AA6061 spanen, mengen die met vliegias en recycleren dit via warmextrusie tot een composiet (2011). Het composiet is lichter dan zuiver AA6061 en heeft een hogere hardheid.

Tekkaya et al. extrudeerden spanen van AA6060 op 500°C tot profielen met een goede oppervlaktekwaliteit (2009). Zij compacteren aan slechts 20 MPa, een forse reductie ten opzichte van eerder onderzoek. De lucht die de geprecompacteerde billet nog bevat ontsnapt tijdens extrusie en leidt niet tot defecten. De vloeispanning van 143-160 MPa bij een rek van 15% is vergelijkbaar met de vloeispanning van 162 MPa bij dezelfde rek voor een referentieprofiel. Verschillende spaangeometrieën geven hetzelfde resultaat, veelbelovend voor de industrialisatie. Echter, een test om een composiet met SiC te maken mislukte omdat deze harde deeltjes het oppervlak aantasten. Pantke et al. vergeleken extrusieprofielen van AA7175 en AA7475 blokken, zelfgemaakte spanen en spanen van een productielijn uit de vliegtuigbouw (2012). De vloeispanning, treksterkte en hardheid van de industriële spanen is beter dan de eigenschappen van zelfgemaakte spanen en nieuwe blokken. Enkel de E-modulus is iets lager. Güley et al. recycleerden een materiaal voor de helft bestaand uit AA6060 verspaningsafval en voor de andere helft bestaand uit AA1050 pinnetjes als reststroom van een extrusieproces (2010). Tevens onderzochten Güley et al., zowel experimenteel als met een eindige elementen simulatie, de invloed van het matrijstype op het finaal product (2013). Een profiel van AA6060 spanen geëxtrudeerd in een 'porthole' matrijs heeft een 80% betere ductiliteit dan wanneer een gewone 'flat-face' matrijs gebruikt wordt.

Chiba en Yoshimura gaan een stap verder en recycleren spanen van een Al-Si legering rechtstreeks in C-profielen via warmextrusie met een C-vormige matrijs (2015). Bij een extrusieratio van 18:1 bekomen ze profielen met een betere ductiliteit maar wel een lagere treksterkte dan een referentieprofiel. Ze stellen dat dit voor sommige toepassingen van deze profielen, bijvoorbeeld voor raamprofielen, geen probleem is omdat deze toepassingen de volle sterkte en ductiliteit niet gebruiken.

### *Magnesium*

Mabuchi et al. recycleerden magnesium AZ91 spanen via sinteren, extrusie op 300°C, 400°C of 500°C en een warmtebehandeling (1995). Sinteren alleen is niet voldoende om een homogeen materiaal te bekomen. De mechanische eigenschappen zijn vergelijkbaar met een referentieprofiel. Bij het verhogen van de extrusietemperatuur vergroten de korrels in de materiaalstructuur, daalt de treksterkte en stijgt de breukrek (Mabuchi et al., 1995). Nakanishi et al. observeren dezelfde invloed van de extrusietemperatuur op de mechanische eigenschappen van een uit magnesium ZK60 gerecycleerd profiel (1998). Watanabe et al. stellen dat extrusie in het superplastisch gebied, met bijvoorbeeld een extrusieratio van 10:1 en aan een temperatuur van 350-450°C, een noodzakelijke voorwaarde is om voldoende binding te bereiken bij het recycleren van spanen van de AZ31 legering (2001). Chino et al. onderzochten de weerstand tegen vermoeiing van gerecycleerd AZ31 ten opzichte van een referentieprofiel (2006a). Bij vergelijkbare treksterkte, vloeispanning en ductiliteit is de weerstand tegen vermoeiing van het recyclaat slechter. De oxides waar gemakkelijk barstjes rond vormen zijn de oorzaak.

Dezelfde onderzoeksgroep test hoe de mechanische eigenschappen veranderen na meerdere malen recycleren van AZ31 spanen met warmextrusie (Chino et al., 2006b). Een warmgeëxtrudeerde profiel draaiden ze opnieuw af tot spanen om vervolgens het experiment tot vijf keer te herhalen met die spanen. Bij kamertemperatuur zijn de treksterkte en vloeispanning steeds vergelijkbaar met een referentiespecimen. De maximale breukrek is voor de éénmaal gerecycleerde profielen vergelijkbaar met het referentiespecimen. Bij de vijfmaal gerecycleerde profielen is de breukrek slechts 2/3 van de breukrek van het referentiespecimen. Dit komt door de onevenwichtig verdeelde oxides die talrijker aanwezig zijn in de meermaals gerecycleerde profielen. Bij een testtemperatuur van 300°C is de breukrek van alle gerecycleerde profielen slechts 70% van de breukrek van het referentieprofiel.

Weerstand tegen corrosie, gemeten via onderdompeling in een 5gewichts% NaCl-oplossing gedurende 3 dagen, is significant beter bij het éénmaal gerecycleerd profiel dan bij het referentiespecimen. Meermaals gerecycleerde profielen hebben een lagere corrosieweerstand vergeleken met het referentiespecimen. Chino et al verklaren dit door de talrijke oxides met een distributie parallel aan de extrusierichting, die als beschermende laag optreden (2006b). Echter, bij het meermaals recycleren heeft de galvaniserende werking van de steeds talrijkere ijzercontaminaties, afkomstig van het verpsaningsproces, de overhand. Zhang et al. deden eveneens onderzoek naar corrosie bij een gerecycleerde AZ31B legering (2011). Weerstand tegen corrosie bij de profielen gerecycleerd met een extrusieratio van 44:1 is ongeveer dubbel zo goed als de weerstand van het referentiespecimen.

Wang et al. simuleren een corrosie-intensieve productieomgeving door het onderdompelen van magnesium AZ91D spanen in zeewater gedurende 2 dagen (2006). De spanen vervolgens recycleren via sinteren en warmextrusie levert profielen op met een goede microstructuur maar significant lagere mechanische eigenschappen vergeleken met een referentieprofiel. Hu et al. testen de invloed van de grootte van AZ91D spanen op de eindeigenschappen van gerecycleerde profielen (Hu et al., 2008). Kubusvormige spanen hebben een breukrek tot dubbel zo hoog als langwerpige, platte spanen. De kubusvormige spanen hebben een kleinere oppervlakte/ volumeverhouding en bevatten minder oxides. Wu et al. observeren dat het percentage oxides in de spanen lineair stijgt met de oppervlakte/volumeverhouding (2009). De treksterkte van gerecycleerde AZ31B profielen is beter dan van het referentiespecimen en beter naarmate de extrusietemperatuur verhoogt van 350°C tot 450°C (Wu et al., 2009). Hu et al. recycleerden ook AZ91D schroot van een industrieel gietproces via warmextrusie (2010). Bij de hoogst geteste extrusieratio van 40:1 zijn de oxidelagen op het schroot volledig gebroken en zijn de treksterkte en de rek tot breuk significant hoger bij de gerecycleerde profielen dan bij een gegoten referentiemateriaal.

Anilchandra en Surappa onderzochten de invloed van de spaanhoek bij het afdraaien van een stuk uit zuiver magnesium op de kwaliteit van een profiel van deze spanen gerecycleerd met warmextrusie (2010). Dit is de hoek die de afbrekende spaan en het

gereedschap maakt met de loodrechte op het werkstukoppervlak, positief wanneer de hoek tussen de afbrekende spaan en het werkstukoppervlak kleiner dan  $90^\circ$  is. Hoe negatiever de spaanhoek, hoe beter de treksterkte en hardheid. De microstructuur en het compressiegedrag na warmextrusie volgen een Hall-Petchrelatie, wat betekent dat het materiaal versterkt bij kleinere korrelgrootte (Anilchandra en Surappa, 2012a). De korrelgrootte is kleiner en de dichtheid is beter ten opzichte van een referentiespecimen (Anilchandra en Surappa, 2012a). De gerecycleerde profielen vertonen een betere demping en hogere stijfheid vergeleken met een referentieprofiel, dit zowel bij kamertemperatuur als op hoge temperatuur (Anilchandra en Surappa, 2012b). Dit komt doordat de spaangrenzen de groei van korrels tegenhouden. Tot slot is de treksterkte en vloeispanning in de gerecycleerde profielen hoger dan die van het referentiespecimen (Anilchandra en Surappa, 2013).

Peng et al. stellen een wiskundig model op om de nodige energie voor warmextrusie a priori te schatten, gevalideerd met het experimenteel recyclen van magnesium GW102K spanen (2009). Optimalisatie van het smetloze recyclageproces voor deze legering resulteert in een ideale extrusietemperatuur van  $450^\circ$ , gevolgd door een T5 warmtebehandeling (Peng et al., 2010). Het gerecycleerde profiel heeft dan nagenoeg dezelfde treksterkte, vloeispanning en breukrek als het referentiespecimen. Enkel bij de extrusietemperatuur van  $450^\circ\text{C}$  is de corrosieweerstand van het gerecycleerde profiel vergelijkbaar met die van het referentiespecimen (Miao et al., 2013). Bij andere temperaturen is de weerstand van het gerecycleerd profiel lager.

Li et al. onderzochten het gedrag van een gerecycleerde AZ91D legering bij lage gebruikstemperaturen (2011). De treksterkte stijgt bij het dalen van de gebruikstemperatuur. Bij de zeer lage gebruikstemperatuur van  $-130^\circ\text{C}$ , heeft het profiel een maximale treksterkte van 360 MPa. De breukrek daarentegen daalt met dalende temperatuur, tot slechts 5,5% bij  $-130^\circ\text{C}$ .

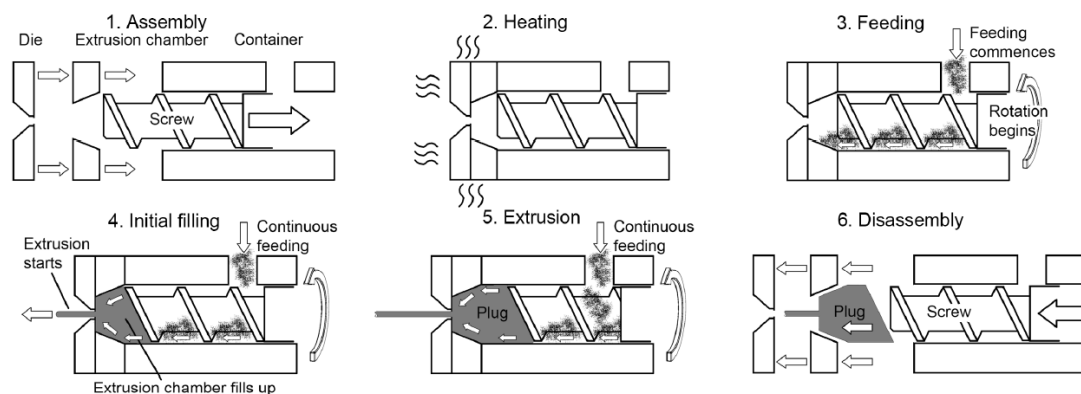
Chino et al. recycleerden magnesium AZ31 spanen via warmextrusie op  $400^\circ\text{C}$  en zonder precompactie met de extreme extrusieratio van 1600:1 (2006c). De extreme extrusieratio resulteert in een meer uniforme dispersie van de ijzercontaminaties in het magnesium. De treksterkte en vloeispanning zijn lager dan bij een gewone extrusieratio (45:1), maar de breukrek is beduidend hoger. In vergelijking met het referentiespecimen dat dezelfde extreme extrusieratio heeft ondergaan, is de treksterkte en vloeispanning beduidend hoger. Dit is toe te schrijven aan het hoge en fijn gedisperseerde oxidegehalte.

Een interessante test op de nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid van resultaten in deze literatuurstudie is een vergelijking van het onderzoek van Wen et al. en Ji et al. Beide onderzoeken, van dezelfde onderzoeksgroep, bevatten één resultaat met dezelfde parameters : extrusie van Mg-Nd-Zn-Zr op  $450^\circ\text{C}$  aan een extrusieratio van 25:1 en met precompactie op 350 MPa. Bij Wen et al. geeft dit een treksterkte van 225 MPa, bij Ji et al. 250 MPa. Besluit is dat de bekomen resultaten steeds slechts als

benadering te gebruiken zijn, aangezien de variatie op het resultaat significant is bij gelijke procesparameters.

### 2.2.1.2 Schroefextrusie

Wideroe et al. bouwden een machine om te testen of spanen met een schroefbeweging aanvoeren naar de extrusiematrijs een continu proces kan verzekeren dat de precompactiestap elimineert (2011). De test bewijst dat compressie met rotatie een lagere axiale druk nodig heeft dan compressie zonder rotatie. Vervolgens bouwden ze een echte schroefextrusiemachine en voeren ze een test uit met contrastmateriaal (Wideroe et al., 2012). Aan de bovenkant is er een opening om spanen toe te voeren. De horizontale schroef verplaatst en drukt de spanen samen richting de extrusiekamer terwijl ze roteert aan 10 omwentelingen per minuut. De volledige extrusieopstelling is voorverwarmd op 500°C. Wanneer de druk in de extrusiekamer voldoende hoog is opgebouwd, begint de extrusie. Figuur 2 illustreert de verschillende stappen.



**Figuur 2: Beschrijving van het schroefextrusieproces (Wideroe, 2012)**

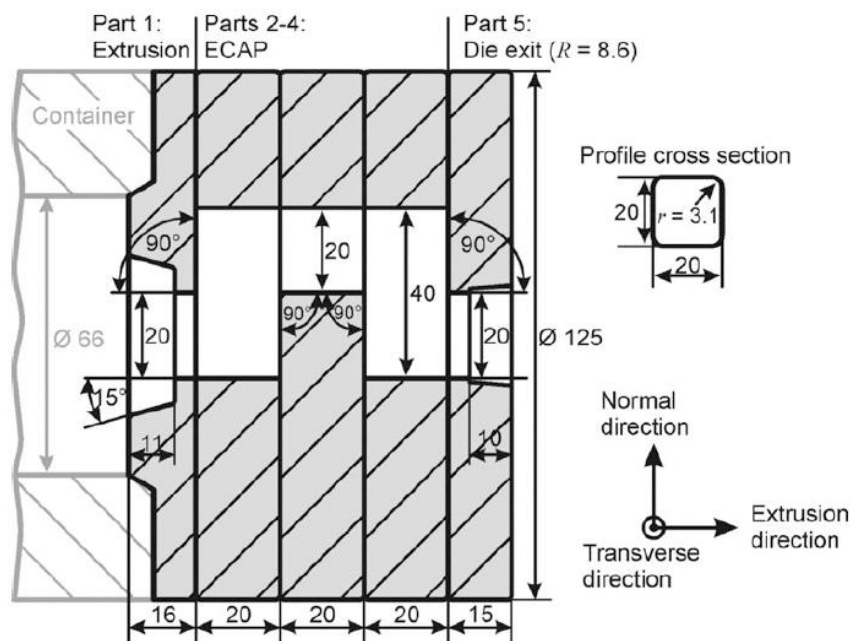
Het opendoen van de machine na de test met AA6060 spanen en Al-Cu legering die zwart kleurt na etsen liet toe vragen in verband met de materiaalvloeit, verplaatsing en wrijving te beantwoorden. Kleefwrijving was aanwezig op zowel de schroef als de containerwanden. De bodem van het schroefkanaal en de hoeken van de extrusiekamer bevatten dode zones. De extrusiesnelheid varieert gedurende de schroefextrusie. Uit bijkomende experimenten concluderen Wideroe et al. dat de zwaartekracht en de voedingsnelheid de materiaalvloeit sterk beïnvloeden (2013). De veranderlijke en discontinue materiaalstroom richting extrusiekamer verklaart de cyclische variaties in extrusiesnelheid. Daardoor is de kwaliteit van het eindproduct nog niet gewaarborgd.

### 2.2.2 Extrusie met hevige plastische vervorming (SPD)

Nieuwere aanpassing van warmextrusie introduceren extra plastische vervorming om betere eigenschappen te bekomen. De in de literatuur gebruikte term voor een waaiert aan zulke processen is SPD-processen, naar de Engelse term 'Severe Plastic Deformation'.

### 2.2.2.1 Extrusie met ECAP matrijs

Gelijk kanaals angulair persen of ECAP (equal channel angular pressing) is een SPD proces. Het materiaal ondergaat plastische afschuifvervorming terwijl het door een kanaal dat bochten maakt geperst wordt. Haase et al. combineerden extrusie met ECAP (iECAP of integrated equal channel angular pressing) voor het smeltloos recycleren van aluminium spanen (Haase et al., 2012). Een gewone voorwaartse extrusiepers vullen zij aan met een speciale matrijs. Die matrijs bestaat uit een conventionele extrusiematrijs gevolgd door een kanaal waarin het materiaal vier keer een bocht van 90° moet maken alvorens de eigenlijke extrusie door een matrijs gelijk aan de eerste matrijs gebeurt. Het kanaal en de matrijsen hebben een vierkante doorsnede met een zijde van 20 mm (Figuur 3).



**Figuur 3: De ECAP-extrusiematrijs (Haaset et al., 2015)**

Haase et al. vergelijken de recyclage van AA6060 spanen via extrusie met een ECAP matrijs, een conventionele matrijs en een porthole matrijs (matrijs met vier toevoerkanalen). Bij een extrusieratio van 8,6:1 bereikt de conventionele matrijs geen volledige spaanbinding, de ECAP en porthole matrijs wel. Na ECAP heeft het specimen een maximale spanning van 195 MPa bij een rek van 24%. De conventionele matrijs, de porthole matrijs en een referentiespecimen geven een beduidend slechtere rek bij een vergelijkbare spanning, 169MPa bij 15% rek, 178MPa bij 16% rek en 167 MPa bij 15% rek, respectievelijk. De hardheid van ECAP na extrusie op 450°C bedraagt 46HV en is lager dan de 53 HV voor de conventionele matrijs.

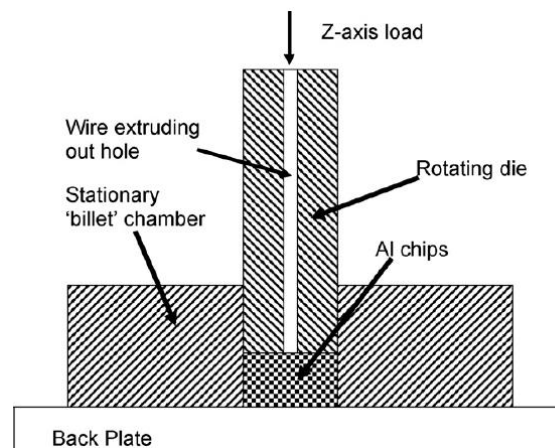
Volgend op conventionele extrusie en extrusie met een ECAP matrijs recycleren Haase et al. de profielen verder via achterwaardse koudextrusie tot blikjes of voorwaartse koudextrusie tot profielen (2015a). Blikjes uit extrusie met een conventionele matrijs

bereiken niet voldoende spaanbinding. Profielen uit extrusie met een conventionele matrijs delamineren bij compressietesten. De superieure spaanbinding bij extrusie met ECAP matrijs maakt die matrijs een nodige voorwaarde voor een defectvrij eindproduct bij deze testparameters.

Kocisko et al. voerden een numerieke simulatie uit als vergelijking tussen een conventionele matrijs, een porthole matrijs, een porthole matrijs met vier uitgangen en een iECAP matrijs met vier bochten van 90° (2014). De porthole matrijs bereikt de hoogste rek terwijl de iECAP matrijs de grootste extrusiekracht nodig heeft, 30% hoger dan die van de porthole matrijs.

#### 2.2.2.2 Wrijvingsroerextrusie

Wrijvingsroerextrusie (Engels : friction stir extrusion) kan verspaningsafval tot draad recyclen (Tang en Reynolds, 2010). De achterwaartse extrusie set-up bestaat enerzijds uit een vaste extrusiekamer en anderzijds uit een gecombineerde ram en matrijs. De kamer bevat aluminium spanen. De ram met matrijs perst de spanen samen door een neerwaartse beweging en stuwt zo de spanen in de matrijs. Ondertussen roteert de ram ook rond de z-as, wat zorgt voor extra plastische vervorming en opwarming door warmtedissipatie van het materiaal in de extrusiepers. De draad verlaat de matrijs langs de bovenkant (Tang en Reynolds, 2010). Figuur 4 geeft een schematische voorstelling van de opstelling voor wrijvingsroerextrusie.



**Figuur 4: De opstelling van wrijvingsroerextrusie (Tang en Reynolds, 2010)**

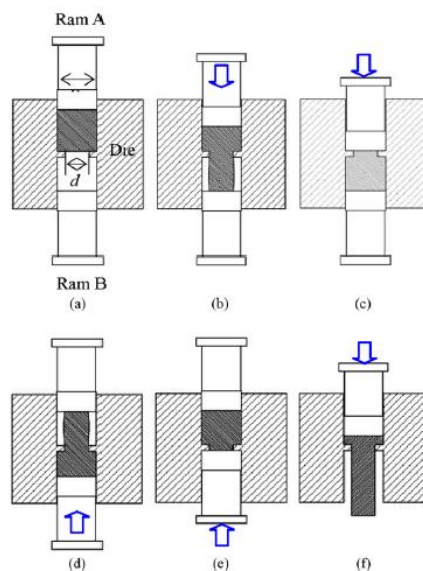
In het onderzoek van Tang en Reynolds vertoont de draad, uit aluminium frees-spanen van de AA2050 en AA2195 legeringen, geen oppervlakte-defecten en een goede microstructuur na wrijvingsroerextrusie met een rotatiesnelheid tussen 150 en 250 toeren per minuut. Bij een hogere of lagere snelheid zijn er wel problemen. In een ander onderzoek met wrijvingsroerextrusie van AA2025 frees-spanen is de microstructuur en het oppervlak van de draad enkel bij een rotatiesnelheid van 400 toeren per minuut en een zo laag mogelijke neerwaartse snelheid (10 mm/min) defectvrij (Hosseini et al., 2012). Draad uit AA7277 spanen is enkel defectvrij bij een rotatiesnelheid van 160 toeren per minuut (Behnagh et al., 2014). De treksterkte van

290MPa en de breukrek van 17% is vergelijkbaar met een referentiespecimen. Een stromingstest met markeermateriaal bewijst dat die varieert met de extrusielengte (Li et al., 2016). Zelfs na extrusie van 2m draad is de stroming en rek nog niet in stationaire conditie.

Behnagh et al. recycleren spanen van zuiver magnesium uit een schaafmachine tot draad van 5mm diameter (2015). Een rotatiesnelheid van 250 toeren per minuut gecombineerd met een neerwaartse snelheid van 14mm/min. geeft de beste eigenschappen. De treksterkte is dan 160MPa, de breukrek 13% en de microhardheid tussen 0,4 en 0,5GPa. Bij het recycleren van spanen van zuiver magnesium verbeteren zowel slijtvastheid als weerstand tegen corrosie na wrijvingsroerextrusie (Sharifzadeh et al., 2015).

### 2.2.2.3 Cyclische extrusie compressie

De opstelling voor cyclische extrusiecompressie, weergegeven in Figuur 5, bestaat uit een extrusiematrijs met zowel aan de boven- als onderkant een extrusiekamer met variabel volume, afgesloten door een ram (Peng et al., 2009). Peng et al. vullen de bovenste kamer met geprecompacteerde magnesium GW102K spanen. Het volledige systeem is verwarmd op 400°C, 450°C of 500°C. De bovenste ram perst de spanen met een druk van 200 MPa door de matrijs naar de onderste kamer. De andere ram oefent ondertussen tegendruk uit. Dit is de eerste pas. Bij een volgende pas herhaalt het proces zich, maar nu van onder naar boven. Testen bevatten 1 tot 6 passen. Bij de laatste pas wordt de onderste ram verwijderd, zodat een extrusieprofiel uit de matrijs kan komen. De processnelheid is 25 mm/s.



**Figuur 5: Schema van een cyclische extrusie compressie cyclus (Peng et al., 2009)**

De korrelgrootte verkleint van een grootte van 70µm tot een homogene grootte van tussen de 20µm (1 pas) en 4µm (6 passen). De mechanische eigenschappen



verbeteren met het aantal passen. Bij de optimale temperatuur van 450°C bestudeerden Peng et al. het effect van het verhogen van het aantal passen tot maximum 14 passen (2011). Bij een verhoging van 1 tot 8 passen verhoogt de vloeispanning, treksterkte en breukrek tot 247MPa, 310MPa en 22%, respectievelijk. Daarna verhogen vloeispanning en treksterkte wel nog, maar verlaagt de breukrek opnieuw. Na 14 passen bedragen de vermelde eigenschappen 270MPa, 330Mpa en 15%, respectievelijk. Na 14 passen verandert de initiële vezelmicrostructuur tot een nieuwe structuur met korrels van kleiner dan 1µm en vele harde tweede fase partikels.

Een nadeel van deze methode is uiteraard de langere tijdsduur vergeleken met extrusie met één pas. Wanneer echter een ductiel materiaal nodig is, kan cyclische extrusie compressie een oplossing bieden. Peng et al. halen een breukrek van 22% via cyclische extrusie compressie, terwijl Miao et al. dezelfde legering recycleren via warmextrusie en slechts een breukrek van 6,5% halen (2013). De noden van de eindtoepassing moeten bepalen of de hogere breukrek het gebruik van cyclische extrusie compressie in plaats van warmextrusie verantwoordt.

### 2.2.3 Hevige plastische vervorming (SPD)

Deze methodes kenmerken zich door de grote spanningen die ze teweegbrengen in het materiaal. Zoals reeds eerder vermeld is de veelgebruikte afkorting SPD, naar de Engelse term 'Severe Plastic Deformation'.

#### 2.2.3.1 ECAP

Voor het recycleren van titanium, dat door zijn reactiviteit moeilijk te hersmelten is, stellen Luo et al. een ECAP methode met tegendruk voor (2010). Dit is een zuiver SPD proces, niet te verwarren met de iECAP methode, gebruikt voor het recycleren van aluminium, dat een combinatie is van ECAP en extrusie.

Het ECAP systeem bestaat uit een kanaal met een ronde doorsnede met een diameter van 11mm dat een hoek van 90° maakt. In beide uiteinden van het kanaal zit een plunjer. In de test is het kanaal gevuld met boorspanen van commercieel zuiver titanium, gewikkeld in grafietfolie. De temperatuur is 450°C of 590°C. De plunjers verzorgen een constante druk van 50MPa en duwen het materiaal meermaals door het kanaal aan een constante snelheid van 5 mm/min, waarbij het materiaal telkens gedwongen wordt om een bocht van 90° te maken.

De ECAP methode kan spanen recycleren tot volledig dense billets. De beste mechanische eigenschappen worden bereikt bij een temperatuur van 450°C en slechts twee passen, met een vloeispanning (0,2%rekgrens) van 650MPa en een Vickers hardheid van 2381HV. De sterkte en hardheid volgen de Hall-Petch relatie en zijn dus afhankelijk van de korrelgrootte. Versterking van het materiaal komt voornamelijk door de verfijnde microstructuur (Luo et al., 2012 a). De oxides op het oppervlak van de spanen spelen slechts een kleine rol in deze versterking, doordat het oxidegehalte zeer klein is. De kleinste korrels die het materiaal bevat zijn 0,8µm groot. De ductiliteit

verbetert met het aantal passen, van een breukrek van 4% bij twee passen tot een breukrek van 16% bij acht passen (Luo et al., 2012b). De nodige energie bij twee, vier of acht passen is ongeveer 40%, 60% en 95% van de nodige energie voor hersmelten, een ecologisch voordeel (Luo et al., 2013).

McDonald et al., van dezelfde onderzoeksgroep, variëren koorelgrootte en hardheid bij het recycleren van de meest gebruikte titaniumlegering, Ti-6Al-4V, via ECAP door een daaropvolgende warmtebehandeling met een tijdsduur variërend tussen 1u en 20u en een temperatuur tussen 700°C en 1000°C (2012). Na het ECAP proces met vier passen zijn de oxidelagen op de spaangrenzen nog zichtbaar in de microstructuur, vooral evenwijdig aan het ECAP kanaal. Na een warmtebehandeling van 20u zijn de oxidelagen volledig opgelost in het materiaal. Na ECAP is de hardheid (421 HV) significant hoger dan de hardheid van het materiaal waaruit de spanen gemaakt zijn (322 HV). Dit verschil verkleint na de warmtebehandeling en na een warmtebehandeling van 20u op 800°C is het verschil volledig verwenen. Typisch voor titanium legeringen is het gebruik van de industriële warmtebehandeling 'mill annealing'. McDonald et al. voerden ook dit proces uit op Ti-6Al-4V spanen via ECAP gerecycleerd (2014). Het resulterende materiaal heeft een vloeispanning van 1150MPa en een breukrek van 25%, terwijl gewoon commercieel verkrijgbaar 'mill-annealed' materiaal slechts een vloeispanning van 920 MPa en een breukrek van 22% heeft.

#### 2.2.3.2 Hoge druk torsie of HPT (high pressure torsion)

HPT is een proces dat zeer grote afschuifspanningen in een materiaal introduceert door een materiaalsample onder hoge druk samen te persen tussen twee schijven terwijl één van beide schijven langzaam ronddraait. El Aal et al. recycleerden aluminium AlSi8Cu3 boorspanen tot volledig dense schijven met HPT (2013). Eerst precompacteren ze de spanen onder een druk van 200MPa tot schijven van 2mm dik en 10mm diameter. Gedurende de HPT zelf ondergaan deze schijven tien omwentelingen aan één omwenteling per minuut en dit onder een druk van 8GPa en op kamertemperatuur. De korrelgrootte verkleint met een orde grootte tien en de hardheid stijgt tot 200HV na HPT. Mogelijke beperkingen voor toepassing in de industrie zijn de grootte van de stukken en de snelheid van het proces.

#### 2.2.4 Andere methodes

##### 2.2.4.1 Warmpersen

Canakci et al. proberen een composietmateriaal te maken uit AA7075 spanen, SiC korrels en zuiver aluminium (2014). Eerst koudpersen ze de AA7075 spanen gemengd met het SiC (2,5, 5 of 10 wt%) en Al poeder (10, 20, 30 of 50 wt%) samen onder een druk van 100 MPa. Vervolgens komt er een warmpersstap op een druk van 300 MPa aan een temperatuur van 500°C. Het resulterende materiaal is niet volledig dens en vertoont scheurtjes en holtes.

#### 2.2.4.2 Smeden

Yusuf et al. stelden voor om aluminium A6061 spanen te smeden en zo de precompactiestap en het voorverwarmen te elimineren in het smeltloos recyclageproces (2013). De vloeispanning en treksterkte na smeden bij 520°C en een druk van 70MPa bedragen 107MPa en 117MPa en zijn drie keer zo slecht als een gesmeed referentiespecimen. Yusuf et al. stellen dat de oorzaak ligt bij de testmachine, die slechts een druk van 70MPa toelaat, terwijl smeden ideaal onder een druk van 400MPa gebeurt (2013). Ook Sharom et al. behalen slechts een treksterkte van 118MPa bij het smeden van AA6061 spanen onder een druk van 57MPa (2013).

Behrens et al. onderzochten de invloed van verspaningsproces (draaien, boren en zagen), aluminiumlegering (AW2007, AW6082 en AW7075) en een additionele sinteringstap (500°C, 1uur) op het smeden van spanen (2014). Behrens et al. precompacteren via een persstap op 200MPa gevolgd door een persstap op 700MPa, dit in tegenstelling tot Yusuf et al. en Sharom et al., die niet precompacteren. De dichtheid na precompactie hangt vooral af van de gekozen legering en de druk en slechts in geringe mate van het verspaningsproces. De sinterstap heeft weinig invloed. De hardheid na het smeden van de spanen van de verschillende legeringen is zeer vergelijkbaar met de hardheid van een gesmeed referentiespecimen.

#### 2.2.4.3 Vonkplasmasinteren of SPS (Spark Plasma Sintering)

Paraskevas et al. recycleerden aluminium AA6061 en AA6082 spanen via vonkplasmasinteren (2014). Na het laden van geprecompacteerde spanen in de SPS machine wordt deze vacuüm getrokken. Door het aanleggen van stroompulsen bereikt het materiaal een temperatuur van 490°C. Vervolgens wordt het materiaal samengeperst gedurende zes minuten. Daarna wordt afgekoeld en heft men de belasting op. Na het SPS proces zelf volgt nog een warmtebehandelingsstap van 4u aan 175°C in droge lucht.

Dit proces resulteert in volledige dense aluminium schijven. De microstructuur onthult dat SPS de oxidelagen op de spanen kan breken. De hardheid van de schijven is homogeen en rond de 800 MPa. De E-modulus is ongeveer 80 GPa. Al deze eigenschappen zijn ongeveer 10% hoger dan die van een referentiemateriaal, door het hoger oxidegehalte in de spanen. Daarnaast is de methode ook energie-efficiënt, met lokale volumeverwarming in het materiaal. Uit een eindige elementen simulatie blijkt dat de temperatuur in het center van het materiaal 40°C hoger is dan de 490°C aan de rand van de pers (Paraskevas et al., 2014).

Paraskevas et al. onderzochten ook de mogelijkheid om andere afvalmateriaalstromen te recyclen met vonkplasmasinteren (2015). Meer specifiek gaat het om de recyclage van aluminium AA5182 plaatmateriaal met een dikte van 1,2 mm. De plaat wordt eerst versneden tot vierkantjes van 1x1 cm en door de platte vorm is precompactie niet nodig. Ook dit proces resulteert in volledige dense aluminium schijven. De microstructuur onthult dat SPS de oxidelaag op de plaat kan breken.

## 2.2.5 Combinaties

### 2.2.5.1 Extrusie en walsen

Chino et al. recycleerden aluminium AA5083 draaispanen van 3 verschillende groottes via warmextrusie gevolgd door walsen (2004). Na extrusie volgt een warmtebehandeling, walsen loodrecht op de extrusierichting op kamertemperatuur tot een rolreductie van 80% en vervolgens nog een warmtebehandeling. De treksterkte, vloeispanning en breukrek van de gerecycleerde plaatjes bedragen 305-307MPa, 167-169MPa en 15-16% en zijn vergelijkbaar met een referentieplaatje. Bij het blaasvormen van de plaatjes tot een komvormig element faalt het plaatje gerecycleerd uit de kleinste spanen (1,4mm lang, 0,2mm dik) alvorens de gewenste vorm bereikt is. De plaatjes gerecycleerd uit grotere spanen (minstens 3,0mm lang, 1,2mm dik) en het referentieplaatje bereiken succesvol de gewenste komvorm. Chino et al. besluiten dat de hoeveelheid oxides in het materiaal stijgt bij kleinere spanen en dat de oxides de vervormbaarheid van het materiaal beperken (2004).

Suzuki et al. recycleerden draaispanen van aluminium AA6061 via warmextrusie gevolgd door walsen (2007). Gewoon walsen wordt vergeleken met differentiële snelheidswalsen (DSR). Na precompactie en extrusie gebeurt het walsen op een temperatuur van 250-400°C en met een totale reductie van 60%. Vanaf walsen op een temperatuur hoger dan 350°C zijn de treksterkte (360MPa) en breukrek (20%) vergelijkbaar met een referentieplaat. DSR resulteert in iets betere mechanische eigenschappen, vooral wanneer de volledige reductie in één pas gebeurt. Het opmerkelijkste voordeel van DSR is echter dat de esthetiek van het oppervlak sterk verbetert doordat DSR de oxides veel meer breekt dan gewoon walsen.

Vanuit de zoektocht naar energie-efficiënte processen recycleren Chiba et al. aluminium AC4CH spanen van een freesproces via precompactie en koudextrusie gevolgd door walsen op kamertemperatuur (2011). De mechanische eigenschappen na walsen met 20 passen die in totaal 85% reduceren zijn beter dan een referentiespecimen wat betreft de treksterkte, 230 MPa tegenover 190 MPa, maar veel slechter wat betreft de breukrek, 1,5% tegenover 3%. Koud walsen zonder voorafgaande extrusie en koudextrusie zonder walsen resulteren niet in een volledig dens materiaal.

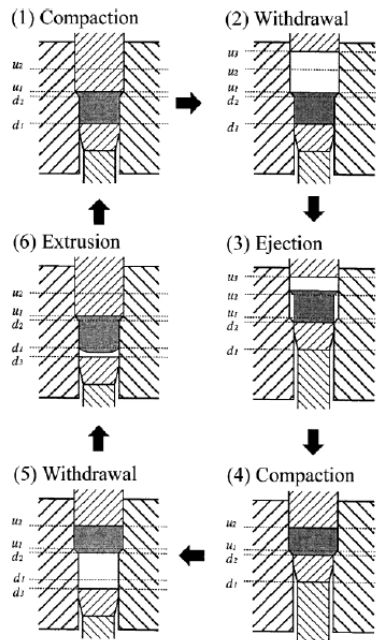
### 2.2.5.2 Extrusie, walsen en verbinden

Shigematsu et al. stellen dat het moeilijk is om materialen met grote dimensies en oppervlakken te bekomen via smeltloze recyclagetechnieken (2005). Om lokaal smelten, nefast voor de microstructuur, te vermijden, verbinden Shigematsu et al. via wrijvingsroerlassen. Bij wrijvingsroerlassen veroorzaakt een roterend gereedschap een zeer grote afschuivingsvervorming en lokale wrijvingswarmte waar de aan elkaar te verbinden onderdelen elkaar raken. Extrusie van de aluminium AA6061 spanen gebeurt aan een ratio van 4:1 op 600°C. De volgende stap, het walsen, gebeurt loodrecht op de extrusierichting en op een temperatuur van 400°C. Het

wrijvingsroerlasgereedschap draait rond aan 1320 toeren per minuut en gaat vooruit aan 2 mm/s. De gelaste zone bevat geen defecten. De hardheid is vergelijkbaar met de hardheid in het bulkmateriaal. De microstructuur in de gelaste zone is zeer fijn met een homogene korrelgrootte.

### 2.2.5.3 SPD (Bulk mechanisch legeren) en smeden

Bulk mechanisch legeren of BMA (bulk mechanical alloying), een SPD proces, is een vorm van herhaalde extrusie door een matrijs tussen twee extrusiepersen afgewisseld door compactie tussen deze twee persen, één dergelijk cyclus is te zien op Figuur 6.



**Figuur 6: Schema van een BMA cyclus (Luangvaranunt, 2002)**

Luangvaranunt et al. stelden de BMA methode, gevolgd door smeden, voor om aluminium Al-12wt%Si spanen te recyclen (2002). BMA gebeurt aan 100, 200 of 500 cycli met elk een duur van 9s. Na BMA volgt een koude compactiestap in dezelfde pers, gevolgd door verwarming en smeden aan 250°C en onder een druk van 816 MPa. Dit proces resulteert in een verfijnde microstructuur, met de Si korrelgrootte dalend met een stijgend aantal BMA cycli. Deze daling is het sterkst gedurende de eerste 100 cycli, omdat grote partikels gemakkelijker breken dan kleine. De Al-Si legeringen begeven meestal door scheurtjes aan de grote Si korrels, dus verkleinen van deze korrels is een groot voordeel van BMA.

Aizawa et al., van dezelfde onderzoeksgroep, recyclen met ijzer gecontamineerd aluminium poeder via hetzelfde BMA en smeedproces. Het resultaat zijn fijne, homogeen gedistribueerde ijzerpartikels in de aluminium matrix, en Al-Fe bindingen. De vloeispanning na 400 BMA cycli is 340 MPa. BMA heeft dus potentieel voor het

recycleren van ijzergecontamineerde aluminium spanen tot een ijzerversterkt aluminium materiaal.

## 2.2.6 Voorbehandeling

Bijna alle behandelde technieken in deze literatuurstudie vereisen een voorbehandeling bestaande uit het reinigen en precompacteren van de spanen. Ook de parameters van deze voorbehandeling hebben invloed op het resultaat. Enkele onderzoekers hebben zich daarom gefocust op deze voorbehandelingsstappen.

### 2.2.6.1 Reiniging

Cui et al. vergeleken de kwaliteit van thermische en chemische reiniging (2010). Gedroogde spanen, geprecompacteerde spanen en spanen gezuiverd met aceton ondergaan een thermische analyse bij opwarming tot 550°C. De thermische analyse bestaat uit het meten van de massaverandering en uitlaatgaspieken met spectroscopie tijdens verwarming. De met aceton gereinigde spanen vertonen bijna geen massaverlies, wat wijst op een goede reiniging door aceton. De gedroogde en geprecompacteerde spanen daarentegen vertonen wel een groot massaverlies. De smeermiddelen en koelvloeistoffen op de spanen decomposeren tot gassen rond een piektemperatuur van 290°C. Bij de geprecompacteerde spanen ligt deze decompositietemperatuur hoger. Het CO<sub>2</sub>-gas, dat vrijkomt bij de oxidatie van het aluminium zelf, vertoont pas een piek bij 370°C.

### 2.2.6.2 Precompactie

Kacmarcik et al. testten de invloed van de spaanvorm en de perskracht op de kwaliteit van de geprecompacteerde billet (2012). Eerst frezen ze AlMgSi1 materiaal tot spanen onder vier verschillende combinaties van snijparameters. Daarna persen ze de spanen samen in een cilinder van 32 mm diameter onder een kracht van 245 kN, 98 kN en 8,8 kN. De invloed van de grootte van de spanen op de densiteit van de precompact is klein. De perskracht daarentegen heeft wel een grote invloed. De relatieve densiteit van de schijven geperst met een kracht van 8,8 kN is slechts 2/3 van de relatieve densiteit van de schijven geperst met 245 kN.

Misiolek et al. onderzochten de precompactiestap voor extrusie met ECAP (2012). Enerzijds gebeurt er een precompactie met één pas, anderzijds een precompactie van dezelfde hoeveelheid spanen met vier passen. Vier passen resulteert in een 5 tot 7,5% hogere dichtheid van de billet maar dit heeft geen gevolg voor de mechanische eigenschappen na extrusie met ECAP.

## 2.2.7 Potentieel voor industriële toepassing

### 2.2.7.1 Economisch

Samuel stelt het economisch potentieel van smeltloze recyclage vast omdat dit geen irreversibel verlies van aluminium inhoudt terwijl het irreversibel verlies van

aluminium tijdens hersmelten van verspaningsafval 22% bedraagt (2003). Bij recyclage van spanen tot extrusieprofielen via hersmelten en extrusie komt slechts 52% van de oorspronkelijke massa in het profiel terecht, de rest bestaat uit productieafval dat opnieuw hersmolten moet worden en de irreversibele verliezen. Na een smeltloos recyclageproces tot profielen komt 96% van de oorspronkelijke massa in het profiel terecht. Het conventioneel proces heeft een energieverbruik van 600 kWh/ton spanen, het smeltloos recyclageproces slechts 30 kWh/ton. De kost voor het produceren van een poeder uit spanen via smeltloze recyclage is 2,15\$/kg, terwijl de kost van commercieel aluminium poeder via de conventionele methode 5,3\$/kg bedraagt.

### 2.2.7.2 Ecologisch

Duflou et al. formaliseerden het verschil in ecologische impact tussen conventionele en smeltloze recyclageprocessen met een LCA studie (2015). De LCA vergelijkt drie smeltloze recyclageprocessen, extrusie met ECAP, schroefextrusie en vonkplasmasinteren met recyclage via hersmelten en extrusie. Voor het hersmelten zijn 3 niveau's van smeltverliezen in rekening gebracht, gebaseerd op literatuur en de ervaring van industriële partners: 4% voor de meest efficiënt te recycleren afvalstromen, 16% voor spanen en 10% als medium categorie. Extrusie met ECAP of schroefextrusie hebben een impact die 2 tot 11 keer lager is dan een smeltproces. De impact van vonkplasmasinteren is 1,5 tot 2,5 keer lager dan een smeltproces bij 16% en 10% verlies. Wanneer het smeltproces slechts 4% verlies heeft, is vonkplasmasinteren ecologisch gezien niet beter.

## 2.9 Conclusie

Smeltloze recyclage van aluminium spanen via warmextrusie resulteert in een treksterkte, vloeispanning en breukrek vergelijkbaar met een referentiemateriaal. De corrosieweerstand is slecht en afhankelijk van de hoeveelheid ijzercontaminaties in de spanen. Bij verhitting gecombineerd met een grote vervormingssnelheid is de rek en vervormbaarheid slechter dan een referentieprofiel. De oppervlaktekwaliteit is goed.

Naast verspaningsafval is het ook mogelijk om extrusieschroot te recycleren. Vermalen of snijden van spanen, sinteren of warmpersen zijn niet nodig. Koud precompacteren resulteert reeds in een voldoende densiteit vanaf een druk van 20MPa. Extrusie gebeurt optimaal bij 450-500°C. De ductiliteit na extrusie in een 'porthole' matrijs is beduidend beter dan na extrusie in een conventionele matrijs. Het is mogelijk om rechtstreeks C-profielen te extruderen maar dit gaat ten koste van de treksterkte.

Composieten van gerecycleerde aluminium spanen en FeCr leiden tot hoge treksterkte bij hoge gebruikstemperaturen, composieten met brons resulteren in lagermaterialen met een hoge weerstand tegen slijtage. Een composiet met vliegglas is zeer licht en hard.

Bij het mengen van spanen en aluminium poeder daalt de treksterkte en stijgt de breukrek van het resulterend profiel met stijgende hoeveelheid poeder.

Smeltloze recyclage van magnesium spanen via warmextrusie resulteert in een treksterkte, vloeispanning en breukrek vergelijkbaar met een referentiemateriaal. De microstructuur volgt een Hall-Petchrelatie. Demping en stijfheid zijn zeer goed omdat de spaangrenzen de groei van korrels tegenhouden. Vermoeiingsweerstand is slechter dan een referentie omdat barstjes zich gemakkelijk rond de oxides vormen. Corrosieweerstand is beter, even goed of slechter dan bij de referentie, afhankelijk van het gevoerde onderzoek en de extrusietemperatuur. Dit éénduidig bepalen is onderwerp voor verder onderzoek. Na meermaals recycleren van dezelfde spanen verlaagt de breukrek en de corrosieweerstand door het steeds groter wordende oxidegehalte. Deze vaststelling plaatst serieuze vraagtekens bij de mogelijkheid tot gesloten kringloop recyclage.

Het oxidegehalte daalt en de breukrek stijgt bij recyclage van grotere, meer kubusvormige magnesium spanen. Bij spanen met meer negatieve spaanhoed is de treksterkte en hardheid na recyclage beter. Ook gieterijschroot is recycleerbaar. Een hogere extrusietemperatuur resulteert in een lagere treksterkte maar betere breukrek, omwille van de minder fijne resulterende microstructuur. Extrusie met een extreme extrusieratio leidt tot een zeer ductiel materiaal met zeer fijne microstructuur.

Schroefextrusie is een continu proces in ontwikkeling dat de precompacteerstap kan elimineren. Verder onderzoek naar een ontwerp van een schroefextrusiemachine die een constante extrusiesnelheid kan halen is nodig.

Door extra plastische vervorming aan het extrusieproces toe te voegen resulteert recyclage van aluminium spanen via extrusie met ECAP in profielen met een zeer hoge treksterkte, vloeispanning en ductiliteit. Waar profielen gerecycleerd via conventionele extrusie falen bij het extruderen van blikken en staven uit deze profielen, falen de met een ECAP matrijs gerecycleerde profielen niet.

Wrijvingsroerextrusie kan succesvol spanen tot draad recycleren zonder precompactiestap. De belangrijkste parameter is de rotatiesnelheid van de ram, waarvan voor elke legering een optimum moet gezocht worden. In experimenten is de stationaire conditie van dit continue proces nog niet bereikt.

Cyclische extrusiecompressie met 8 passen resulteert in een materiaal met een breukrek 3 keer zo hoog als na recyclage via warmextrusie maar duurt lang door de vele passen. De noden van de eindtoepassing moeten bepalen of de hogere breukrek het gebruik van cyclische extrusie compressie in plaats van warmextrusie verantwoordt.

Smeltloos recycleren van titanium en titaniumlegeringen via ECAP heeft potentieel. Omwille van de reactiviteit van titanium bij hoge temperatuur, is er een vraag voor een



dergelijk 'lage temperatuur' proces. Bovendien resulteert ECAP in een materiaal met een zeer hoge treksterkte, hardheid en ductiliteit.

Recyclage van aluminium via hoge druktorsie bereikt een zeer fijne microstructuur en grote hardheid. De voordelen van dit proces zijn slechts beperkt onderzocht. Recyclage van aluminium spanen via warmpersen resulteert niet in een volledig geconsolideerd materiaal. Recycleren via smeden geeft een hardheid vergelijkbaar met een referentiespecimen maar een veel lagere treksterkte. Mogelijk is de treksterkte wel goed bij smeden onder hoge drukken.

Vonkplasma-sinteren resulteert in volledig dense aluminium schijven en mogelijk ook near-net-shape producte. De mechanische eigenschappen zijn iets beter dan een referentiemateriaal, omwille van het hogere oxidegehalte in gerecycleerde spanen. Vonkplasma-sinteren kan ook plaatmateriaal recycleren.

Warmextrusie gevolgd door warm walsen kan aluminium spanen recycleren tot plaat. De vervormbaarheid van de plaat is slechts voldoende bij het recycleren van voldoende grote spanen omwille van het te hoge oxidegehalte in kleine spanen. Koudextrusie gevolgd door walsen op kamertemperatuur resulteert in een zeer lage breukrek. Differentieel snelheidswalsen breekt de oxides volledig en resulteert daardoor in een esthetisch goede oppervlaktekwaliteit. Wrijvingsroerlassen is een geschikte techniek om gerecycleerde platen, die meestal slechts beperkte afmetingen hebben, aan elkaar te verbinden. Bulk mechanisch legeren gevolgd door smeden kan verontreinigingen, bijvoorbeeld van ijzer, dispergeren in het materiaal.

In de voorbehandeling verwijderen zowel chemische als thermische reiniging de koelvloeistoffen van de spanen. Thermische reiniging moet gebeuren voor precompactie en rond een temperatuur van 300°C, om oxidatie van het aluminium zelf te vermijden. De spaanvorm heeft een geringe invloed op de densiteit na precompactie, de precompactiedruk heeft wel een grote invloed.

Omwille van het vermijden van irreversibele smeltverliezen, de lagere hoeveelheid productieafval en de lagere nodige energie biedt smeltloze recyclage een potentieel economisch voordeel ten opzichte van recyclage via hersmelten. De ecologische impact van smeltloze recyclage van spanen is significant lager dan de impact van recyclage via hersmelten.

Het is duidelijk dat vele processen voor smeltloze recyclage bestaan. Sommige zijn nog in ontwikkeling, van warmextrusie zijn de procesparameters en resulterende eigenschappen het meest onderzocht. De noden van de toepassing moeten uitwijzen welk proces interessant is. Voorbehandeling beïnvloedt het uiteindelijke resultaat.

# Hoofdstuk 3: Potentiele eindtoepassingen: vraag en aanbod

Dit hoofdstuk behandelt zowel de mogelijke maximale vraag naar smeltloos gerecycleerd aluminium als het maximale aanbod aan secundair aluminium geschikt om smeltloos te recyclen in Europa. De maximale vraag volgt uit een kwantificatie van het aantal toepassingen van aluminium waar smeltloos gerecycleerd aluminium de geschikte eigenschappen voor kan leveren. Nog openstaande onderzoeksvragen naar deze eigenschappen worden geïdentificeerd. Het maximale aanbod volgt uit een kwantificatie van de jaarlijkse hoeveelheid aluminium verspaningsafval geproduceerd in Europa. Implicaties voor het ASSuRe project op Belgisch niveau worden bekeken.

## 3.1 De vraag : schatting van de hoeveelheid toepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium

Aluminium is een materiaal gebruikt in zeer uiteenlopende eindtoepassingen. De specifieke noden van elke toepassing bepalen de eigenschappen die via de legeringssamenstelling en het productieproces aan het aluminium meegegeven moeten worden. Zoals besproken in Hoofdstuk 2 heeft smeltloos gerecycleerd aluminium eigenschappen die licht verschillen van primair aluminium.

De gevolgde methodologie voor het schatten van het totale potentieel voor smeltloos gerecycleerd aluminium in Europa bestaat uit 3 stappen. De eerste stap is een opdeling van de eindtoepassingen van aluminium in categorieën en een kwantificatie van het volume in elk van deze categorieën. De categorieën worden verder opgesplitst in eindtoepassingen. De volgende stap is een onderzoek naar de belangrijkste eigenschappen van aluminium voor het gebruik in elk van deze eindtoepassingen. Tenslotte volgt er een beoordeling, op basis van de literatuurstudie, of smeltloze recyclageprocessen kunnen tegemoetkomen aan de vraag naar eigenschappen in elk van de opgelijste eindtoepassingen. Daaruit volgen drie zaken :

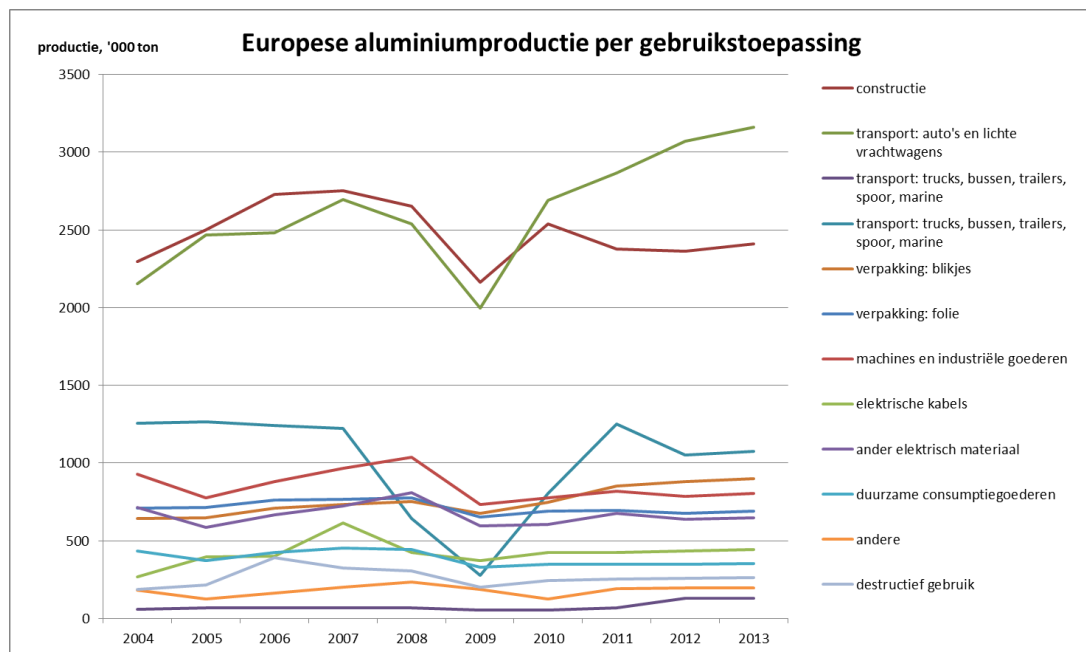
1. Een schatting van het percentage van het aluminiumgebruik in Europa waarvoor smeltloos gerecycleerd aluminium mogelijk een grondstof kan zijn.

2. Een aanbeveling voor verder onderzoek naar eigenschappen van smeltloos gerecycleerd aluminium om het aantal mogelijke toepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium te vergroten.
3. Een aanbeveling met de eindtoepassingen die geschikt zijn voor de opstart van het gebruik van smeltloos gerecycleerd aluminium.

Met die laatste aanbeveling als basis wordt vervolgens de Belgische markt onder de loep genomen.

### 3.1.1 Evolutie van het aluminiumgebruik in Europa

Het International Aluminium Institute (IAA) publiceert jaarlijkse data over aluminiumproductie en recyclage in Europa (Bertram, 2014). De totale aluminiumproductie in Europa bedroeg 11,08 miljoen ton in 2014. Figuur 7, gebaseerd op deze data, geeft de evolutie over de afgelopen tien jaar weer van de productie van aluminium in Europa onderverdeeld per categorie van eindtoepassing.



**Figuur 7: Evolutie van de Europese aluminiumproductie tussen 2004 en 2013**

In totaal verdeelt het IAA de eindtoepassingen van aluminium op in 12 categorieën. Deze categorieën zijn te breed om rechtstreeks bruikbaar te zijn voor het bepalen van de nodige eigenschappen per categorie. Wel geven ze reeds een goede indicatie van de evolutie en het belang van elk van de toepassingen van aluminium.

Veruit de belangrijkste toepassing voor aluminium is in transport. Auto's en lichte vrachtwagens alleen gebruikten in 2014 28% van het geproduceerde aluminium. Daarbij komt nog het gebruik van aluminium in trucks, bussen, treinen, schepen en vliegtuigen. Auto's en lichte vrachtwagens zijn niet alleen de grootste categorie, het is ook de enige die de afgelopen tien jaar sterk steeg in volume. De totale stijging in

aluminiumproductie in de afgelopen tien jaar van 1244kton is bijna volledig toe te schrijven aan deze stijging in het aluminiumgebruik in auto's en lichte vrachtwagens, een stijging van 1006kton. Omdat toepassingen in auto's zo snel groeien zal veel aandacht gegeven worden aan het mogelijke potentieel van smeltloos gerecycleerd aluminium in auto's. De European Aluminium Association verduidelijkt dat de belangrijkste reden voor dit toenemend gebruik van aluminium in auto's de lagere brandstofconsumptie als gevolg van lichtgewicht ontwerp is. Er is nog steeds veel potentieel om dit lichtgewicht ontwerp via aluminium verder te maximaliseren in auto's (EAA 2010). Ducker Research schat dat de hoeveelheid aluminium in Europese auto's tegen 2020 met 20% zal stijgen tegenover 2015 (Ducker Research, 2012). Het gebruik van aluminium gietstukken in de verbrandingsmotor van auto's daarentegen zal dalen indien de opkomst van elektrische wagens zich voortzet (Hatayama et al., 2012).

De tweede grote categorie naast transport, met 22% van het totale gebruik, is constructie. Het potentieel van smeltloos gerecycleerd aluminium in constructie is dus ook zeer belangrijk om te onderzoeken. De andere applicaties zijn allemaal veel kleiner en bestaan uit verpakking, machines, industriële goederen, elektrische applicaties, consumentengoederen en destructief gebruik.

### 3.1.2 Gecombineerd model van de eindtoepassingen van aluminium in Europa

De informatie uit Sectie 3.1.1 is niet voldoende om een beeld te vormen van de eindtoepassingen waarin smeltloos gerecycleerd aluminium bruikbaar is. Meer precieze opdelingen, vooral voor de belangrijkste categorieën, dringen zich op. Tabel 2 stelt een gecombineerd model voor dat alle categorieën preciezer opdeelt. De databronnen en assumpties gemaakt om deze tabel samen te stellen worden hieronder besproken.

Tabel 2 deelt de eindtoepassingen van aluminium in Europa op in categorieën, subcategorieën en finaal de specifieke eindtoepassingen. Aan elke categorie en subcategorie is ook de totale jaarlijkse productie van aluminium voor die toepassing gekoppeld, als percentage van de totale jaarlijkse aluminiumproductie in Europa. Waar mogelijk is deze hoeveelheid ook voor de specifieke eindtoepassingen gedetailleerd. De categorieën zijn een zelfgemaakte logische groepering van de verschillende subcategorieën, grotendeels gebaseerd op de opdeling die het IAA maakt (Bertram, 2014). De classificatie en kwantificatie van de subcategorieën en eindtoepassingen in de tabel zijn samengesteld op basis van verschillende bronnen.

De categorie transport is verder opgedeeld in vijf subcategorieën: auto's & lichte vrachtwagens, truck & bus, schepen, spoorvoertuigen en vliegtuigen. Voor auto's & lichte vrachtwagens en voor vliegtuigen is het aandeel in het totaal overgenomen van de data van het IAA (Bertram, 2014). De kwantificatie van de andere subcategorieën in transport, waar het IAA enkel een aggregaat van geeft, is gebaseerd op een studie van Cooper en Allwood (2012). Deze studie geeft de opdeling op wereldniveau. De hier gemaakte assumptie is dat deze studie de opdeling op Europees niveau goed benadert.

Categorie	Subcategorie	Mt	% van totaal	Eindtoepassing	% van subcategorie	% van totaal	Meest gebruikte legering
Transport	Auto's & lichte vrachtwagens	3,2	28%	Motorblok	31,1%	8,8%	AA356
				Transmissiebehuizing	12,6%	3,6%	AA380
				Onderstel, ophanging, stuurinrichting	13,2%	3,8%	AA6053
				Wielen en reservewiel	17,8%	5,1%	AA356
				Warmtewisselaar	9,5%	2,7%	
				Remmen	2,9%	0,8%	
				Deuren en sluitingen	3,7%	1,0%	AA5xxx/AA6xxx
				Chassis, koetswerk & IP balk	2,6%	0,7%	AA5xxx/AA6xxx
				Hitteschild	1,2%	0,4%	AA1xxx/AA3xxx/AA5xxx
				Bumper	2,6%	0,7%	AA6xxx/AA7xxx
				Andere componenten	3,0%	0,9%	
	Truck & bus	0,6	5%	Cabinestructuur & koetswerk			AA5xxx/AA6xxx
				Onderstel, ophanging			
				Laadbak kiepwagen			
			Tank tankwagen				
Schepen	0,4	4%	Jacht			AA5083	
			Superstructuur cruiseschip	60,0%	2,4%		
			Superstructuur ferry				
Spoorvoertuigen	0,1	1%	Extrusieframe goederenwagon			AA5083/6061	
			Beplating goederenwagon			5xxx/AA6061	
			Sneltreinen				
			Trams en metrostellen				

Categorie	Subcategorie	Mt	% van totaal	Eindtoepassing	% van subcategorie	% van totaal	Meest gebruikte legering
Transport (vervolg)	Vliegtuigen	0,1	1%	Bovenste vleugel huid			AA7055/AA7449/AA7050
				Onderste vleugel huid			AA2024
				Vleugelligger			AA7075
				Interne frames, verstijvingen			AA7075
				Rompbedekking			AA2024 /AA7475
Constructie	Gebouwen	2,4	22%	Ramen en deuren	27,0%	5,9%	AA6060/AA6063
				Gordijngevels	18,0%	4,0%	AA6060/AA6063
				Gevelbekleding en dakwerk	37,0%	8,1%	AA3003/AA5005
				Andere	18,0%	4,0%	
Industriële goederen	Elektrisch materiaal	0,6	6%	Elektrische leiding			AA6063
				Beschermende mantel kabel			Alclad 5056
				Rail, busbar			1xxx
	Elektrische kabels	0,4	4%	Kabel rond stalen kern	100%	4,0%	AA1350-H19
	Andere	0,8	7%	Warmtewisselaar			1xxx/3xxx
Verpakking	Blikjes	0,9	8%			8,0%	AA3104/ lid AA5182
	Folie	0,7	6%			6,0%	AA8011
Andere	Deestructief gebruik	0,3	2%	Deoxidatie van staal			
	Duurzame consumptiegoederen	0,4	3%	Koelkast / diepvriezer panelen	15,0%	0,4%	AA3003 / AA3103
				Koelkast warmtewisselaar			AA5754
				Wasmachine panelen	15,0%	0,5%	AA5754
Andere	0,2	2%	Poeder	50,0%	1,0%		
			Lithografische plaat	25,0%	0,5%	1xxx/3xxx	

**Tabel2: Gecombineerd model van de eindtoepassingen van aluminium in Europa**

Een verdere opdeling per specifieke eindtoepassing is vooral wenselijk voor auto's en lichte vrachtwagens, de grootste eindtoepassing die bestaat uit heel wat verschillende aluminium componenten. Bertram et al. (2009) delen de aluminiumcontent in Europese auto's op per component voor auto's geproduceerd in het jaar 2006. Ducker worldwide LLC, een marktstudiebureau, geven de toename tussen 2006 en 2012 van deze hoeveelheid per component voor de gemiddelde Europese auto (Ducker Research, 2012). Combineren van beide bronnen geeft de meest recente gekende opdeling van de hoeveelheid aluminium in auto's. Voor de overige transporttoepassingen zijn wel een aantal veelgebruikte eindtoepassingen gespecificeerd, maar niet gekwantificeerd.

Voor alle andere toepassingen is de kwantificatie van de subcategorieën overgenomen van de data van het IAA (Bertram, 2014). De kwantificatie van de eindtoepassingen zijn alle gebaseerd op de studie van Cooper en Allwood (2012) of op het boek 'With both eyes open', ook geschreven door Allwood (2012). Hierbij is dezelfde assumptie, dat het wereldgebruik het Europees gebruik weerspiegelt, gehanteerd.

### 3.1.3 Toepassingen van aluminium : kunnen smeltloze recyclagetechnieken de benodigde eigenschappen leveren?

Nu het totale aluminiumgebruik in Europa is opgedeeld per eindtoepassing, resten er twee zaken. Eerst de ophijsting van de belangrijkste eigenschappen die elk van de eindtoepassingen vraagt. Vervolgens een beoordeling, op basis van de eerdere literatuurstudie, naar de mogelijkheid van smeltloze recyclageprocessen om deze eigenschappen te bekomen. Deze ophijsting en beoordeling is opgenomen in Appendix 1. Tabel 3 vat de conclusies van deze beoordeling samen. Het lijst de eindtoepassingen op die mogelijk geschikt zijn voor smeltloze recyclagetechnieken, samen met hun respectievelijke nodige eigenschappen.

### 3.1.4 Totale potentiële vraag naar smeltloos gerecycleerd aluminium in Europa

Tabel 3 lijst de eindtoepassingen van aluminium op die het potentieel hebben met smeltloze recyclagetechnieken geproduceerd te worden indien smeltloze recyclage kan tegemoetkomen aan de gevraagde eigenschappen van aluminium in die toepassing. Toepassingen met eisen waar smeltloze recyclagetechnieken zeker niet aan tegemoet kunnen komen zijn niet opgenomen. Bij elke eindtoepassing zijn ook de belangrijkste nodige eigenschappen opgelijst. De 'goede' eigenschappen zijn reeds vandaag of met zeer beperkt verder onderzoek mogelijk. Voor de 'onzekere' eigenschappen moet onderzoek uitwijzen of smeltloze recyclagetechnieken deze eigenschappen kunnen leveren. Tot slot vermeldt de tabel het percentage van het totaal aluminiumgebruik in Europa per toepassing.

Eindtoepassing	Eigenschappen : goed	Eigenschappen : onzeker	Mogelijke smeltloze recyclagetechniek	% totaal aluminium gebruik
<b>Transport : auto's en lichte vrachtwagens</b>				
Ophangingsarmen	Sterkte, lichtgewicht	Vermoeiing	(BMA +) Smeden, extrusie, iECAP	1% <sup>(1)</sup>
Luchtvering		Corrosie, gasdichtheid	SPS	
Stuurinrichting	Specifieke sterkte	Impactsterkte, vermoeiing	Extrusie, iECAP	1% <sup>(1)</sup>
Wielen	Esthetisch, specifieke sterkte, stijfheid	Impactsterkte	BMA + smeden, SPS	0,5% <sup>(2)</sup>
Warmtewisselaars		Corrosie, thermische geleidbaarheid, sterkte bij hoge temperatuur	extrusie, rollen, DSR	3%
Remmen	Lichtgewicht, hardheid	Corrosie	SPS	1%
Kofferdeksel	Lichtgewicht	Vervormbaarheid bij fabricatie, oppervlaktekwaliteit	DSR	1%
Vleugels	Stijfheid	Knikweerstand, dynamisch indeuken, oppervlaktekwaliteit, vervormbaarheid bij fabricatie	DSR	
Deuren (frame)	Sterkte, stijfheid	Impactsterkte	Extrusie, iECAP	
Dak en schuifdak	Slijtvastheid, hardheid	Esthetiek, corrosie	DSR	
Openingsmechanisme schuifdak	Slijtvastheid, hardheid	Corrosie	Extrusie, iECAP	
Dakrail		Esthetiek, corrosie	Extrusie, iECAP	
Monocoque chassis	Stijfheid, specifieke sterkte	Veiligheid	Extrusie, iECAP, DSR, SPS	0,75% <sup>(3)</sup>
Achterframe, deurdrempel, langsdrager, A-, B-stijl	Stijfheid, specifieke sterkte	Impactsterkte	Extrusie, iECAP	
IP balk	Stijfheid, specifieke sterkte	Vervormbaarheid bij fabricatie	Extrusie, iECAP, rollen, DSR	
Bumper	Sterkte, ductiliteit	Breuktaaiheid, impactsterkte	iECAP	1%
Frame zetel	Specifieke sterkte		Extrusie, iECAP	0,5% <sup>(4)</sup>
Rail zetel	Hardheid		Extrusie, iECAP	
Behuizing airbag			Extrusie, iECAP	
<b>Transport : truck &amp; bus</b>				



Cabinestructuur	Sterkte, stijfheid		Extrusie, iECAP	5%
Bumper	Sterkte, ductiliteit	Breuktaaiheid	Extrusie, iECAP	
Koetswerk		Corrosie	Extrusie, iECAP, DSR	
Tankwagen		Gasdichtheid, corrosie	DSR	
Laadbak kiepwagen	Specifieke sterkte, hardheid, weerstand slijtage	Corrosie	Extrusie, iECAP, DSR	
Ophangingsarmen	Sterkte, lichtgewicht	Vermoeiing	(BMA +) Smeden, extrusie, iECAP	
<b>Transport : schepen</b>				
Structuur jachten, ferry's, cruiseschepen	Specifieke sterkte, hardheid	Corrosie, vermoeiing	Extrusie, iECAP, rollen, DSR	4% <sup>(5)</sup>
<b>Transport : vliegtuigen</b>				
Zetel tracks	Specifieke sterkte	Corrosie	Extrusie, iECAP	0,05% <sup>(6)</sup>
Cargo tracks	Specifieke sterkte, stijfheid		Extrusie, iECAP	
Vloerbalken	Specifieke sterkte	Corrosie	Extrusie, iECAP	
<b>Transport : spoorvoertuigen</b>				
Goederenwagon	Specifieke sterkte, hardheid	Corrosie, vermoeiing	Extrusie, iECAP, rollen, DSR	1% <sup>(5)</sup>
Extrusieprofielen TGV en metro	Specifieke sterkte, stijfheid	Corrosie, vermoeiing	Extrusie, iECAP	
<b>Constructie</b>				
Raamprofielen	Sterkte, lage warmtegeleidbaarheid, Duurzaamheid	Corrosie, esthetiek	Extrusie, iECAP	6%
Gordijngevels	Specifieke sterkte, stijfheid, duurzaamheid	Corrosie, esthetiek, sterkte tegen dynamische belasting	Extrusie, iECAP	4%
Gevelbekleding en dakwerk	Sterkte, stijfheid, vuurbestendig, isolerend, duurzaamheid	Corrosie, esthetiek	Rollen, DSR	8%
Binnentoepassingen : rolgordijnen, trappen, trapeuningen, tussenwanden,	Sterkte, stijfheid, hardheid		Extrusie, iECAP, SPS	1% <sup>(7)</sup>

inkommatten				
<b>Industriële goederen</b>				
Elektrische leidingen	Sterkte, stijfheid, lichtgewicht, niet-magnetisch,	Corrosie	Extrusie, iECAP	2% <sup>(8)</sup>
Busbars		Corrosie, elektrische geleidbaarheid, veiligheid		2% <sup>(8)</sup>
Beschermmantel kabel	Sterkte, stijfheid	Corrosie	Extrusie, iECAP, wrijvingsroerextrusie	2% <sup>(8)</sup>
<b>Verpakking</b>				
Drankblikjes	Sterkte, stijfheid	Mechanische eigenschappen, ductiliteit en oppervlaktekwaliteit bij geringe dikte, inert binnenoppervlak	iECAP	8%
<b>Andere toepassingen</b>				
Buiten- en binnenpaneel koelkast	Bescherming	Corrosie, esthetiek	Rollen, DSR	0,5%
Buitenpaneel wasmachine	Bescherming	Corrosie, esthetiek	Rollen, DSR	0,5%
Poeder	Microstructurele eigenschappen		Andere technieken	1%

**Tabel 3: Potentiele eindtoepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium**

- (1) het totaal van chassis, suspensie en stuurinrichting is 4% van het totaal aluminiumgebruik en de assumptie is dat ophangingsarmen en de stuurinrichting de helft van dat totaal bevatten.
- (2) assumptie : 10% van de aluminium wielen zijn smeedstukken
- (3) assumptie : 25% van aluminium koetswerk en IP balken bestaan uit gietstukken en kunnen dus niet met SSR
- (4) deze toepassingen omvatten de helft van al het gebruik van 'overige toepassingen' in auto's.
- (5) assumptie : al het aluminium in treinen en schepen heeft het potentieel om door smeltloos gerecycleerd aluminium vervangen te worden
- (6) assumptie : deze binnenmaterialen maken 5% van de totale aluminiummassa in een vliegtuig uit
- (7) assumptie : 25% van alle overige toepassingen in constructie zijn binnentoepassingen
- (8) assumptie: alle toepassingen van industriële goederen komen evenveel voor

Onderzoek naar alle nog onzekere eigenschappen is zeer veel werk. In de volgende paragrafen wordt eerst de link tussen gevraagde eigenschappen en smeltloos gerecycleerd aluminium per categorie samengevat. Daaruit geïdentificeerde veelgevraagde eigenschappen en de nog openstaande onderzoeksvragen in verband met die eigenschappen bieden een aanbeveling voor de prioritering van het onderzoek naar smeltloze recyclage.

De eerste reden om aluminium te gebruiken in **transporttoepassingen** is het lichtgewicht ontwerp dat mogelijk is met aluminium, resulterend in lagere brandstofkosten en een lagere uitstoot van broeikasgassen. Smeltloze recyclage-technieken, met hun hoge specifieke sterkte, kunnen dit lichtgewicht ontwerp verzekeren. Daarnaast is het in transporttoepassingen zeer belangrijk dat de veiligheid van de passagiers en bestuurders gewaarborgd is. Auto's worden gedimensioneerd op impactweerstand onder de piekbelasting van een crash. Ook de vermoeiingsweerstand is van belang. Bij spoorvoertuigen is de vermoeiingsweerstand onder dynamische trillingen nog belangrijker en bij vliegtuigen is dat de voornaamste ontwerpparameter. Omwille van deze hoge veiligheidseisen zal de transportsector eerst bewijs willen zien van de werking van smeltloos gerecycleerd aluminium in andere toepassingen voor zelf te overwegen om het te gebruiken. Een laatste belangrijke vereiste voor het transport is de duurzaamheid en corrosiebestendigheid van voertuigen. Zeker voor schepen, goederenwagens en vliegtuigen is dit van primair belang. De oppervlaktekwaliteit is niet alleen belangrijk voor deze duurzaamheid, maar ook vanuit esthetisch oogpunt. Minder veiligheids- en duurzaamheidskritieke toepassingen zijn interieurtoepassingen, zoals de frames van autozetels of de rails voor cargo of passagierszetels in vliegtuigen. Dit zijn de toepassingen waarmee smeltloos gerecycleerd aluminium ingang kan vinden in de transportsector.

De benodigde eigenschappen van aluminium in de constructiesector zijn zeer homogeen. Ramen en deuren, gevelbekleding en dakwerk, en gordijngevels maken 80% van alle toepassingen van aluminium in de **constructiesector** uit. Meestal zijn dit

extrusieprofielen van de 6xxx legeringen. Het gaat niet om structureel dragende toepassingen maar ze moeten wel voldoende sterkte en stijfheid bezitten, voor veiligheid tegen bijvoorbeeld inbraak of om hun eigengewicht te dragen. Daarnaast moeten ze, omwille van de lange gebruiksduur, duurzaam zijn en goed bestand tegen corrosie. Om deze reden moet het mogelijk zijn ze te lakken of anodiseren. Aangezien het meestal visuele buitentoepassingen zijn is de esthetische oppervlaktekwaliteit ook van belang. Voor binnentoepassingen zijn de vereisten voor corrosieweerstand minder belangrijk.

De **industriële goederen** die mogelijks met smeltloos gerecycleerd aluminium geproduceerd kunnen worden dienen vooral ter bescherming van elektrische kabels. Sterkte en stijfheid zijn daarom het hoofdcriterium, daarnaast is corrosieweerstand belangrijk. Voor sommige toepassingen is warmtegeleidbaarheid (warmtewisselaars) of elektrische geleidbaarheid (busbars) belangrijk.

Aluminium **verpakking**, vooral drankblikjes en folies, stelt hoge eisen, zowel op mechanisch vlak als op voedselveiligheidsvlak. De zeer dunne en ductiele folies lijken moeilijk te maken met smeltloze recyclagetechnieken. Drankblikjes kunnen mogelijk zijn indien de kwaliteit van de zeer dunne wanden homogeen genoeg is om de nodige sterkte, stijfheid en ductiliteit te leveren. Daarnaast moet de oppervlaktekwaliteit goed genoeg zijn om een inert binnenoppervlak voor het contact met voeding en een bedrukbaar buitenoppervlak te verzekeren.

Enkele **andere toepassingen** van aluminium zijn mogelijk geschikt voor het gebruik van smeltloze recyclagetechnieken. De aluminium behuizing van duurzame consumptiegoederen, voornamelijk koelkasten en wasmachines, dient voor bescherming van de binnenkant. Ze moet corrosiebestendig zijn en een esthetische oppervlaktekwaliteit hebben. Poeders kunnen rechtstreeks uit spanen gemaakt worden door ze te vermalen. Dit valt echter buiten het bestek van deze master thesis.

Onder deze toepassingen zijn er geen gevonden waar smeltloos gerecycleerd aluminium een specifieke meerwaarde biedt tegenover primair aluminium. Om smeltloze recyclage te doen slagen in de transportsector, stellen zich nog enkele vragen naar de vermoeiingsweerstand, corrosieweerstand en impactsterkte. Ook voor de constructiesector stelt zich de vraag naar de corrosieweerstand en de esthetische oppervlaktekwaliteit. Voor toepassing in industriële goederen stelt zich de vraag naar de warmte- en elektrische geleidbaarheid. In het algemeen is ook de vervormbaarheid voor veel toepassingen nog een belangrijke onzekere eigenschap.

#### *Vervormbaarheid*

Chino et al. (2004) ondervonden een verschillende vervormbaarheid bij smeltloos gerecycleerde aluminium spanen van 3 verschillende groottes. Tijdens een blaasvormingstest breekt het gerecycleerde plaatje op basis van de kleinste spanen alvorens de gewenste bolle vorm te krijgen. De gerecycleerde plaatjes van grotere spanen bereiken daarentegen wel de gewenste vorm. Ze schrijven dit toe aan de

grotere oppervlakte/ volumeverhouding en het resulterende hogere oxidegehalte van de kleine spanen. De minimale nodige spaandimensies voor smeltloos gerecycleerd aluminium om voldoende vervormbaar te zijn voor de meeste toepassingen is een openstaande onderzoeksvraag die mogelijk het aanbod aan geschikt verspaningsafval beperkt.

#### *Vermoeiingsweerstand*

Chino et al. onderzochten de vermoeiingsweerstand van magnesiumspanen gerecycleerd via warmextrusie (2006). De vermoeiingsweerstand is ongeveer 10% slechter dan bij primair magnesium door de oxides waar gemakkelijk barstjes rond vormen. Onder de behandelde papers zijn er geen die dit reeds voor aluminium onderzocht hebben. Indien de oxides inderdaad de slechtere vermoeiingsweerstand veroorzaken, vormt zich de hypothese dat ook de vermoeiingsweerstand van smeltloos gerecycleerde aluminium spanen slechter is dan bij primair aluminium. Dit zou betekenen dat vermoeiingsweerstand een limiterende eigenschap is in transporttoepassingen. Experimenteel onderzoek moet deze hypothese bevestigen.

#### *Impactsterkte*

Impactsterkte is van belang voor toepassing van aluminium in auto's. Deze eigenschap is nog niet onderzocht. Op basis van het hogere oxidegehalte in smeltloos gerecycleerd aluminium is de hypothese dat die lager is dan bij primair aluminium. Onderzoek moet deze hypothese verifiëren.

#### *Corrosieweerstand*

Chino et al. bemerkten een slechtere corrosieweerstand bij via warmextrusie gerecycleerde aluminium AA5083 spanen vergeleken met een primaire referentielegering (2003). Het hogere gehalte aan ijzerdeeltjes, veroorzaakt door contaminatie van snijgereedschappen, leidt tot galvanische corrosie. Bij het smeltloos recycleren via warmextrusie van een magnesium AZ31 legering echter, is de weerstand tegen corrosie beter dan bij een referentielegering (Chino et al., 2006). De auteurs stellen dat de oxides op het oppervlak een beschermende laag tegen corrosie vormen. Ook Zhang et al. bekomen een betere weerstand tegen corrosie voor een smeltloos gerecycleerde magnesium AZ31 legering (2011). Miao et al. besluiten dat een via warmextrusie gerecycleerde magnesium GW102K legering een even goede weerstand tegen corrosie heeft als de referentie wanneer ze geëxtrudeerd is op 450°C (2013). Bij extrusie aan een lagere temperatuur is de weerstand tegen corrosie minder goed. Een éénduidig besluit over de corrosieweerstand kan niet genomen worden op basis van de beschikbare literatuur. Aangezien corrosieweerstand voor bijna alle toepassingen van aluminium van belang is, is de corrosieweerstand van smeltloos gerecycleerd aluminium dus een belangrijke openstaande onderzoeksvraag.

#### *Esthetische oppervlaktekwaliteit*

De onzuiverheden en oxides in smeltloos gerecycleerd aluminium maakt dat het oppervlak potentieel niet even esthetisch is als primair aluminium. Tekkaya et al. behaalden een goede oppervlaktekwaliteit na warmextrusie van AA6061 spanen (2009). Toch zijn strepen in de extrusierichting zichtbaar. Of dit echt een probleem is hangt af van de visuele eisen van de klant. Differentieel snelheidswalsten leidt tot een esthetisch goede oppervlaktekwaliteit van smeltloos gerecycleerde plaatmateriaal omdat deze methode de oxides sterk breekt (Suzuki et al., 2007). De ASSuRe extrusietest moet aantonen of de oppervlaktekwaliteit van smeltloos gerecycleerde profielen op industriële schaal goed is.

#### *Warmte- en elektrische geleidbaarheid*

De warmte- en elektrische geleidbaarheid van smeltloos gerecycleerd aluminium is in geen van de behandelde papers onderzocht. Elektrische geleidbaarheid is afhankelijk van de zuiverheid van het aluminium. Het meeste verspaningsafval komt van aluminiumlegeringen en bevat potentieel contaminaties, het is dus niet zeer zuiver. Op basis van deze informatie volgt de hypothese dat smeltloos gerecycleerd aluminium niet erg geschikt is voor toepassingen die een grote elektrische geleidbaarheid vragen. Experimenten zijn nodig om deze hypothese te verifiëren. Warmtegeleidbaarheid en elektrische geleidbaarheid zijn sterk gecorreleerd bij metalen (Alumatter, 2001a). Dezelfde conclusies gelden dus voor de warmtegeleidbaarheid van smeltloos gerecycleerd aluminium.

Met deze informatie over openstaande onderzoeksvragen die vanuit de markt vraag geïdentificeerd zijn, kan de geschiktheid van toepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium bijgesteld worden. Voor toepassing in de transportsector, moeten nog vele eigenschappen onderzocht worden. Toepassing in de andere grote categorie daarentegen, constructie, vereist enkel nog het onderzoek naar de corrosieweerstand en esthetische oppervlaktekwaliteit. Meer bepaald is het zo dat wanneer deze twee eigenschappen met zekerheid kunnen bereikt worden door smeltloos gerecycleerd aluminium, 27,5% van alle eindtoepassingen van aluminium gebruik kunnen maken van smeltloos gerecycleerd aluminium (percentage berekend door het samentellen van de eindtoepassingen uit Tabel 3 waarvoor enkel corrosie en esthetiek een onzekere factor zijn). Dit komt overeen met 3 miljoen ton per jaar in Europa.

Die constructietoepassingen zijn meestal extrusieprofielen. Om smeltloos gerecycleerd aluminium te laten doorbreken is het daarom aangewezen om enkele specifieke toepassingen in constructie in samenwerking tussen kennisinstellingen en bedrijven uit te werken. Daarnaast kunnen enkele niet veiligheidskritieke interieurtoepassingen uit de transportsector uitgewerkt worden, om op langere termijn het gebruik van smeltloos gerecycleerd aluminium in transport te laten doorbreken. Deze meest interessante toepassingen voor directe uitwerking zijn in het groen aangegeven in Tabel 3.

### 3.1.5 Potentiele eindtoepassing voor aluminium gerecycleerd door ASSuRe

De bedrijven Vasco en Wuyts nemen deel aan het ASSuRe project in de rol van spaanproducent en potentiële eindgebruiker van smeltloos gerecycleerd aluminium. Deze beoordeelt eerst kort de geschiktheid van beide bedrijven voor eindtoepassing van smeltloos gerecycleerd aluminium op basis van de eigenschappen die ze nodig hebben. Vervolgens wordt de kijk op potentiele eindtoepassingen verbreed.

Vasco is producent van radiatoren. De nodige eigenschappen voor radiatoren zijn een goede warmtegeleidbaarheid, een goede vervormbaarheid bij fabricatie, een goede corrosieweerstand en een esthetische oppervlaktekwaliteit. Rond al deze eigenschappen zijn er nog openstaande onderzoeksvragen (Sectie 3.1.4). Op basis van deze nodige eigenschappen lijkt Vasco voorlopig geen geschikte afnemer voor smeltloos gerecycleerde profielen.

Wuyts gevelbouw is een familiebedrijf dat aluminium bewerkt tot ramen, deuren, gordijngevels, straatmeubilair of op maat gemaakte toepassingen. Straatmeubilair omvat onder andere bushokjes, fietsenrekken, verkeersborden, hekwerk en banken. De geïdentificeerde beloftevolle categorie constructie is precies wat ze doen. Daarnaast behoren ze met hun maatwerk, veelzijdige toepassingen en lage productieaantallen precies tot het soort bedrijven die geschikt zijn om eerste toepassingen op kleinere schaal uit te testen. Zowel profielen gerecycleerd via warmextrusie als near-net-shape producten gerecycleerd via vonkplasma-sinteren, bijvoorbeeld voor voetstukken van bushokjes, kunnen mogelijk een toepassing vinden bij Wuyts.

Binnen de constructietoepassingen zijn binnentoepassingen een logische eerste stap in de zoektocht naar toepassingen voor ASSuRe smeltloos gerecycleerd aluminium. Binnentoepassingen in de bouwsector vereisen profielen met goede mechanische eigenschappen maar hebben geen nood aan een goede corrosieweerstand. Bovendien kan in de milieubewuste bouwsector het gebruik van smeltloos gerecycleerd aluminium klanten overtuigen om voor het product te kiezen. Van de bedrijven in Tabel 4 is Verimpex de meest interessante mogelijke afnemer, omdat dit bedrijf reeds inkommaten gemaakt uit gerecycleerde vliegtuigbanden in zijn gamma heeft en doelbewust inzet op de circulaire economie.

<b>naam bedrijf</b>	<b>url</b>	<b>Activiteit</b>
AVC	<a href="http://www.avc.eu/">http://www.avc.eu/</a>	Deuren, wanden, trappen
Graah	<a href="http://www.graah.be/">http://www.graah.be/</a>	Design trappen
Mavaro	<a href="http://www.mavaro.be/">http://www.mavaro.be/</a>	O.a. trapleuningen
Goelst	<a href="http://www.goelst.be/">http://www.goelst.be/</a>	Gordijnrails
Verimpex	<a href="http://www.verimpex.be/">http://www.verimpex.be/</a>	Inkommaten

**Tabel 4: Producenten van binnentoepassingen in de bouwsector**

Voor bredere toepassing van smeltloos gerecycleerde profielen in de bouwsector is het nodig om te testen of oppervlaktebehandeling, gebruikelijk in deze toepassing,

mogelijk is op smeltloos gerecycleerde profielen. Bovendien kan oppervlaktebehandeling potentieel een lagere corrosieweerstand of oppervlaktekwaliteit maskeren. In België kunnen vele partners gevonden worden voor het experimenteel uitwerken van mogelijke oppervlaktebehandelingen. De Belgische vereniging voor oppervlaktetechnieken van materialen (VOM) verenigt al deze bedrijven. Qualubel certificeert oppervlaktebehandelaars van aluminium in België.

Niko Bonnyns, zaakvoerder van Alural, een oppervlaktebehandelaar gecertificeerd door Qualubel beoordeelt in een gesprek de mogelijkheden en valkuilen van oppervlaktebehandeling van smeltloos gerecycleerde profielen (2016). Poedercoaten bestaat uit drie hoofdstappen: ontvetten, beitsen en het aanbrengen van de poedercoatlaag. Door het aanpassen van de chemische samenstelling, de temperatuur en de tijd van de beitsstap kan bijna elk substraat een poedercoating krijgen. De beitsstap verwijdert spoorelementen, ijzercontaminaties en oxides aan het oppervlak. De poederlaag beschermt de zuivere oppervlaktelaag vervolgens tegen corrosie. Echter, oppervlaktebehandeling gebeurt in de industriële praktijk steeds voor het op maat zagen van de profielen. Ook eventuele boringen in de profielen gebeuren pas na het poedercoaten. Onbehandelde zaagsnedes en boringen vormen preferentiële plaatsen voor corrosievorming en kunnen alsnog de levensduur van substraatmaterialen met slechte corrosieweerstand verkorten.

Bonnyns vermeldt dat defecten in het materiaal omwille van een slechte oppervlaktekwaliteit, bijvoorbeeld krassen of scheurtjes, zichtbaar blijven na poedercoaten (2016). Dit komt overeen met de vermelding dat oppervlaktefouten ten gevolge van het productieproces zichtbaar blijven na poedercoaten in een brochure over poedercoaten van de VOM (2013). Anodiseren brengt geen beschermende laag aan op het aluminium maar oxideert het aluminiumoppervlak zelf om bescherming te bieden. Bijgevolg is de kwaliteit en kleur na anodisatie zeer gevoelig voor verschillen in legeringssamenstelling of verontreinigingen van het substraat (Bonnyns, 2016).

Op basis van dit gesprek volgt de hypothese dat poedercoaten van smeltloos gerecycleerde profielen mogelijk is maar anodiseren niet. Poedercoaten kan beschermen tegen corrosie, zelfs als smeltloos gerecycleerd aluminium zelf een lage corrosieweerstand heeft. Oppervlakte-defecten kunnen echter niet gemaskerd worden. Deze hypothese dient experimenteel bevestigd te worden om brede toepassing van ASSuRe profielen in de bouwsector mogelijk te maken.

## 3.2 Het aanbod : de beschikbaarheid van verspaningsafval

### 3.2.1 Op Europees niveau

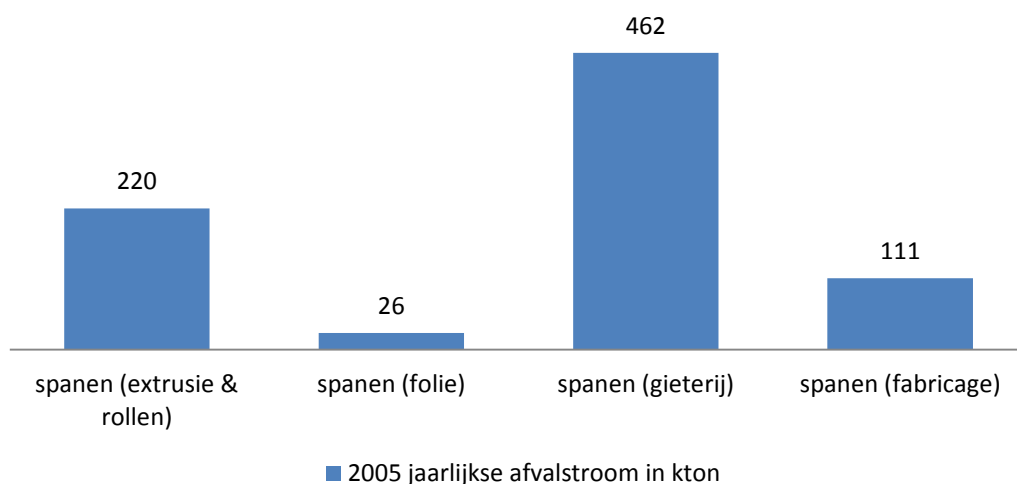
De jaarlijkse hoeveelheid aluminium verspaningsafval geproduceerd in Europa bepaalt het maximale aanbod mogelijk aan materiaal om smeltloos te recycleren. Immers, andere afvalstromen hebben lagere materiaalverliezen bij het hersmelten en



ondervinden dus minder probleem van conventionele recyclagetechnieken. Voor afvalstromen andere dan verspaningsafval is er weinig reden om te investeren in nieuwe, dus meer risicovolle, recyclagetechnieken. Paraskevas et al. vermelden een onderzoek over de hoeveelheid verspaningsafval van Boin en Bertram voor het referentiejaar 2002 (2014). Met 18% van de totale hoeveelheid 'nieuw aluminium afval' is verspaningsafval een aanzienlijke afvalfractie. De term 'nieuw aluminium afval' (new scrap), duidt op afval gegenereerd tijdens de productie, het gaat dus niet om afval na gebruik, zoals bijvoorbeeld lege drankblikjes.

Voor de kwantificatie van deze hoeveelheid zijn meer recente cijfers gewenst. De meest recente gevonden studie is een rapport van de EAA uit 2008, met data van 2005 (EAA,2008). In de meer recente updates van dit rapport zijn de desbetreffende cijfers niet geüpdatet. Verspaningsafval is gedefinieerd als spanen, draaisel en zaagsel (chips, turnings and cuttings). Het is niet duidelijk of ander fijn industrieel afval, waaronder afval van het ponsen of lasersnijden, is opgenomen in deze cijfers. In deze thesis is verondersteld dat al dit fijn industrieel afval in de categorie verspaningsafval is opgenomen. Indien dit niet het geval is, is de beschikbare hoeveelheid afval geschikt voor smeltloze recycling groter dan hier berekend.

Dit rapport vermeldt een totale hoeveelheid van 5,5 miljoen ton aluminium afval geproduceerd in Europa in 2005. Daarvan is 3,13 miljoen ton, of 57%, 'nieuw aluminium afval'. Van dat 'nieuw aluminium afval' is 0,82 miljoen ton, of 26%, verspaningsafval. In feite noemen ze dit 'turnings' (draaispanen). Verderop echter vermeldt de EAA dat hun term 'turnings' overeenkomt met alle soorten spanen. De cijferkwaliteit komt goed overeen met de Europese massabalans van het IAA (Bertram, 2014). De verdere opdeling door het EAA van deze afvalfractie spanen geeft een meer genuanceerd beeld(Figuur 8).



**Figuur 8: Samenstelling Europees verspaningsafval**

Van al het verspaningsafval is meer dan de helft afkomstig uit gieterijen. Het gaat dus grotendeels om gietlegeringen, die een hoog gehalte aan legeringselementen bevatten en niet de focus zijn van smeltloze recyclagetechnieken. Deze hooggeleerde legeringen zijn immers meestal enkel geschikt voor gieten en niet voor bijvoorbeeld warmextrusie. Extrusielegeringen hebben immers striktere toleranties voor legeringselementen (Paraskevas, 2015). Na het weglaten van dit verspaningsafval afkomstig uit gieterijen blijft nog slechts 11% van al het 'nieuw aluminium afval' over als maximale aanbod om smeltloos te recycleren in Europa. Dit komt neer op 331kton bruikbaar verspaningsafval per jaar.

### 3.2.2 Op Belgisch niveau

Een materialenscan uitgevoerd door project partner Sirris bij Vasco en Wuyts geeft zicht op de afvalstromen van beide bedrijven. De materialenscan is een instrument om zicht te krijgen op het materialenverbruik en de daarmee gepaard gaande kost bij een bedrijf (OVAM, 2015). Vasco verwerkt 325ton aluminium per jaar, waarvan 3,27ton, of 1%, verspaningsafval wordt. Dit verspaningsafval bestaat bijna uitsluitend uit spanen van de AA6060 legering. Wuyts verwerkt 84,5ton aluminium per jaar, waarvan 1,5ton, of 2%, verspaningsafval wordt. Dit verspaningsafval bestaat uit spanen van een AlMg3 legering.

Bij veronderstelling dat de situatie van Vasco en Wuyts representatief is voor productiebedrijven van aluminium producten voor de bouwsector blijkt dat deze bedrijven slechts een zeer kleine fractie materiaal verspanen. Zeer veel toeleveranciers uit de bouwsector of grote bouwbedrijven zijn nodig om een aanzienlijke fractie spanen om te recycleren te bekomen.

Helmut De Roovere van Robojob, een bedrijf dat automatische laadsystemen voor verspaningsmachines bouwt, verduidelijkt de situatie van Belgische bedrijven die wel veel aluminium verspanen (2016). Toeleveringsbedrijven die grote hoeveelheden aluminium verspanen werken meestal met vele verschillende legeringen. Het verspaningsafval wordt niet gescheiden per legering. Immers, dat betekent dat per productiewissel de machine volledig moet leeggemaakt en gereinigd worden. Bij Aluro CNC, zusterbedrijf van Robojob, heeft elke machine 1 tot 5 productiewissels per dag. Scheiden van spanen per legering leidt dus tot grote productiviteitsverliezen. De Roovere gelooft dat deze situatie representatief is voor alle verspanende toeleveringsbedrijven die zij als klant hebben. Uitzondering daarop zijn toeleveranciers voor de vliegtuigbouw. Bedrijven zoals SABCA en ASCO verspanen zeer grote hoeveelheden materiaal van éénzelfde legering (De Roovere, 2016).

## 3.3 Conclusie

Op basis van een vergelijking tussen de nodige eigenschappen voor aluminium eindtoepassingen en de eigenschappen die smeltloos gerecycleerd aluminium kan

bieden, is bepaald welke eindtoepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium het meest potentieel hebben. De constructiesector is het meest geschikt. Profielen voor ramen, deuren en gordijngelvels zijn waarschijnlijk een geschikte toepassing voor aluminium verspaningsafval gerecycleerd via warmextrusie. Verspaningsafval gerecycleerd via differentieel snelheidsrollen kan mogelijk een toepassing vinden in platen voor de constructiesector. Vonkplasmasinteren kan mogelijk spanen recycleren tot voetstukken en diverse andere producten gebruikt in constructie. Een tweede geschikte categorie eindtoepassingen zijn toepassingen in de transportsector, vooral niet structurele en niet veiligheidskritieke componenten. Een voorbeeld hiervan zijn profieltjes voor zetelbevestiging in auto's.

Vanuit de marktvrage zijn prioritaire onderzoeksvragen in verband met de volgende eigenschappen geïdentificeerd: vervormbaarheid, vermoeiingsweerstand, impactsterkte, corrosieweerstand, esthetische oppervlaktekwaliteit en warmte- en elektrische geleidbaarheid. Indien corrosieweerstand en oppervlaktekwaliteit goed zijn of verbeterd kunnen worden met hulp van een oppervlaktebehandeling, is smeltloos gerecycleerd aluminium geschikt voor ongeveer 27,5% van alle eindtoepassingen van aluminium. Dat komt overeen met 3 miljoen ton aluminium per jaar in Europa dat mogelijk gebruik kan maken van smeltloos gerecycleerd aluminium.

Het jaarlijks aanbod aan verspaningsafval in Europa bedraagt 331kton. Dit is veel minder dan de hoeveelheid aluminium nodig om alle geïdentificeerde geschikte toepassingen voor smeltloos gerecycleerd aluminium te produceren. Bijgevolg is het aanbod, en niet de vraag, de limiterende factor om de totale mogelijke impact van het valoriseren van smeltloze recyclage in Europa te kunnen berekenen (Sectie 5.6).

In het ASSuRe project is Wuyts een meer geschikte afnemer voor smeltloos gerecycleerd aluminium dan Vasco. Om smeltloos gerecycleerde profielen breed toepasbaar te maken in de bouwsector moet de mogelijkheid tot oppervlaktebehandeling onderzocht worden. De hypothese is dat poedercoaten mogelijk is maar anodiseren niet. Aan de aanbodzijde verspanen bedrijven uit de bouwsector, zoals Wuyts en Vasco, slechts enkele procenten van de totale hoeveelheid aluminium die ze verwerken. Bedrijven gespecialiseerd in verspanen werken met zeer veel legeringen en productwissels, wat sorteren van de spanen per legering duur en moeilijk maakt. Bedrijven die vliegtuigonderdelen uit aluminium produceren, verspanen wel zeer grote hoeveelheden aluminium van dezelfde legering.

Geen toepassingen waarin smeltloos gerecycleerd aluminium een echte meerwaarde kan bieden ten opzichte van primair aluminium zijn gevonden. Het ontwikkelen van een kost-competitief proces is dus belangrijk.

# Hoofdstuk 4: Het ASSuRe recyclageproces – beschrijving en kost

Het ASSuRe consortium voert een recyclageproces uit dat de smeltloze recyclage via warmextrusie of vonkplasma-sinteren van aluminium spanen op industriële schaal benadert. Het doel is te bewijzen dat het technisch mogelijk is om aluminium spanen op industriële schaal smeltloos te recyclen. Ook moet het project aantonen waar de problemen in het recyclageproces nog zitten om die deelstappen te kunnen verbeteren en zo tot een echt industrieel toepasbaar proces te komen. De inleiding in hoofdstuk 1 beschreef reeds de achtergrondinformatie over de partners van het ASSuRe project.

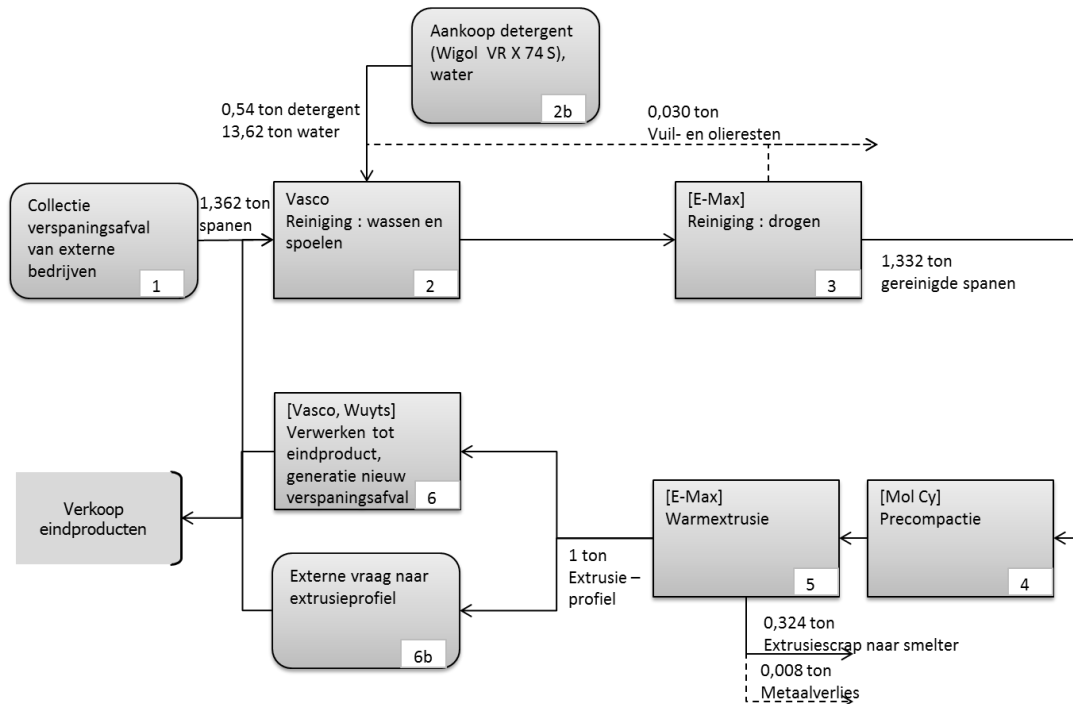
Om deze doelstellingen te behalen is een test uitgevoerd met industriële hoeveelheden spanen, te recyclen tot extrusieprofielen op ware grootte. De gebruikte processen zijn testopstellingen die de werkelijke industriële processen benaderen. Deze thesis heeft niet tot doel de technische details achter deze processen te beschrijven. Wel gebruikt het de procesparameters om een schatting van de operationele kosten en de ecologische impact te kunnen maken.

Dit hoofdstuk geeft eerst een overzicht en massabalans van het ASSuRe proces. Dan volgt een beschrijving en operationele kostenraming van elk deelproces. De kosten zijn onderverdeeld in grondstoffen, arbeid en energie. Kapitaalkost en overhead zijn niet inbegrepen. De totale kostberekening wordt vervolgens vergeleken met de marges die de verschillende bedrijven in het proces hebben. Dit vormt de basis voor verbeteringen in hoofdstuk 6 en 7.

## 4.1 Het ASSuRe recyclageproces : overzicht en massabalans

Figuur 9 geeft het ASSuRe recyclageproces schematisch weer. Stap (1) is de collectie van het verspaningsafval. In de test zijn deze afkomstig van projectpartner Vasco. Op termijn kunnen die ook komen van projectpartner Wuyts of externe bedrijven. Het reinigen van het verspaningsafval door middel van wassen en spoelen is stap (2). Dit gebeurt in een testopstelling bij Vasco waar de spanen met warm water en detergent gemengd worden in betonmolens. Het drogen, stap (3), gebeurt bij E-Max in de

droogoven. Precompactie van de spanen, stap (4), gebeurt bij Mol Cy, een onderaannemer in het project die een geschikte pers ter beschikking heeft voor dergelijke precompactie. Tenslotte gaat de geprecompacteerde billet terug naar E-Max voor warmextrusie, stap (5). Het resulterende extrusieprofiel is een halffabricaat dat in theorie bij projectpartners Vasco en Wuyts verwerkt kan worden tot eindproduct of kan verkocht worden aan externe bedrijven (stap (6,6b)).



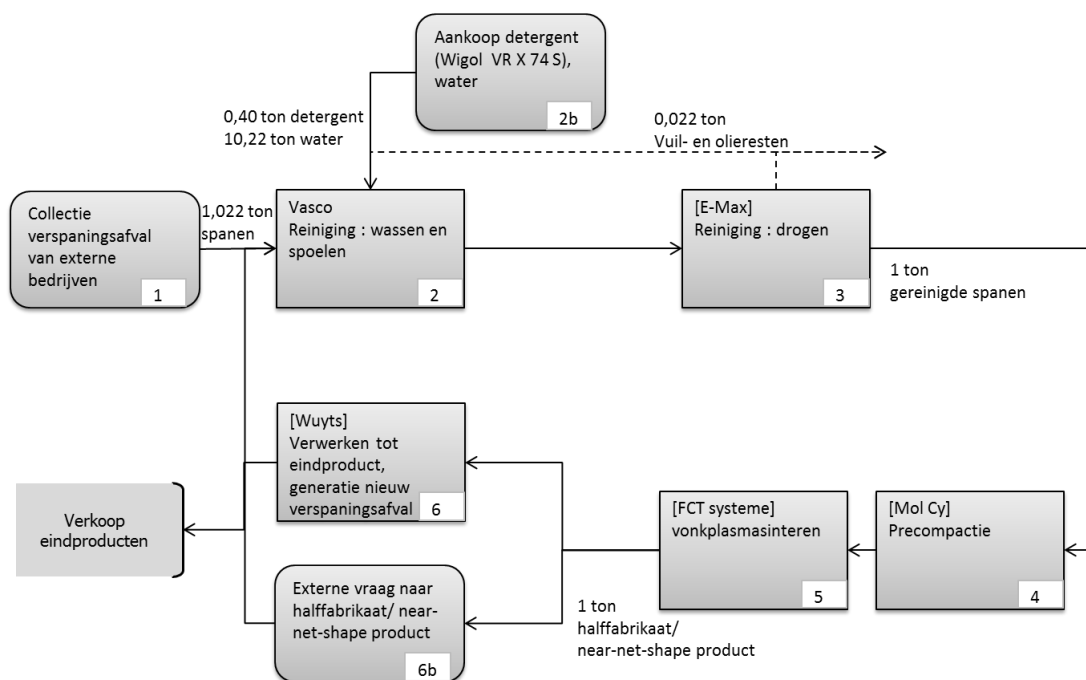
**Figuur 9: schema van het ASSuRe recyclageproces voor 1 ton extrusieprofiel**

#### 4.1.1 Massabalans

Figuur 9 illustreert ook de massabalans tijdens het ASSuRe proces, met 1ton extrusieprofiel als referentieéénheid. Die is best te begrijpen door die in omgekeerde volgorde te doorlopen. Om één ton extrusieprofiel te produceren is gemiddeld 1,332ton aluminium nodig in Europa (EAA, 2013). Daarvan gaat 0,008ton verloren en is 0,324ton extrusiescrap dat direct naar de smeltoven gaat voor hersmelten. Dit extrusiescrap ondervindt veel minder verliezen bij hersmelten dan verspaningsafval en is om deze reden buiten beschouwing gelaten. Er wordt verondersteld dat dit hersmolten wordt, niet dat het opnieuw terechtkomt in het smeltloze recyclageproces. Tijdens het reinigen en drogen van de spanen verliezen de spanen massa. Dit is geen massaverlies aan aluminium, maar massaverlies omdat de verontreinigingen, olies en koelvloeistoffen, verwijderd worden van het spaanoppervlak. Gemiddeld verliezen de vervuilde spanen 2,2% aan massa bij het reinigen (Cui, 2010). In de massabalans van het ASSuRe proces betekent dit een verlies van 0,030ton. Dit betekent dat 1,362ton vervuilde spanen nodig zijn om 1ton profiel te bekomen.

#### 4.1.2 Alternatieve route: vonkplasmasinteren

Het ASSuRe project test ook de industriële opschaling van het consolideren van spanen tot billets of halffabrikaten en near-net-shape producten met vonkplasmasinteren (SPS). De reinigungsstap en precompactiestap zijn gelijk aan het proces met warmextrusie. Vonkplasmasinteren volgt op precompactie om een volledig dense billet te verkrijgen. Hierbij treedt geen materiaalverlies op. Dit verklaart de aangepaste massabalans voor het proces met vonkplasmasinteren (Figuur 10). FCT Systeme, een Duits productiebedrijf dat een industriële installatie met vonkplasmasintering-machines bezit, is de onderaannemer voor de test van vonkplasmasinteren op industriële schaal. Op kleinere schaal zijn de testen uitgevoerd in het departement materiaalkunde van de KU Leuven. Vasco heeft geen toepassingen voor billets of near-net-shape producten, Wuyts daarentegen wel.



**Figuur 10: weergave van het ASSuRe recyclageproces voor 1 ton near-net-shape product**

#### 4.2 Inzameling & aankoop verspaningsafval

Inzamelen en sorteren van het industrieel aluminium afval is bij smeltloze recyclagetechnieken een veel gevoeliger stap dan bij traditionele recyclage. Legeringselementen of primair aluminium kunnen niet meer bijgemengd worden in de smelt, aangezien er geen smelt is. Daarom moet het aluminium afval gesorteerd worden per specifieke legering of toch minstens per legeringsfamilie. In de praktijk komt dit erop neer dat de spanen vanaf de bron gescheiden dienen te blijven. De verspaning dient dus zo georganiseerd te worden dat de verschillende

legeringsfamilies gescheiden blijven. De vervolprocessen zoals de inzameling en verwerking van de spanen vereisen ook blijvende scheiding.

Vasco stelde licht vervuild verspaningsafval van de 6xxx legeringen en van verschillende verspaningsprocessen ter beschikking voor het ASSuRe project. Door de slechte stapeling van de onregelmatig gevormde spanen bevat een kubieke meter spanen slechts een massa van ongeveer 80-250kg. De grote variatie op dit getal is het gevolg van het grote volumeverschil in spanen afkomstig van verschillende productieprocessen, zoals draaien, frezen of boren. Al dit verspaningsafval komt van de projectpartners. Momenteel koopt E-Max immers zelf geen verspaningsafval om te recyclen. De reden daarvoor zijn de hoge verliezen bij het recyclen via hersmelten.

Voor het verder bepalen van de economische haalbaarheid van smeltloos recyclen is het belangrijk om de prijs van verspaningsafval te kennen. Samen met de verkoopprijs van de gerecycleerde extrusieprofielen bepaalt dit de marge waarbinnen de kosten voor de smeltloze recyclage moeten vallen om een economisch zinnige activiteit te zijn. De aankoopprijs van verspaningsafval die een verwerker als E-Max moet betalen ligt hoger dan de verkoopprijs die een spanenproducerend bedrijf krijgt voor verspaningsafval. Daartussen ligt immers de marge van de schroothandelaar. Beide prijzen moeten gekend zijn om het volledige business model in kaart te brengen (Hoofdstuk 7). Appendix B identificeert eerst de parameters die de aluminium afvalprijs bepalen en schat daarna zowel de verkoop- als aankoopprijs voor dat afval.

In Appendix B is een gemiddelde prijs berekend als percentage van de wereldmarktprijs voor primair aluminium op de London Metal Exchange (LME). De verdere kostprijscalculatie voor de valorisatie van smeltloze recyclagetechnieken maakt gebruik van 44%LME om de verkoopprijs van aluminium verspaningsafval in rekening te brengen en 80%LME om de aankoopprijs in rekening te brengen. Dit grote verschil tussen beiden wijst op het mogelijke potentieel van een gesloten kring recyclagesysteem waarbij afvalstromen van een producent rechtstreeks verwerkt worden door een afvalverwerker en dan weer teruggaan naar de producent. Met een dergelijk systeem verdwijnt de marge die de schroothandelaar heeft. Hoofdstuk 7 onderzoekt of dit een geschikt business model is voor de valorisatie van smeltloze recyclagetechnieken.

### 4.3 Reiniging

Alle onzuiverheden die zich nog op het aluminium afval bevinden beïnvloeden de eigenschappen van het uiteindelijke extrusieprofiel. Reiniging is daardoor in de praktijk altijd nodig. Afval, vooral verspaningsafval, is immers meestal verontreinigd met resten van koelvloeistoffen, smeermiddelen en andere verontreinigingen.

Het reinigingsproces bestaat uit wassen, spoelen en drogen. Kanegsberg beschrijft de functies en belangrijkste parameters van deze drie componenten (2005).

1. Wassen : om contaminaties van het fabricatieproces en de omgeving te verwijderen. De belangrijkste parameters zijn het reinigingsmiddel (meestal op water gebaseerd), de reinigingskracht, de reinigingstijd en de temperatuur.
2. Spoelen : om de reinigingsmiddelresten te verwijderen, deze stap is niet altijd nodig. De belangrijkste parameters zijn het reinigingsmiddel (meestal water), de reinigingskracht, tijd en temperatuur.
3. Drogen : om de spoelresten te verwijderen. De belangrijkste parameters zijn het temperatuurprofiel en de opwarm- en afkoeltijd.

De industriële reinigingstest als onderdeel van het ASSuRe project reinigde 350 kg spanen. Het gebruikte reinigingsmiddel is Wigol VR X 74 S, gemengd met water. Spoelen gebeurt met zuiver water. Vier betonmixers, bediend door twee operators, verzorgen een goede menging tussen reinigingsmiddel en spanen in elke was- en spoelcyclus. Elke batch van drie kg spanen is gereinigd met 1,2kg reinigingsmiddel en 30kg water in de wascyclus. Voor het spoelen is een additionele 30kg gebruikt. De tijdsduur van elk van beide cycli is tien minuten. Het water wordt opgewarmd en de watertemperatuur bij aanvang van de cyclus is 70°C. Tijdens het wassen en spoelen verlaagt die temperatuur tot 50°C. Na het wassen en spoelen worden de spanen verzameld in grote bakken die in de droogoven passen. De oven droogt de gewassen spanen gedurende vier uur aan een temperatuur van 150°C. De volgende paragrafen leggen de gebruikte materialen en methodes uit in meer detail.

#### 4.3.1 Grondstoffen

De keuze van het reinigingsmiddel is experimenteel bepaald. Het reinigingsmiddel bij eerdere testen op laboschaal was aceton. Dit op industriële schaal gebruiken is economisch en ecologisch niet verantwoord. Aceton is gebruikt als referentie bij het experimenteel bepalen van het geschikte reinigingsmiddel en reinigingsparameters. De onderzoeksgroep van professor Tekkaya uit de T.U. Dortmund gebruikte Wigol VR X 74 als reinigingsmiddel bij hun testen met spanen. 1l Wigol werd gemengd met 5l water en gedurende 15 minuten werd gespoeld met het water op een temperatuur van 60°C. Gebaseerd op deze referenties is reiniging met aceton, Wigol VR X 74 S en een tweede reinigingsmiddel, Aluclin 12S, getest onder verschillende reinigingsmiddel/water- en spanen/ reinigingsmiddolverhoudingen (zie Appendix C). De in de vorige paragraaf vermelde verhoudingen gebruikt in het ASSuRe project zijn de minst reinigingsmiddelintensieve verhoudingen uit de experimentele test en gaven nog steeds goed gereinigde spanen als resultaat.

De volgende tabel bevat het grondstofgebruik tijdens de reiniging per kg spanen. Tabel 5 detailleert zowel de gebruikte hoeveelheden als de kostprijs, uitgaande van de test met 117 batches van drie kg spanen. De waterprijs voor Vlaamse bedrijven verschilt van gemeente tot gemeente en is opgelijst voor 2016 door de Vlaamse



Milieumaatschappij (2016). Het gemiddelde van de prijzen in alle gemeenten is 0,0044€/l.

De kostprijs van het water is een richtwaarde van dezelfde grootte orde als de werkelijke prijs. Die werkelijke prijs verschilt van gemeente tot gemeente.

<b>grondstoffen</b>	volume per batch (l)	volume per kg spanen (l/kg)	Éénheidsprijs (€/l)	Kost (€/kg)
reinigingsmiddel	1,2	0,4	2,67	1,068
Water	60	20	0,0044	0,088

**Tabel 5: Grondstofkost reiniging**

Een verdere optimalisatie van de verhouding reinigingsmiddel/ spanen is mogelijk door experimenteel de hoeveelheid reinigingsmiddel en water per kg spanen te verlagen tot het punt waar de spanen niet meer goed gereinigd zijn. De technische productinformatie van Wigol vermeldt een nodige concentratie Wigol VR X 74 S in water van 0,5 tot 3%, terwijl de hier gebruikte verhouding 4% is (Wigol, 2012). Reiniging met tot acht keer minder Wigol moet dus mogelijk zijn. Daarnaast is voor elke batch spanen een nieuwe hoeveelheid water en Wigol gebruikt. Typisch kan een dergelijke mix tot vijf keer gebruikt worden alvorens die de spanen onvoldoende ontvet.

#### 4.3.2 Energie

De benodigde energie voor de reiniging bestaat uit drie componenten: de energie nodig om het water op te warmen tot 70°C, de energie nodig om de reinigingskracht te leveren, in dit geval het ronddraaien van de betonmolens en de energie nodig voor het drogen van de gewassen spanen.

De technische productinformatie van Wigol vermeldt dat de optimale watertemperatuur bij reiniging ligt tussen 50°C en 85°C (Wigol, 2012). Het water koelt af tijdens de reiniging. Opwarmen tot 70°C resulteert in water op een temperatuur van 50°C aan het einde van de reiniging. Gedurende de hele cyclus ligt het water dus binnen de optimale temperatuurgrenzen. De energie nodig om het water op te warmen is niet opgemeten tijdens de test. Als benadering kan de theoretische energie voor het opwarmen van een volume water berekend worden. Het leidingwater heeft een oorspronkelijke temperatuur van 15°C. Dit moet opgewarmd worden tot 70°C, een temperatuursverhoging van 55°C. De soortelijke warmte van water is 4,19 kJ/(kg.K). 1 kWh is equivalent met 3600 kJ. Per kg spanen moet twee keer 10 kg water opgewarmd worden en dit resulteert dus in een theoretisch nodige energie van :

$$E_{water} = 20kg * 55^{\circ}C * 4,19 \frac{kJ}{kg * ^{\circ}C} * \frac{1kWh}{3600kJ} = 1,28 \frac{kWh}{kg \text{ spanen}}$$

De betonmolens draaien 20 minuten per batch van drie kg spanen, tien minuten om te wassen en tien minuten om te spoelen. Het vermogen van een dergelijke betonmolen

is 0,5 kW. Ter vereenvoudiging is de veronderstelling dat de molen constant op volledig vermogen draait aangenomen. De nodige energie voor het mixen van spanen en reinigingsmiddel is dus :

$$E_{molen} = \frac{0,5kW * 0,333h}{3 kg} = 0,056 \frac{kWh}{kg spanen}$$

Het drogen van de spanen gebeurt in een droogoven, gedurende vier uur op 150°C. Na het wassen en spoelen worden de spanen verzameld in bakken van 3m lang en 0,5m breed. Elke bak bevat 150 kg spanen. In de oven passen drie bakken achter elkaar, twee bakken naast elkaar en vier bakken boven elkaar. In het ideale geval is de oven bijgevolg gevuld met 24 bakken of 3600 kg spanen. Voor minimaal energiegebruik per kg spanen moet de oven zo goed mogelijk gevuld zijn. Daardoor kan best een buffer aan spanen opgebouwd worden na het reinigen en voor het drogen. Indien dit de voorraad op de werkvloer te sterk vergroot, kan in de werkelijke industriële toepassing een kleinere oven gebruikt worden of zelfs een snellere droogmethode rechtstreeks in de productielijn.

De oven is een gasoven. Daarnaast is er een ventilatie van de oven aangedreven met elektriciteit, hier buiten beschouwing gelaten. Door die ventilatie is het nodig de spanen te bedekken met een gaas of rooster, opdat ze niet opvliegen in de oven. De specificatie van de oven van de Italiaanse fabrikant Turla vermeldt een gasconsumptie van 120 kcal/kg te drogen aluminium. Dit is equivalent met 0,5 MJ of 0,14 kWh per kg spanen. Uiteraard is dit slechts een richtwaarde en ligt die waarschijnlijk in werkelijkheid hoger omdat de spanen een grote oppervlakte/ volumeverhouding hebben. Aangezien de nodige energie niet is opgemeten tijdens de ASSuRe test wordt dit hier wel als benaderende waarde gebruikt voor verdere economische en ecologische kostberekeningen.

Tabel 6 vat de hoeveelheid en kost van de energie nodig voor de reiniging tijdens het ASSuRe project samen. De Vlaamse Regulator van de Electriciteits- en Gasmarkt publiceert de energieprijzen voor bedrijven in Vlaanderen (VREG, 2016). In januari 2016 bedraagt de prijs voor elektriciteit 0,20€/kWh en de prijs voor aardgas 0,04€/kWh.

<b>Energie</b>	energie per kg spanen kWh/kg	Éénheidsprijs (€/kWh)	Kost (€/kg)	
Water	1,28	0,20	0,256	
Molen	0,056	0,20	0,011	
Oven	0,14	0,04	0,006	

**Tabel 6: Energiekost reiniging**

#### 4.3.3 Arbeid

2 arbeiders reinigden de 350kg spanen gedurende drie werkdagen van 8u (Tabel 7). Uiteraard is deze zeer lange tijd het gevolg van de uiterst kleine batches. Betonmolens waren een beschikbare mixmachine voor de test maar zijn uiteraard niet geschikt voor

het werkelijke industriële proces. Daarvoor moeten minstens grotere batches gebruikt worden. Nog beter is een continu, automatisch proces. Daarnaast besteedde een arbeider 2u aan materiaalhandling om de bakken in gereedheid te brengen voor de reiniging en voor transport naar de oven. De oven bevond zich niet op dezelfde locatie als de was- en spoelopstelling. De invloed van deze verschillende locaties is opgenomen in Sectie 4.7 Transport. Gebaseerd op data uit 2014 van Eurostat die stellen dat de gemiddelde uurloonkost van een arbeider in België iets minder dan 40€/u is en een studie van het Duitse Institut für Makroökonomie und Konjunkturforschung die de gemiddelde uurloonkost in België in 2014 berekende als 41,2€/u veronderstelt deze studie een uurloonkost van 40€/u (Trends, 2014; Eurostat, 2015).

Arbeid	aantal arbeiders	aantal uren per kg spanen	Éénheidskost	Kost
		u/kg	(€/u)	(€/kg)
Reiniging	2	0,069	40	5,49
Handling	1	0,006	40	0,23

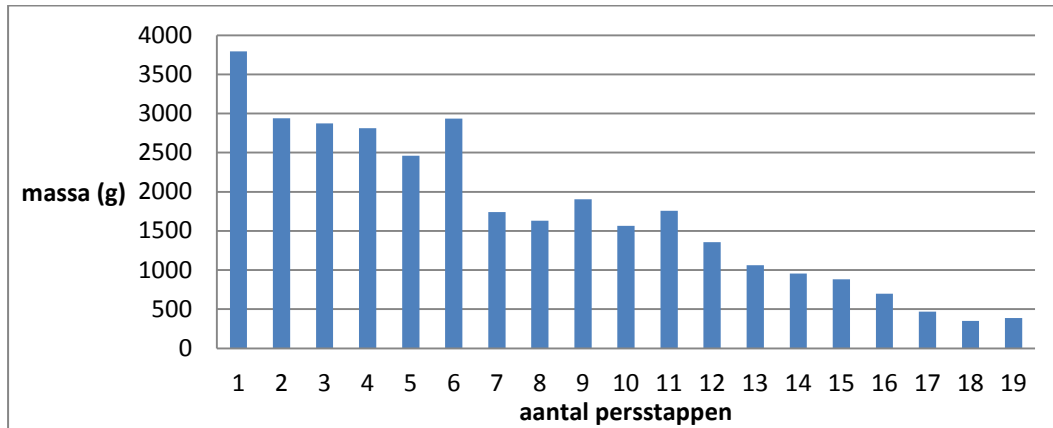
**Tabel 7: Arbeidskost reiniging**

#### 4.4 Precompactie

Precompactie van de gereinigde spanen maakt extrusie mogelijk. Precompactie zelf resulteert niet in een volledig geconsolideerd materiaal. Wel resulteert het in een billet met een relatieve dichtheid ten opzichte van de dichtheid van aluminium van 70-90%, afhankelijk van de persdruk en de spaangeometrie (Samuel, 2003). De dimensies van de billet zijn bepaald door de dimensies die de extrusiepers als invoer kan aanvaarden. In de literatuur, op laboschaal, gebeurt precompactie aan een druk van 20MPa (Tekkaya, 2009) tot 700MPa (Behrens, 2014). Door de zeer grote volumereductie is het onmogelijk om een billet geschikt voor een industriële extrusiepers te persen in één persstap. Zelfs voor een kleine billet met een diameter van 60mm en een lengte van 175mm vermelden Güley et al. dat er reeds vier persstappen nodig zijn (2010).

Mol Cy, een West-Vlaams bedrijf vooral gespecialiseerd in de productie van vuilniswagens, opleggers en speciale spoor- en wegvoertuigen stelde een pers ter beschikking voor de ASSuRe precompactietest. Drie billets voor warmextrusie en vijf billets voor vonkplasmasinteren zijn gemaakt met behulp van deze pers. In totaal is zo ongeveer 150kg spanen samengeperst. De nodige energie is opgemeten tijdens het persen met een multimeter Chauvin Arnoux Qualistar+ (CA8335). De perscilinder is ontworpen met een binnendiameter van 220 mm en een hoogte van 600mm. Die hoogte is beperkt door de verticale vrije weglengte van de ram. De benodigde lengte van de billet voor het gebruik in de extrusiepers van E-Max is 500 tot 700mm. Ideaal gezien was de perscilinder dus langer, aangezien het kleine verschil tussen de lengte van de perscilinder en de nodige lengte van de billet nu resulteerde in een zeer groot aantal nodige persstappen om de lengte volledig te bereiken. Figuur 11 illustreert de

inefficiëntie van deze manier van persen door de massa die per persstap bijgevuld werd uit te zetten tegenover het aantal persstappen, dit voor de eerste geprecompacteerde billet. Meteen is duidelijk dat er een grote ruimte voor verbetering mogelijk is. De additionele massa van de laatste vijf persstappen samen is slechts evenveel als die van de eerste persstap alleen.



**Figuur 11: Vulmassa per persstap**

Bij de daaropvolgende precompactie van billets kon het aantal persstappen reeds gereduceerd worden tot 13 terwijl de bereikte lengte bijna 600mm was. De eerste billet bereikte slechts een lengte van 470mm. De tijd om die de te maken is niet opgemeten. Bij de daaropvolgende billets verminderde die tijd van 1u tot 45 minuten. De tijd en het aantal persstappen om een billet te maken volgt dus een steile leercurve. De persdruk is gevarieerd tussen 5MPa en 30MPa. Alle billets resulteren echter in een vergelijkbare densiteit relatief tegenover de densiteit van aluminium, van rond de 80%. Dit is vergelijkbaar met waarden uit de literatuur. Een hoge densiteit is belangrijk omdat luchtinsluitels blaarvorming kunnen veroorzaken, ongewenst voor een goede kwaliteit profiel (Henley, 1991). Indien dat nog steeds een probleem vormt is extrusie onder vacuum een methode om dit op te lossen (Takashi et al., 1977). Tabel 8 vat de precompactie van de drie billets voor extrusie samen.

	massa [kg]	densiteit	aantal persstappen	sequentie van drukken	tijd [min]
<i>billet 0</i>	32,5	80,2%	19	alle 5Mpa, laatste 20Mpa	/
<i>billet 1</i>	40,9	81,6%	15	eerste helft 20Mpa, tweede helft 30Mpa	60
<i>billet 2</i>	38,8	77,8%	13	alle 20Mpa, laatste 30Mpa	45

**Tabel 8: Procesparameters experimentele precompactie tot billets**

#### 4.4.1 Grondstoffen

Economisch gezien hoeft geen grondstofverbruik in rekening gebracht te worden voor de precompactie. Er gaan geen spanen verloren bij het samenpersen. Het enige grondstofverbruik is een verwaarloosbare hoeveelheid smeerolie om de billet los te

laten komen uit de pers. Indien de spanen na reiniging niet volledig gedroogd zijn komt een kleine hoeveelheid condens en waterdamp uit de billet tijdens het persen. Dit was het geval in de ASSuRe test.

#### 4.4.2 Energie

De nodige energie is opgemeten tijdens de precompactie van billet 2. Het vermogen van de elektriciteit die de pers onttrekt aan het net is gemeten. Dit vermogen integreren over de precompactietijd levert de nodige energie. Twee verschillende aanpakken zijn hiervoor gebruikt.

De eerste aanpak integreert over de volledige tijd. Die tijd bedroeg 30 minuten voor de precompactie en een additionele 15 minuten voor de laatste persstap en het loskloppen en verwijderen van de billet uit de perscilinder. Die laatste stap moet zoveel mogelijk geëlimineerd worden in de werkelijke industriële recyclage door bijvoorbeeld het gebruik van meer smeerolie of lagere persdrukken, indien die lagere persdrukken ook tot een voldoende densiteit kunnen compacteren. Integreren over de volledige tijdsduur betekent dat ook al het latent energiegebruik tijdens het stationair draaien van de pers wanneer de perscilinder gevuld wordt in rekening wordt gebracht. Dit vullen duurde zeer lang in de test. Met beter getrainde operatoren of automatische vulling is de vultijd sterk te reduceren. De integratie over de volledige tijd is bijgevolg een bovengrens voor de werkelijke nodige energie.

De tweede aanpak bepaalt een ondergrens, in het ideale geval waarbij er geen latent energiegebruik is omdat de vulling ogenblikkelijk is. Dat gebeurt door het integreren van het vermogen gedurende de 30 seconden voor tot 30 seconden na een vermogenspiek als gevolg van een persstap. Die 30 seconden komt overeen met de tijd nodig om de ram de spanen te laten samendrukken en na het persen terug naar zijn initiële positie te bewegen.

De zo bepaalde ondergrens bedraagt 0,35kWh/kg spanen en de bovengrens 1,13 kWh/kg spanen. De nodige energie in een werkelijk industrieel proces, met beperkt latent energiegebruik, zal ongeveer tussen die grenzen liggen. Tabel 9 illustreert de energetische kostprijs van de precompactiestap.

Energie	energie per kg spanen	éénheidsprijs	Kost
	kWh/kg	(€/kWh)	(€/kg)
Ondergrens	0,35	0,2	0,07
Bovengrens	1,13	0,2	0,226

**Tabel 9: Energiekost precompactie**

#### 4.4.3 Arbeid

Net zoals alle andere processtappen vergt de precompactie, zoals uitgevoerd in het ASSuRe project, veel arbeid. Dit is enerzijds het gevolg van het feit dat de operatoren

niet getraind zijn om dit nieuwe proces snel uit te voeren en anderzijds te wijten aan de volledige afwezigheid van enige automatisering.

Precompactie vereist twee operatoren. Eén operator die de perscilinder vult met spanen en één operator die de pers bedient en de eerste operator ondersteunt bij het vullen. Het precompacteren van billet 2 met een massa van 38,8kg duurde 45 minuten. Het werkelijke precompacteren duurde slechts 30 minuten, maar het loskrijgen van de billet uit de perscilinder nam veel tijd in beslag. Tabel 10 vat de arbeidskost voor de precompactie samen. Deze hoge kost moet uiteraard verminderd worden door het optimaliseren van het aantal precompactiestappen, training, het vereenvoudigen van het losmaken van de billet en automatisatie. Handling is niet apart opgemeten tijdens de ASSuRe test. De handling van de bakken spanen tot aan de persmachine is daarom geschat als gelijk aan de nodige handling om de bakken spanen bij het reinigen tot aan de reinigingsmachines te brengen, de helft van de totale nodige handlingstijd bij het reinigen. De handling van de billets na het precompacteren is klein ten opzichte van de handling van de bakken spanen omdat die billets veel compacter zijn, en is in deze analyse verwaarloosd.

Arbeid	aantal arbeiders	Tijd u/kg	éénheidskost (€/u)	Kost (€/kg)
Precompactie		2	0,019	40
Handling		1	0,003	40

**Tabel 10: Arbeidskost precompactie**

## 4.5 Vonkplasmasintering

De alternatieve route voor warmextrusie in het ASuRe project is vonkplasmasinteren. Deze methode produceert volledig dense billets. De hoogte van de billet moet overall gelijk zijn, maar in het vlak is de vorm vrij te kiezen. Volumineuze stukken, geproduceerd door het verspanen van een massieve cilinder of balk tot de nodige vorm, zijn bijgevolg een geschikte toepassing om maximaal gebruik te maken van de kwaliteiten van vonkplasmasinteren. In eerste instantie test het ASSuRe project het produceren van cilindervormige billets uit spanen via vonkplasmasinteren op industriële schaal. Voor stukken met een afwijkende vorm in het vlak is immers een mal nodig. Na het vonkplasmasinteren volgt een warmtebehandeling.

Testen zijn zowel uitgevoerd op een kleinere SPS machine in het departement materiaalkunde van de KU Leuven als op een industriële machine bij onderaannemer FCT Systeme, een Duits bedrijf. Een raming van de operationele kosten gebeurt hier op basis van het vonkplasmasinteren in de KU Leuven, met enkele assumpties voor opschaling. Anderzijds is de prijs die de onderaannemer vraagt om vonkplasmasinteren uit te voeren ook opgenomen. Dit is immers een nog realistischere manier om de kostprijs te berekenen voor een werkelijk businessmodel.

### 4.5.1 Grondstoffen

Er hoeft geen grondstofgebruik in rekening gebracht worden. Er gaan immers geen spanen verloren tijdens het vonkplasma-sinteren.

### 4.5.2 Energie

Vonkplasma-sinteren bestaat uit het samenpersen van de geprecompacteerde biljet gecombineerd met het aanleggen van stroompulsen doorheen de biljet. De gebruikte cyclus van opwarmen onder constante druk gevolgd door de temperatuur constant houden op 450°C tijdens het opvoeren van de druk tot 35kN heeft een opgemeten energiegebruik van 2,96kWh/kg. Blussen met water na deze cyclus vermijdt de nood om druk en temperatuur gradueel te verlagen op het einde. Vonkplasma-sinteren bij vacuum heeft een additionele nodige energie van 0,205kWh (Duflou et al., 2015).

Na vonkplasma-sinteren volgt een warmtebehandeling in een oven op 175°C gedurende 4u (Paraskevas et al.,2015). De energieconsumptie van deze warmtebehandeling is niet opgemeten maar geschat als equivalent met de energieconsumptie nodig voor het drogen van de spanen in 4.3.2. Tabel 11 vat de hoeveelheid en kost van de energie nodig voor vonkplasma-sinteren tijdens het ASSuRe project samen.

Energie	energie per kg spanen	Éénheidsprijs	Kost	
	kWh/kg	(€/kWh)	(€/kg)	
SPS	2,96	0,20	0,592	
Warmtebehandeling	0,14	0,04	0,006	

**Tabel 11: Energiekost vonkplasma-sinteren (SPS)**

### 4.5.3 Arbeid

Eén operator is voldoende om de machine te bedienen. De totale SPS cyclus duurt 17,5min. Zonder vacuum duurt de cyclus slechts 13,5min. Ook heeft de operator even tijd nodig om de machine te laden en te lossen. Vandaar veronderstelt deze kostberekening een nodige arbeidstijd van 20min. Uiteraard is deze tijd enkel nodig voor een testopstelling, waarbij de temperatuur- en drukgradiënt met de hand wordt aangelegd. Een computergestuurde vonkplasma-sinteringmachine reduceert de arbeidstijd tot enkel het laden en lossen. Integratie in een geautomatiseerde productielijn elimineert zelfs die laad- en lostijd. Arbeidskostreductie is dus relatief éénvoudig voor SPS.

De kost per kg hangt uiteraard af van de massa van de biljet. Vonkplasma-sinteren op industriële schaal gebeurt met biljets van 4 tot 9kg in het ASSuRe project. De berekening in Tabel 12 is uitgevoerd voor een biljet van 4kg, een biljet van 9kg en een gemiddelde biljet met een massa van 6,5kg en een SPS cyclus van 20min.

Arbeid	massa biljet	tijd per biljet	Éénheidskost	kost
--------	--------------	-----------------	--------------	------

	Kg	u/billet	(€/u)	(€/kg)
Klein		4	0,333	40 3,33
Gemiddeld		6,5	0,333	40 2,05
Groot		9	0,333	40 1,48

**Tabel 12: Arbeidskost vonkplasma'sinteren**

Samengevat is de totale kost van het vonkplasma'sinteren zelf gelijk aan 2,648€/kg billet, halffabrikaat of near-net-shape product.

## 4.6 Warmextrusie

Wegens onvoorziene vertragingen is de extrusietest van gereinigde en geprecompacteerde spanen op industriële schaal in het ASSuRe project nog niet uitgevoerd bij de uiterste datum van het indienen van de thesis. De verdere kost- en ecologische impactberekeningen veronderstellen dat het proces niet afwijkt van een gemiddeld extrusieproces voor aluminium. Gebaseerd op de extrusietesten op kleine schaal van verschillende auteurs in de literatuurstudie (2.1) is deze veronderstelling zeer waarschijnlijk legitiem.

## 4.7 Transport

Verspaningsafval is volumineus en moet getransporteerd worden van het bedrijf dat spanen produceert als afvalfractie bij de productie van eindproducten naar het bedrijf dat spanen kan verwerken. De schroothandelaar voert deze stap uit in het huidige business model en vraagt hier een aanzienlijke marge voor. Omwille van die marge en het volumineus zijn van spanen bestaat de perceptie dat eigen transport van de afvalfracties in een gesloten systeem tussen afvalproducent en recyclagebedrijf, zoals in het ASSuRe project, een aanzienlijke kost met zich mee brengt. Een schatting van de transportkosten tijdens het ASSuRe project en de sensitiviteit op deze resultaten weerlegt die perceptie echter.

De transportkost per kg spanen is te berekenen uit het volgende model :

$$\frac{\text{aantal km} * \text{kmkost} + \text{aantal uur} * \text{arbeidskost}}{\text{aantal kg/vrachtwagen}} = \frac{\text{transportkost}}{\text{kg}}$$

Het 'aantal km' is de totale afstand waarover spanen of verdere tussenproducten op basis van spanen vervoerd worden tijdens het volledige proces, van het bedrijf dat spanen als afvalfractie produceert tot het bedrijf dat het gerecycleerd profiel gebruikt. Dit 'aantal km' houdt ook rekening met het eventuele leeg heen- of terugrijden van de vrachtwagen. De 'kmkost' is een gemiddelde kost voor brandstof, verkeersbelasting, aankoop, taksen en verzekering van een vrachtwagen per kilometer. Het 'aantal uur' is de som van de tijd nodig om het 'aantal km' af te leggen en de tijd nodig voor de



chauffeur om te laden en te lossen. De 'arbeidskost' is een gemiddelde uurloon voor de vrachtwagenchauffeur. Tot slot is het 'aantal kg/vrachtwagen' de hoeveelheid spanen die een vrachtwagen kan vervoeren per rit.

In de test uitgevoerd voor het ASSuRe project komen de spanen van bij Vasco. Ook daar worden ze gewassen. Het drogen vervolgens gebeurt bij E-Max. Subcontractor Mol Cy verzorgt de precompactie. E-Max opnieuw extrudeert de billet tot een profiel. Theoretisch gebruikt Vasco daarna die profielen opnieuw in haar producten. Ook spanen van Wuyts kunnen theoretisch dezelfde weg volgen binnen het ASSuRe project, mits te beginnen en eindigen bij Wuyts in plaats van Vasco. Tabel 13 vermeldt de afstanden in kilometer tussen de verschillende projectpartners (Google, 2016) en de tijd nodig om die afstand af te leggen. De tijd voor de afstand afgelegd op autostrades is berekend door de afstand te delen door de gemiddelde snelheid van een vrachtwagen. Een studie van VITO voor de Vlaamse overheid stelt dat die gemiddelde snelheid van een vrachtwagen op de autostrade 86 km/u bedraagt (De Vlieger, 2005). De tijd voor de afstand afgelegd op alle andere wegen is de tijdsindicatie die Google Maps geeft voor het afleggen van die afstand met een auto. De achterliggende assumptie van deze tweeledige berekening is dat het verschil in snelheid tussen een vrachtwagen en een personenwagen op kleine wegen klein is, maar dat een vrachtwagen op de autostrade beduidend trager rijdt dan een personenwagen.

	afstand [km]				tijd [min]			
	Vasco	Wuyts	E-Max	Mol Cy	Vasco	Wuyts	E-Max	Mol Cy
Vasco	0	86,8	5,4	233	0	65,4	4,0	169,4
Wuyts		0	84,5	147		0	62,4	106,9
E-Max			0	231			0	166,4
Mol Cy				0				0

**Tabel 13: Afstanden en tijden tussen de verschillende bedrijven betrokken bij ASSuRe**

De tijd nodig om te laden en de tijd nodig om te lossen zijn elk geschat op 30 minuten, of in totaal één uur per rit. Opmeting van de werkelijke nodige tijd is niet opportuun in deze studie. De arbeidskost bedraagt 40€/u. De gemiddelde kilometerkost voor een vrachtwagen in Vlaanderen bedraagt 0,453€/km (Impens, 2004).

De massa spanen vervoerd per vrachtwagen hangt af van het beschouwde scenario. Tijdens het ASSuRe project zijn slechts 350 kg spanen verwerkt, wat dus een nogal kleine massa spanen per vrachtwagen oplevert. In het ideale geval is het aantal spanen in de vrachtwagen beperkt door het maximale laadvolume of laadgewicht. Een vrachtwagen die een standaard 40voet-container trekt heeft een laadvolume van 67,5m<sup>3</sup>. De dichtheid van de spanen verwerkt tijdens het ASSuRe project bedraagt 80-250kg/m<sup>3</sup>. De maximale massa spanen per vrachtwagen bedraagt bijgevolg 5400-16875kg. Indien de spanen een dichtheid hebben van precies het gemiddelde tussen 80 en 250 kg bedraagt de maximale massa spanen per vrachtwagen 11137,5kg. Laadvolume is hier beperkend, het maximale laadgewicht van een vrachtwagen is immers 19000kg voor de kleinste, twee-assige vrachtwagens (Art. 32bis, 3.2, 1968).

Drie verschillende scenario's, een 'worst case', een 'best case' en een realistisch scenario geven een idee van de transportkost op basis van bovenstaande gegevens.

Het 'worst case' scenario is het transport met alle tussenstappen zoals uitgevoerd tijdens het ASSuRe project. Dit betekent ritten tussen Vasco – E-Max – Mol Cy – E-Max – Vasco. Per rit wordt slechts 350 kg spanen vervoerd en na elke enkele rit rijdt de vrachtwagen leeg terug. Rekening houdend met de laad- en lostijd na elke rit bedraagt de transportkost per kg, te berekenen uit het opgestelde model, 2,98€/kg.

Het 'best case' scenario, veronderstelt dat alle recyclagestappen gebeuren bij E-Max. Transport is enkel nodig voor het ophalen van de spanen en het leveren van de profielen, gerecycleerd uit diezelfde spanen, bij Vasco of Wuyts. Bovendien rijdt de vrachtwagen niet leeg terug maar voert die in andere richting een nuttig transport uit waardoor die terugrit niet moet meegerekend worden. De vrachtwagen zit volledig vol met 11137,5kg spanen. In dit geval bedraagt de totale kost voor Wuyts slechts 0,022€/kg en voor Vasco slechts 0,008€/kg.

Het laatste, meer realistische scenario, veronderstelt ook dat alle recyclagestappen gebeuren bij E-Max. De vrachtwagen rijdt wel leeg terug. Ook is de hoeveelheid spanen vervoerd slechts 2700kg, of een 20voet-container voor de helft gevuld met spanen met een gemiddelde dichtheid van 165kg/m<sup>3</sup>. In dit meer realistische scenario bedraagt de totale transportkost 0,148€/kg voor Wuyts en 0,037€/kg voor Vasco. Beide bedrijven zijn meteen ook representatief voor alle mogelijke klanten van E-Max die in een straal van 100km rond E-Max gevestigd zijn.

Thomas Vandenhoute van Sirris, één van de projectpartners, vermeldt dat afvalinzamelaars transportkost meestal aanrekenen per ophaling, ongeacht het opgehaalde volume. Een richtprijs voor een maandelijkse ophaling is 60 tot 70€. Met deze richtprijs is het mogelijk de berekende waarde aan de realiteit te toetsen. Om een transportkost van 0,148€/kg te bekomen moet bij een dergelijke maandelijkse ophaling met een kost van 70€ minstens 470kg spanen opgehaald worden. Dit is beduidend minder dan de berekende nodige 2700kg om tot een dergelijke lage transportkost te komen. Deze toetsing met de realiteit toont aan dat een transportkost van 0,148€/kg spanen geen onderschatting is van de werkelijke transportkost. Wel is deze kost geen absolute kost maar afhankelijk van de hoeveelheid spanen die per keer vervoerd kunnen worden.

## 4.8 Conclusie: totale kost ASSuRe proces

Gebaseerd op het samenbrengen van alle deelprocessen volgens de juiste massabalans, volgt nu de totale operationele kost van smeltloze recyclage zoals uitgevoerd in het ASSuRe project. Vervolgens komt er een overzicht van hoe deze kost zich verhoudt tot de marges die partners hebben om dit proces uit te voeren, veronderstellend dat smeltloos gerecycleerde billets en profielen verkocht worden aan een prijs gelijk aan

de prijzen voor aluminium gerecycleerd via hersmelten. Dit vormt de basis voor het evalueren van procesverbeteringen in hoofdstuk 6 en het vinden van geschikte business models in hoofdstuk 7.

#### 4.8.1 Warmextrusie

Omdat bij het ter perse gaan van deze masterthesis de ASSuRe extrusietest nog niet uitgevoerd was en omdat de kost van de extrusie gelijk te veronderstellen is bij extrusie van een billet geproduceerd via hersmelten of een smeltloos geprecompacteerde billet, is deze totale kost enkel berekend voor het smeltloos recycleren van spanen tot billet. De massabalans is in dit geval éénvoudig. Om 1kg billet te produceren moeten 1,0225kg vuile spanen gereinigd worden tot 1kg gereinigde spanen, zonder verlies te precompacteren tot 1kg billet. Tabel 14 toont de totale operationele kost van het ASSuRe recyclageproces in €/kg billet.

<b>operationele kost ASSuRe recyclage</b>	
Logistiek	3,047
transportkost	3,047
Reiniging	7,304
<i>grondstoffen</i>	
reinigingsmiddel	1,092
water	0,090
<i>energie</i>	
water	0,262
molen	0,011
oven	0,006
<i>Arbeid</i>	
reiniging	5,609
handling	0,234
precompactie	1,889
<i>energie</i>	
samenpersen	0,226
<i>Arbeid</i>	
precompactie	1,546
handling	0,117
<b>Totaal [€/kg billet]</b>	<b>12,240</b>

**Tabel 14: De totale operationele kost van de experimentele recyclage tot billet**

Om een idee te krijgen over de grootte van deze kost, is het interessant naar de aankoop- en verkoopprijzen tussen de verschillende stappen in het recyclageproces. Een producent die verspaningsafval genereert kan die verkopen aan een schroothandelaar voor een gemiddelde prijs van 44% van de LME aluminiumprijs (zie 4.2). De schrootverwerker, die spanen aankoopt van de schroothandelaar en deze recycleert tot billet, kan deze spanen bij de schroothandelaar aankopen voor

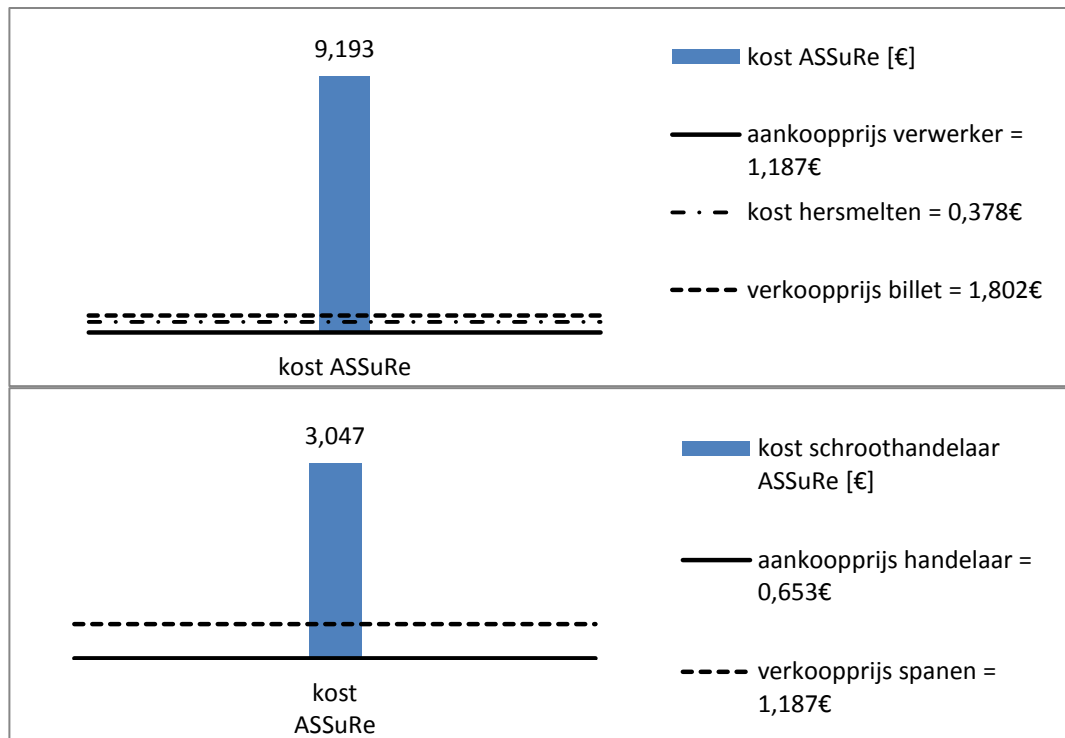
gemiddeld 80% van de LME prijs (zie 4.2). De gemiddelde verkoopprijs voor een billet per kg is de LME prijs + 0,35€, een richtwaarde verstrekt door de partners van het ASSuRe project. Tabel 15vat de marges voor de verschillende bedrijven in het recyclageproces samen bij de LME prijs van 1,452€/kg van 23 april 2016 en met de massabalans van een billet in rekening gebracht.

<i>aankooprijs schroothandelaar</i>	0,653
<i>marge schroothandelaar</i>	0,534
<i>aankooprijs schrootverwerker</i>	1,187
<i>marge verwerker</i>	0,614
<i>verkooprijs billet</i>	1,802

**Tabel 15: Marges voor de bedrijven betrokken bij recyclage**

De huidige operationele kost van de schrootverwerker voor de productie van een billet is 0,2€/kg billet, ook een richtwaarde verstrekt door de partners. De kost van materiaalverliezen bij hersmelten van spanen worden vermeden bij smeltloze recyclage en moeten dus opgeteld worden bij deze operationele kost om een vergelijking mogelijk te maken. Bij een smeltverlies van 15% en een aankooprijs van 1,187€/kg spanen bedragen deze smeltverliezen een bijkomende 0,178€/kg billet.

Zelfs na het vermijden van de smeltverliezen is de ASSuRe recyclagekost veel te hoog, zoals verwacht omdat het gaat om een testopstelling die vooral de technologische haalbaarheid wil bevestigen. Hoofdstuk 6 bekijkt of het mogelijk is om deze kost te reduceren tot tenminste binnen de marges van de verschillende bedrijven in het recyclageproces en liefst tot een operationele kost vergelijkbaar met die van hersmelten. Figuur 12: Operationele kost en marges ASSuRe recyclage (a) schrootverwerker (b) schroothandelaarvisualiseert het enorme verschil tussen de kost per kg billet gemaakt in het ASSuRe project, zowel door de verwerker als de schroothandelaar (fictief, in werkelijkheid is er geen schroothandelaar in het ASSuRe project) en de marges die de bedrijven slechts hebben.



**Figuur 12: Operationele kost en marges ASSuRe recyclage (a) schrootverwerker (b) schroothandelaar**

#### 4.8.2 Vonkplasma'sinteren

Vonkplasma'sinteren vereist dezelfde voorbereidende stappen transport, reiniging en precompactie. Daarbovenop komt de kost van het vonkplasma'sinteren zelf, gelijk aan 2,648€/kg. Dit brengt de totale operationele kost voor het recyclen via vonkplasma'sinteren in het ASSuRe project op 14,888€/kg. Deze kost is uiteraard veel te hoog. Hoofdstuk 6 bekijkt of het mogelijk is de kost te reduceren. Een rechtstreekse vergelijking met de marges van schroothandelaars en schrootverwerkers klopt niet voor vonkplasma'sinteren. Vonkplasma'sinteren heeft immers weinig toegevoegde waarde wanneer het billets geproduceerd via hersmelten vervangt. Indien deze billets dienen als toevoermateriaal voor een extrusiepers, volstaat immers smeltloos recyclen via reinigen en precompacteren tot billet. De werkelijke toegevoegde waarde van vonkplasma'sinteren moet ingeschat worden via de meerwaarde die een near-net-shape product kan bieden tegenover een massief blok aluminium dat in de juiste vorm verspaand moet worden. Deze meerwaarde hangt af van de hoeveelheid vermeden aluminium materiaal maar ook van de snijsnelheid, de gereedschapskost, de kost van koelvloeistoffen en de graad van automatisatie. Dit moet geval per geval bekeken worden. Een case study over projectpartner Wuyts in Hoofdstuk 7 toont aan dat de toegevoegde waarde groot kan zijn.

# Hoofdstuk 5: Ecologische impact

Het onderzoek naar het valorisatiepotentieel voor smeltloze recyclagetechnieken in deze thesis gebeurt vanuit een holistisch perspectief. Naast de technische mogelijkheid en de economische gewenstheid moeten smeltloze recyclagetechnieken ook ecologisch een voordeel bieden tegenover traditionele technieken om potentieel interessant te zijn voor valorisatie. Dufrou et al. (2015) vergelijken de smeltloze recyclagetechnieken warmextrusie met ECAP, schroefextrusie en vonkplasma-sinteren met de conventionele techniek van het hersmelten in een LCA studie (levenscyclusanalyse). Deze studie gebruikt de Recipe Endpoint H/A methode om de ecologische impact te berekenen (Godekoop et al., 2009). De studie start bij aluminium AA6061 afval en eindigt bij 1 kg profiel of near net shape product. Drie verschillende materiaalverliesscenario's voor het recycleren via smelten zijn aangenomen : 4% verlies voor normaal aluminium afval, 16% verlies voor spanen en een 10% verlieswaarde er tussenin. De ecologische impact van schroefextrusie is 5 tot 10 keer lager dan die van hersmelten, afhankelijk van de materiaalverliezen. Bij extrusie met ECAP is deze impact nog steeds 2 tot 4 keer lager dan bij het hersmelten. De impact van vonkplasma-sinteren is tot 2,5 keer lager dan hersmelten bij het recycleren van spanen, maar heeft een vergelijkbare impact wanneer afvalsoorten met lage materiaalverliezen gerecycleerd worden (Dufrou, 2015). De bestaande literatuur behandelt een aantal onderzoeksvragen in verband met dit ecologische aspect nog niet :

- Verandert de ecologische impact van smeltloze recyclageprocessen bij opschaling van laboschaal naar industriële schaal?
- Wat is de sensitiviteit van de ecologische impact van smeltloze recyclageprocessen tegenover de verandering van procesparameters? Zijn er gevallen waarin de impact niet lager ligt dan de impact van conventionele processen?
- Wat is de totale impactreductie in Europa bij het benutten van het volledige potentieel van smeltloze recyclageprocessen?

Dit hoofdstuk tracht antwoord te bieden op deze vragen. De studie van het smeltloze recyclageproces van aluminium via warmextrusie is verkozen boven een meer oppervlakkige vergelijkende studie van meerdere technieken, om de onderzoeksvragen met voldoende diepgang te behandelen.

## 5.1 Methodologie

Een LCA studie karakteriseert de ecologische impact van producten of processen over de gehele levenscyclus en bestaat uit 4 componenten (ISO 14040; ISO 14044):

- Definitie van het doel en de afbakening van de omvang van de studie
- Inventarisatie van de levenscyclus (LCI)
- Beoordeling van de levenscyclusimpact (LCIA)
- Interpretatie

De definitie van het doel bepaalt het detail en de omvang van de studie. Die wordt afgebakend met de systeemgrenzen. De functionele éénheid stelt dat de hoeveelheid van de verschillende processen of producten die men vergelijkt een zelfde functionaliteit moeten hebben, zodat een éénduidige vergelijking van de verschillende processen mogelijk is. De inventarisatie van de levenscyclus behelst het in kaart brengen van alle materiaal- en energiestromen in het systeem. De beoordeling van de levenscyclus impact gebeurt volgens de Recipe Europe H/A methode (Goedkoop et al., 2009). Recipe is de meest aanvaarde methode voor deze studie en het hierarchische perspectief (H) geeft een gemiddeld perspectief weer binnen deze methode. De A staat voor attributional, wat betekent dat mogelijke gedragswijzigingseffecten als gevolg van de nieuwe recyclagemethode niet mee in rekening zijn gebracht. In Recipe wordt elk van de materiaal- en energiestromen gelinkt aan de ecologische impact die ze veroorzaken op het 'midpunt' niveau (midpoint level) en vervolgens opgedeeld in drie groepen op het 'eindpunt' niveau (endpoint level): menselijke gezondheid, ecosysteemkwaliteit en grondstofvermindering. Na een normalisatie van de volledige ecologische impact kan een enkele impactscore toegekend worden aan een proces of product. Deze score is uitgedrukt in ecopunten (Pts). 1000 ecopunten is de impact veroorzaakt door de acties van één gemiddelde persoon op aarde gedurende een volledig jaar (Plessers, 2013). De onzekerheid op het resultaat neemt toe naarmate men meer convergeert naar de eindscore in punten. Een goede LCA studie interpreteert ook de midpunt categorieën (Goedkoop et al., 2009).

De studie gebeurt met behulp van de LCA software Simapro<sup>®</sup> 8.0.2. De inventarisatie van de levenscyclus is gemodeleerd met behulp van de EcoInvent v3 database (EcoInvent, 2013), gecombineerd met data uit de literatuur en experimentele data uit het ASSuRe project.

De EAA raadt aan om de substitutiemethodologie te gebruiken voor het correct in rekening te brengen van metaalverliezen (EAA, 2013). Die methodologie houdt in dat al het aluminium afval kan gerecycleerd worden tot secundair aluminium en dan een rechtstreeks substituut vormt voor primair aluminium. In concreto betekent dit dat de impact van het gebruik van aluminium afval voor niets in rekening kan gebracht worden, omdat dit anders afval zou zijn. De enige impact van secundair gerecycleerd aluminium is de procesimpact om het te recycleren. Deze methode wordt aangeraden om twee redenen. De eerste is dat de vraag naar nieuw aluminium het

aanbod aan secundair aluminium overstijgt. Al het aluminium wordt dus in principe gerecycleerd. Daarnaast is aluminium theoretisch ook zonder degradatie en kwaliteitsverliezen te recyclen. In de praktijk kan dit aangevochten worden. Echter, omdat de EAA dit aanraadt is de substitutiemethode in deze LCA gevolgd.

In werkelijkheid zijn er echter kwaliteitsverliezen bij hersmelten, voornamelijk door de accumulatie van ongewenste legeringselementen, de inefficiënte scheiding voor het smelten en de thermodynamische barrières om sommige elementen uit de smelt te halen (Paraskevas, 2013). In de praktijk doen smelters bijgevolg meestal aan cascade-recyclage tot legeringen met een hoog gehalte aan legeringselementen en niet al te strikte toleranties voor die elementen, ofwel voegen ze primair aluminium toe om tot een legering te komen met een laag genoeg gehalte aan legeringselementen.

Deze thesis en het ASSuRe project zorgen met gescheiden afvalstromen en smeltloze recyclage voor een recyclage zonder dergelijke kwaliteitsverliezen. De vergelijking van de ecologische impact met de ecologische impact van recyclage via hersmelten zou in werkelijkheid een nog groter verschil opleveren, moest er een mogelijkheid zijn om die kwaliteitsverliezen te kwantificeren. Een dergelijke methode ontwikkelen vergt een rigoureuze aanpak en valt buiten het bestek van deze thesis. Wel is er in deze thesis een poging begaan om een conceptuele schets van een dergelijke methode te ontwikkelen. Die is te vinden in Appendix D.

Bij het volgen van de substitutiemethodologie mag niet vergeten worden dat de smeltverliezen een werkelijk verlies aan aluminiummassa zijn, in tegenstelling tot gewone procesverliezen die na recyclage opnieuw een substituuut zijn voor primair aluminium. De massa van die smeltverliezen moet gebalanceerd worden met primair aluminium. Immers, het verlies aan secundair aluminium betekent dat er minder secundair aluminium beschikbaar is voor substitutie van primair aluminium. Dit op zijn beurt betekent, aangezien de vraag naar primair aluminium groter is dan de vraag naar secundair aluminium, dat een extra massa primair aluminium gelijk aan de smeltverliezen noodzakelijk is om aan de vraag te voldoen.

## 5.2 Definitie van doel & omvang LCA

Het doel van deze LCA studie is het vergelijken van de ecologische impact van smeltloze recyclage via warmextrusie op industriële schaal met het conventionele recyclageproces via hersmelten. Sensitiviteitsstudies op dit smeltloze recyclageproces dienen als hulpmiddel om het proces op een ecologisch verantwoorde manier te optimaliseren.

De functionele éénheid is een gerecycleerd extrusieprofiel van 1 kg. Uit Hoofdstuk 2 blijkt dat de functionele mechanische eigenschappen van smeltloos gerecycleerde profielen vergelijkbaar zijn met conventioneel gerecycleerde profielen recyclageprocessen via hersmelten, zoals blijkt uit de literatuurstudie. Voor de



éénvoud van deze LCA worden de eigenschappen als equivalent beschouwd. De te vergelijken legering is AA6061, een veelgebruikte aluminiumlegering en representatief voor de experimentele data uit het ASSuRe project.

De beschouwde processen voor de smeltloze recyclage via extrusie zijn : reiniging door het wassen en drogen van spanen, precompactie en extrusie. Voor de recyclage via hersmelten zijn de beschouwde processen : smelten van spanen, legeren, gieten en extrusie. Voor beide routes is ook het transport tussen de verschillende processtappen in rekening gebracht. Tijdens extrusie zal een deel van het materiaal omgezet worden in afval. Deze hoeveelheid kan voor zowel hersmelten als smeltloos recycleren als gelijk aangenomen worden. Recyclage van dit extrusieafval valt buiten de systeemgrenzen van de LCA.

## 5.3 Levenscyclus inventarisatie

### 5.3.1 Reiniging

Zoals vermeld in Hoofdstuk 4 bestaat de reiniging van de spanen uit drie stappen : wassen (ontvetten), spoelen en drogen. Binnen de grenzen van dit systeem valt ook de verwerking van het vervuild was- en spoelwater. Deze LCA bevat twee scenario's : een reinigingsproces zoals gemodelleerd in de EcoInvent database en het reinigingsproces zoals uitgevoerd in het ASSuRe project. In 5.5.2 volgt een derde model met verschillende soorten mogelijke verbeteringen voor het reinigingsproces.

De inventarisatie van het gebruikte EcoInvent proces 'Degreasing, metal part in alkaline bath/RER U' is beschreven in de Simapro Inventory onder 'Processes > processing > Metals > General Manufacturing'. Dit proces bevat de energie en materialen nodig voor een ontvettingsbad. Het verzachten van het water en het transport van de detergent is inbegrepen. Drogen is niet inbegrepen. Ook de infrastructuur is niet inbegrepen.

Elektriciteit is gebruikt voor pompen en ventilatie, het verwarmen van het water gebeurt met gas. De detergent is P3-Saxin van Henkel. De functionele éénheid is het reinigen van 1 m<sup>2</sup> metaaloppervlak (EcoInvent, 2013). Om deze éénheid om te zetten naar de functionele éénheid van één kg in deze LCA, is een schatting van de oppervlakte/ massa ratio van spanen nodig. Hu et al. vermelden de lengte, breedte en dikte van drie verschillende soorten spanen (2008). Uit de berekening van het oppervlak en het volume van deze spanen, gevolgd door de vermenigvuldiging van het volume met het soortelijk gewicht van aluminium (2,7 g/cm<sup>3</sup>), volgt de massa en de oppervlakte/ massa ratio van de drie soorten spanen (Tabel 16).

lengte	breedte	Dikte		volume	Massa	ratio
			oppervlak			
[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[kg]	[kg/m <sup>2</sup> ]

5	4	1,5	40	30	$8,1 \cdot 10^{-5}$	2,025
13	2	0,5	52	13	$3,5 \cdot 10^{-5}$	0,675
6,5	2	0,2	26	2,6	$7,1 \cdot 10^{-6}$	0,27
Gemiddelde :						0,99

**Tabel 16: Oppervlakte/ massa ratio van spanen met verschillende dimensies**

Gebaseerd op dit gemiddelde is aangenomen dat het oppervlak van 1 kg spanen overeenkomt met  $1 \text{ m}^2$ . Dit komt overeen met de aanname van Duflou et al. (2015).

De grote spreiding op deze ratio, variërend van 0,27 tot 2,025 over drie datapunten, maant aan tot voorzichtigheid bij het gebruik van de gemiddelde waarde. Verder blijkt echter dat de impact van dit proces uit de literatuur zo laag is dat het niet nodig is om de sensitiviteit van het eindresultaat op deze ratio te onderzoeken.

De inventarisatie van het reinigingsproces zoals uitgevoerd in het ASSuRe project is beschreven in Tabel 17. De algemene opzet van het proces is reeds beschreven in Sectie 4.3.

naam	hoeveelheid	éénheid
<i>Input</i>		
Electricity, medium voltage, production BE, at grid/BE U	1,336	kWh
Natural gas, burned in industrial furnace >100kW/RER U	0,14	kWh
Wigol VR X 74 S	0,4	Kg
Tap water, at user/RER U	20	Kg
<i>Output</i>		
Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH U	20	Kg

**Tabel 17: inventarisatie van het ASSuRe reinigingsproces**

De gebruikte hoeveelheden water en reinigingsmiddel volgen rechtstreeks uit de hoeveelheden geconsumeerd in de ASSuRe test. De modellering van het reinigingsmiddel is te vinden in Appendix E.

De nodige energie valt uiteen in drie delen. De elektriciteit nodig om het water op te warmen is berekend uit de theoretische warmtecapaciteit van water. De elektriciteit nodig voor de mengtrommels is gemeten. De gasconsumptie van de oven is geschat op basis van gegevens van de fabrikant. Al deze materiaal- en energieberekeningen zijn beschreven in Sectie 4.3.

Voor afvalwaterbehandeling is geen experimentele data beschikbaar. De behandeling is gemodelleerd naar het EcoInvent proces 'Degreasing, metal part in alkaline bath/RER U'. Positieve effecten door het teruggeven van gezuiverd water aan de natuur zijn niet in rekening gebracht.

### 5.3.2 Precompactie

Precompactie is ecologisch gezien een zeer éénvoudig proces. Op een te verwaarlozen zeer kleine hoeveelheid smeerolie na, is er geen gebruik van grondstoffen. De enige te modelleren parameter voor de LCA studie is de nodige energie om de spanen samen te persen. Drie verschillende waarden voor de energie worden beschouwd.

De eerste waarde is een referentiewaarde uit de literatuur. Güley voerde precompactietesten uit voor de smeltloze recyclage van aluminium via warmextrusie. In zijn PhD thesis vermeldt hij een nodige energie van 0,83 kWh/kg (2014).

De twee andere waarden zijn experimenteel bepaalde waarden, zoals beschreven in Sectie 4.4.2. Ze bepalen een schatting voor een ondergrens van 0,35kWh/kg en bovengrens van 1,13 kWh/kg voor de werkelijk nodige energie voor precompactie via het in het ASSuRe project gebruikte precompactieproces. Appendix E geeft de invoer in Simapro weer van deze verschillende scenario's voor het precompactieproces. Voor het modelleren van de impact van het ASSuRe proces is 1,13 kWh/kg in rekening gebracht, rekening houdend met al het latente energieverbruik tijdens het experiment.

### 5.3.3 Extrusie

Warmextrusie is meer dan een billet door een extrusiematrijs persen. De billet moet op het juiste formaat gezaagd worden, opgewarmd worden, net als de machine, en krijgt daarna meestal nog een warmtebehandeling. Gedurende dit proces is er veel aluminium afval. De EAA brengt al deze subprocessen in rekening in de levenscyclus inventarisatie die zij gepubliceerd hebben in 2013 op basis van een enquête in 2010 die 32% van de Europese productie omvat (EAA, 2013). In deze LCA is enkele gebruik gemaakt van deze gegevens omdat de extrusietest op industriële schaal binnen het ASSuRe project nog niet uitgevoerd was bij het publiceren van de thesis (Appendix E). De EAA vermeldt ook dat 1,324 kg aluminium nodig is om 1 kg extrusieprofiel te maken (2013). Deze massabalans is gevolgd in de LCA studie.

### 5.3.4 Transport

Het in rekening brengen van de ecologische impact van transport gebeurt via het aantal tonkilometer die de spanen afleggen. Een tonkilometer komt overeen met het transport van één ton over één kilometer. Deze LCA studie beschouwt drie scenario's: een transportproces voor aluminium afval zoals gemodelleerd in Ecoinvent, een proces zoals het is uitgevoerd in het ASSuRe project en een meer realistisch scenario.

Het desbetreffende Ecoinventproces is 'aluminium scrap, new, at plant/RER U'. Dit geeft een gemiddelde waarde voor de hoeveelheid transport van aluminium afval tussen afvalproducent en het hersmelten van dit aluminium afval. Het bestaat zowel uit een component spoorvervoer (0,2tonkm) als een component vrachtwagenvervoer (0,1tonkm). De inventarisatie is beschreven in de Simapro Inventory onder 'Processes > Material > Metals > Waste metals.

Het zelfgemodelleerde proces bestaat enkel uit vervoer met een vrachtwagen. Voor het ASSuRe project bedraagt dat vervoer 0,4728 tonkm per kg spanen, gelijk aan de afstand voor de ritsequentie Vasco – E-Max – MolCy – E-Max – Vasco. Het realistischere proces veronderstelt dat alle processtappen bij E-Max gebeuren en dat enkel transport van en naar het bedrijf dat spanen produceert moet gebeuren. Met Wuyts - E-Max – Wuyts als referentieritsequentie bedraagt het vervoer 0,169 tonkm per kg spanen. Appendix E beschrijft de verschillende scenario's.

### 5.3.5 Hersmelting

Ter vergelijking met het smeltloze recyclageproces is het hersmeltproces ook in rekening gebracht in deze studie. Het proces 'Aluminium, secondary, from new scrap, at plant/RER U' in de EcoInvent database beschrijft het recycleren van nieuw aluminium afval tot een billet via hersmelten (EcoInvent, 2013). Dit omvat ook transport, maar in deze LCA is dat eruit gehaald omdat transport reeds in rekening is gebracht (Sectie 5.3.4). Om de functionele éénheid te bekomen zijn naast dit proces nog twee gegevens nodig. Eerst het extrusieproces, aangezien de functionele éénheid 1kg extrusieprofiel is en niet 1kg billet. Dit extrusieproces is analoog aan 5.3.3 gemodelleerd op basis van gegevens van het EAA (2013). Het tweede nodige gegeven is de hoeveelheid smeltverliezen. Eén van de hoofdredenen om smeltloos te recycleren is het grote verlies aan aluminiummassa bij het hersmelten van spanen door oxidatie omwille van de grote oppervlakte/ volumeverhouding. Immers, gewone verliezen als procesafval tijdens de productie van aluminium kunnen weer gerecycleerd worden tot secundair aluminium. Smeltverliezen daarentegen zijn onherroepelijk verloren. De EcoInvent database brengt deze smeltverliezen niet in rekening en onderschat daardoor de ecologische impact van het recycleren via hersmelten. Op basis van literatuur en gegevens van partners uit het ASSuRe project kunnen deze verliezen ingeschat worden.

Voor het rechtstreeks hersmelten vermelden Duflou et al. tot 25% verlies (2015). Gronostajski et al. vermelden een verlies van 20% (1999). Ook Samuel vermeldt een verlies van 22% (2003). De ASSuRe partners vermelden een verlies van 20-25%. In deze LCA studie is dit verlies met een gemiddelde waarde gemodelleerd als een verlies van 22,5%.

Omdat rechtstreeks smelten van spanen tot zeer grote verliezen leidt, gebruikt men in de industrie soms twee methodes om de verliezen te beperken. De eerste methode is het briketteren, of samenpersen van spanen tot kleine cilinders die een kleinere oppervlakte/ volumeverhouding hebben. De ASSuRe partners vermelden een aluminiumverlies van 15% na het hersmelten van briketten op basis van spanen. In deze LCA studie is dat verlies gemodelleerd als 15%, met een bijkomende impact van een schatting van de nodige energie voor het briketteren. Stansz, een Nederlandse fabrikant van briketteerpersen, vermeldt een aluminiumdebiet van 325kg/u voor de 'Maxi' pers uit hun gamma, met een vermogen van 22kW (Stansz Environment

Systems, 2015). Het bijkomende energieverbruik voor het briketteren van de spanen is bijgevolg gemodelleerd als 0,07kWh/kg.

De tweede methode is het gebruiken van een zoutflux die de oxidatie vermindert. Xiao et al. vermelden verliezen na het hersmelten met een zoutflux van 5% tot 16%, afhankelijk van het type spanen (2002). Per kg spanen gebruiken ze 2kg zout. In deze LCA studie is dat verlies met een gemiddelde waarde gemodelleerd als een verlies van 10,5%, met de bijkomende impact van de 2kg zout (NaCl) per kg spanen.

De substitutiemethode vraagt om deze smeltverliezen in rekening te brengen door het bijvoegen van een hoeveelheid primair aluminium gelijk aan de smeltverliezen. De toegevoegde hoeveelheid aluminium is gemodelleerd als de gebruikte aluminiumlegering in het ASSuRe project, AA6061, met de hoeveelheden legeringselementen in het midden van het tolerantie interval voor deze legering. Appendix E beschrijft de legeringssamenstelling en de balancerings met primair aluminium voor elk van de processen.

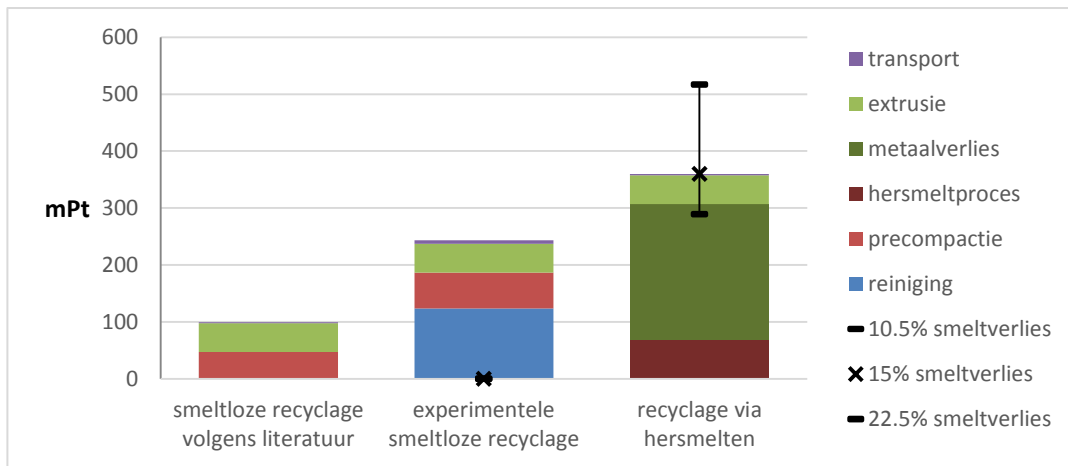
### 5.3.6 Inventarisatie van het volledige proces

Na de inventarisatie van alle deelprocessen van smeltloze recyclage en hersmelten, rest enkel nog het samenvoegen van alle processen. Drie omvattende totaalprocessen worden vergeleken: een smeltloos recyclageproces, gebaseerd op bestaande processen in EcoInvent en waarden uit de literatuur, het ASSuRe smeltloos recyclageproces, zoals het in werkelijkheid is uitgevoerd in het ASSuRe project en het proces via hersmelten, zoals gebaseerd op de data uit Ecoinvent. Voor dit hersmeltp proces worden meteen drie scenario's voor de smeltverliezen in rekening gebracht: 22,5%, 15% (met briketteren) en 10,5% (met zoutflux), zoals vermeld in 5.3.4. Appendix E beschrijft de inventarisatie van deze drie scenario's en al hun deelprocessen in tabelvorm. De in 5.3.1 – 5.3.5 beschreven varianten op de waarden van de deelprocessen die niet zijn opgenomen in deze scenario's worden in Sectie 5.5 besproken als sensitiviteit op de impact van wijzigingen aan het proces.

## 5.4 Beoordeling en interpretatie van de levenscyclusimpact.

### 5.4.1 Eindpunt niveau

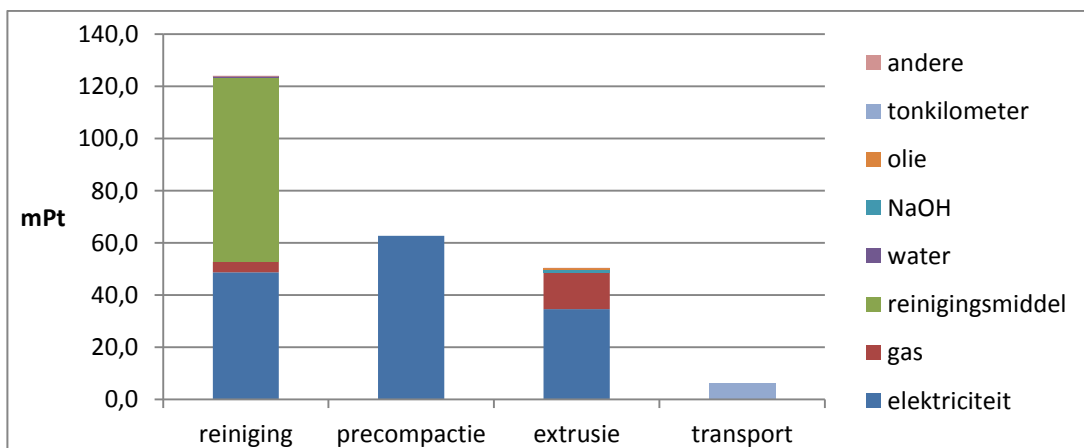
De Recipe Europe H/A methode kan de totale ecologische impact van de drie processen voorstellen met een enkelvoudige score op eindpunt niveau. Figuur 13 stelt die ecologische impact voor. Smeltloze recyclage heeft een beduidend lagere impact dan recyclage via hersmelten. Gebaseerd op de literatuur ligt die tot 5 keer lager dan hersmelten. De impact van smeltloze recyclage uitgevoerd tijdens het ASSuRe project is 2,5 keer hoger dan die impact uit de literatuur. Zelfs met die verre van efficiënte processen uit het ASSuRe project is de impact ongeveer 15% lager dan de minst belastende manier om te hersmelten, waarbij slechts 10,5% smeltverlies optreedt.



**Figuur 13: Vergelijking ecologische impact op eindpuntniveau**

De lagere ecologische impact van smeltloze recyclage is bijna volledig toe te schrijven aan het vermijden van de smeltverliezen. De hoge smeltverliezen zijn het gevolg van de grote oppervlakte/ volumeverhouding van het hier in beschouwing genomen verspaningsafval. Bij ander aluminium afval zijn die smeltverliezen meestal lager. Sectie 5.5.1 onderzoekt de sensitiviteit van het verschil in impact tussen de verschillende recyclageprocessen op de hoeveelheid smeltverliezen. Bij de grote verliezen van 22,5%, overeenkomend met hersmelten van spanen zonder briketteren of zoutflux, loopt de impact op tot 542mPt.

De grotere impact van de experimentele recyclage versus smeltloze recyclage uit de literatuur is bijna volledig toe te schrijven aan de impact van de reiniging zoals uitgevoerd tijdens ASSuRe. Het is duidelijk dat dit ASSuRe proces best nog verbeterd wordt. Figuur 14 geeft de impact van alle experimenteel uitgevoerde ASSuRe deelprocessen weer, als visueel hulpmiddel bij het zoeken naar de oorzaken van de hogere impact van het experimentele ASSuRe proces.



**Figuur 14: impact van de deelprocessen bij de experimentele smeltloze recyclage**

De reinigingsstap veroorzaakt ongeveer de helft van de totale experimentele impact terwijl de impact van de reiniging gebaseerd op de Ecoinvent database zeer laag is. Het experimentele reinigingsproces is duidelijk overgedimensioneerd. Ruim de helft van de impact van de reiniging is het gevolg van de ingrediënten van het reinigingsmiddel, de rest is grotendeels afkomstig van het opwarmen van het reinigingswater. Sectie 5.5.2 bespreekt de sensitiviteit van wijzigingen in het gebruik van reinigingsmiddel en reinigingswater op de totale impact. Het elektriciteits-verbruik tijdens precompactie en extrusie vormt ook een belangrijk deel van de totale impact. Sectie 5.5.3 bespreekt de sensitiviteit van wijzigingen in de hoeveelheid precompactie-energie op de totale impact. Extrusie is niet experimenteel bepaald, er kon dus geen sensitiviteit op proceswijzigingen onderzocht worden. Transport bedraagt minder dan 5% van de totale impact. Bijgevolg is geen verdere sensitiviteitsanalyse gedaan over dit transport.

#### 5.4.2 Midpunt niveau

De vergelijking van meerdere processen op eindpunt niveau is éénvoudig omdat een enkelvoudige score de impact voorstelt. Echter, om tot een enkele score te komen moeten heel wat veronderstellingen gemaakt worden. Het resultaat is bijgevolg redelijk onzeker. Midpunt niveau stelt de impact voor volgens 18 categorieën, zonder normalisaties, wegingsfactoren en andere dergelijke assumpties (Tabel 18). Een rechtstreekse vergelijking tussen de verschillende midpunt-categorieën is niet mogelijk omdat ze andere éénheden hebben. De precieze betekenis van elke éénheid is voor deze analyse niet belangrijk. Wel is een vergelijking binnen elke midpunt categorie een goede manier om de in Sectie 5.4.1 besproken impact te verifiëren. Daarbij komt dat, waar eindpunt meer schadegericht is, midpunt goed is om te focussen op het precieze probleem, wat helpt bij het verbeteren van processen.

Impactcategorie	Eénheid	SRL	SRE	RH 10,5%	RH 15%	RH 22,5%
Klimaatverandering	kg CO2 eq	$1,19 \cdot 10^0$	$1,66 \cdot 10^0$	$3,68 \cdot 10^0$	$4,53 \cdot 10^0$	$6,50 \cdot 10^0$
Aantasting ozonlaag	kg CFC-11 eq	$7,51 \cdot 10^{-8}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$	$2,66 \cdot 10^{-7}$	$3,18 \cdot 10^{-7}$	$4,32 \cdot 10^{-7}$
Verzuring van land	kg SO2 eq	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$
Zoetwater eutroficatie	kg P eq	$1,16 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$
Mariene eutroficatie	kg N eq	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$7,01 \cdot 10^{-4}$	$3,81 \cdot 10^{-4}$	$3,18 \cdot 10^{-4}$	$4,57 \cdot 10^{-4}$
Menselijke toxiciteit	kg 1,4-DB eq	$4,08 \cdot 10^{-2}$	$5,14 \cdot 10^{-2}$	$2,03 \cdot 10^{-1}$	$2,80 \cdot 10^{-1}$	$4,42 \cdot 10^{-1}$
Vorming fotochem. oxidanten	kg NMVOC	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$3,80 \cdot 10^{-3}$	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$8,76 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$
Vorming van deeltjes	kg PM10 eq	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$4,80 \cdot 10^{-3}$	$6,44 \cdot 10^{-3}$	$9,92 \cdot 10^{-3}$
Exotoxiciteit van land	kg 1,4-DB eq	$2,99 \cdot 10^{-5}$	$4,23 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$
Zoetwater ecotoxiciteit	kg 1,4-DB eq	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$3,11 \cdot 10^{-4}$	$6,34 \cdot 10^{-4}$	$8,23 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$
Mariene ecotoxiciteit	kg 1,4-DB eq	$4,85 \cdot 10^{-4}$	$6,75 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-3}$	$3,61 \cdot 10^{-3}$
Ioniserende straling	kBq U235 eq	$2,70 \cdot 10^{-1}$	$4,38 \cdot 10^{-1}$	$3,72 \cdot 10^{-1}$	$4,42 \cdot 10^{-1}$	$5,76 \cdot 10^{-1}$
Bezetting van landbouwland	m2a	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$2,40 \cdot 10^{-2}$	$2,72 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-2}$
Bezetting van stadsland	m2a	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$6,77 \cdot 10^{-3}$	$8,48 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$
Transformatie natuurlijk land	m2	$7,62 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$8,47 \cdot 10^{-6}$	$8,64 \cdot 10^{-6}$	$6,41 \cdot 10^{-6}$
Uitputting van water	m3	$7,66 \cdot 10^0$	$9,40 \cdot 10^0$	$5,60 \cdot 10^1$	$8,01 \cdot 10^1$	$1,28 \cdot 10^2$
Uitputting van metaal	kg Fe eq	$7,73 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$7,90 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-1}$	$1,91 \cdot 10^{-1}$
Uitputting fossiele brandstoffen	kg oil eq	$3,42 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^{-1}$	$8,39 \cdot 10^{-1}$	$1,02 \cdot 10^0$	$1,45 \cdot 10^0$

**Tabel 18: vergelijking impact op midpunt niveau: SRL= smeltloze recyclage op basis van literatuur, SRE= experimentele smeltloze recyclage, RH= recyclage via hersmelten**

In 16 van de 18 impactcategorieën heeft smeltloze recyclage, volgens processen uit de literatuur, de laagste impact van de vijf beschouwde processen. Dit bewijst dat smeltloze recyclage, ook op het meer zekere midpunt niveau, een duidelijk lagere impact heeft dan conventionele recyclage. De impact van de experimentele smeltloze recyclage is in de meeste categorieën significant hoger dan de waarden uit de literatuur maar meestal nog steeds significant lager dan recyclage via hersmelten. Uitputting van metaal, menselijke toxiciteit en maritieme ecotoxiciteit zijn de categorieën met de grootste impactreductie als gevolg van smeltloze recyclage, met een 10 tot 30 maal verlaagde impact. Slechts in drie categorieën doet de experimentele smeltloze recyclage het slechter dan recyclage via hersmelten: ioniserende straling, zoetwater eutroficatie en transformatie van natuurlijk land.

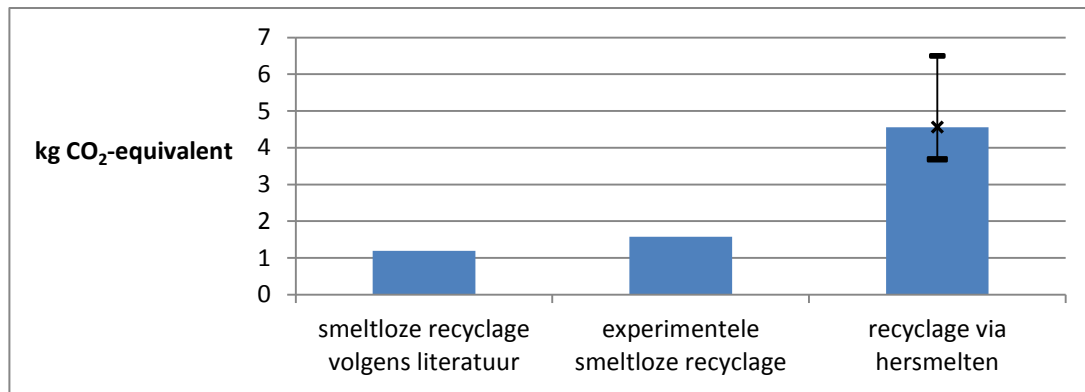
50% van de impact van de ioniserende straling komt van de elektriciteit nodig om het reinigingswater op te warmen. Dit water één- tot tweemaal hergebruiken leidt tot een vergelijkbare impact van ioniserende straling met hersmeltprocessen. Eutroficatie is vooral het gevolg van de fosfaten in het reinigingsmiddel. Na procesverbeteringen die een reductie van de hoeveelheid reinigingsmiddel beloven (Sectie 5.5.4) ligt de impact van eutroficatie lager dan bij hersmeltprocessen. Transformatie van natuurlijk land is de enige indicator waar het ASSuRe proces zeer slecht op scoort, met een 20 maal grotere impact dan alle andere processen. 95% van die impact is het gevolg van de gebruikte hoeveelheid reinigingsmiddel. De grondstofwinning voor dit reinigingsmiddel neemt immers land in beslag. Een sterke vermindering van het gebruik van reinigingsmiddel is dus aan te raden om het niveau van deze impact meer vergelijkbaar te maken met de andere recyclagemethodes.

Deze analyse op midpunt niveau wijst erop dat de lagere impact van smeltloze recyclage niet vertekend is door de veronderstellingen nodig om tot een enkelvoudige score op eindpuntniveau te komen. Mits het doorvoeren van enkele procesverbeteringen tegenover de experimentele recyclage is de impact van smeltloze recyclage voor 16 van de 18 categorieën lager dan de impact bij hersmelten. Voor mariene eutroficatie is de impact van smeltloze recyclage niet lager maar vergelijkbaar. Enkel voor transformatie van natuurlijk land scoort smeltloze recyclage minder goed.

#### 5.4.2.1 Klimaatverandering en broeikasgassen

Verdedigers van recyclage van aluminium vermelden bijna altijd de lage broeikasgasuitstoot, uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalenten. Vanuit de huidige wereldwijde klimaatproblematiek is een lage broeikasgasuitstoot een argument dat invloed heeft op beslissingen van overheid en bedrijven. Vandaar is het wenselijk voor deze thesis om de broeikasgasuitstoot expliciet te specificeren. Eén van de Recipe midpuntcategorieën is de impact op de klimaatverandering (Tabel 18). Die impact, uitgedrukt in kilogram CO<sub>2</sub>-equivalenten, geeft rechtstreeks de broeikasgasuitstoot van de verschillende recyclageprocessen. Figuur 15 verduidelijkt visueel dat de broeikasgasuitstoot van hersmelten een 2,2 tot 5,4 keer groter is dan de impact van smeltloze recyclage.





**Figuur 15: Vergelijking van de broeikasgasuitstoot**

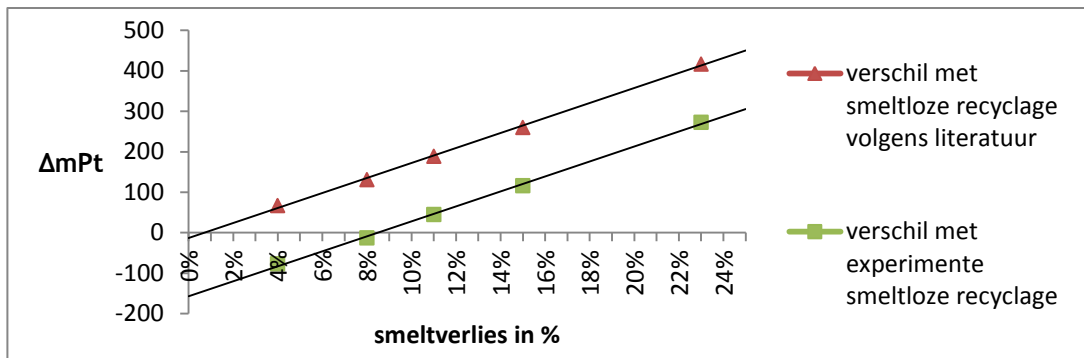
## 5.5 Sensitiviteitsanalyse: de impact van gewijzigde processen

### 5.5.1 Smeltverliezen

Smeltloze recyclage, zowel volgens de literatuur als experimenteel, heeft een lagere impact dan recyclage via hersmelten, voornamelijk het gevolg van de grote smeltverliezen. De drie scenario's, met smeltverliezen van 10,5%, 15% en 22,5%, gaan allemaal over verspaningsafval. Deze sensitiviteitsanalyse wil kijken of het ook ecologisch voordeliger is om hoogwaardiger afval met minder hoge smeltverliezen, bijvoorbeeld platen of extrusieafval, smeltloos te recyclen. In de veronderstelling dat het recyclageproces niet verandert bij het recyclen van meer hoogwaardige afvalstromen met lagere smeltverliezen geeft Figuur 16 het resultaat van deze analyse weer. Op de abscis is de hoeveelheid smeltverliezen weergegeven, op de ordinaat het verschil in ecologische impact tussen recyclage via hersmelten en smeltloze recyclage, zowel experimenteel als volgens de literatuur.

Smeltloze recyclage, gebaseerd op gedocumenteerde processen, is vanuit ecologisch oogpunt altijd beter dan recyclage via hersmelten, zelfs voor aluminium afval dat lage smeltverliezen genereert. Het verschil in impact wordt pas 0 bij een smeltverlies van iets meer dan 0%, wat onmogelijk is aangezien er altijd oxidatie optreedt bij het hersmelten van aluminium.

De experimentele smeltloze recyclage was vanuit een ecologisch oogpunt verre van optimaal. Figuur 16 maakt duidelijk dat bij een grenswaarde iets hoger dan 8% smeltverliezen, de experimentele smeltloze recyclage niet beter is dan recyclage via hersmelten. Gemiddeld aluminium afval heeft een smeltverlies van gemiddeld 4% en is dus niet voordelig smeltloos te recyclen op de ASSuRe manier (EAA, 2013). Ook sommige fracties van spanen met zoutflux hersmolten hebben smeltverliezen lager dan 8% (Xiao et al., 2002). Echter, het is mogelijk om de impact van het experimentele smeltloze recyclageproces sterk te verlagen met de efficiëntie-verbeteringen beschreven in het vervolg van Sectie 5.5.



**Figuur 16: Sensitiviteit van het verschil tussen de impact van hersmelten en smeltloze recyclage op de smeltverliezen**

### 5.5.2 Reiniging

De impact van reiniging bedraagt de helft van de totale impact van het ASSuRe proces. De hoeveelheden water en reinigingsmiddel zijn zeer conservatief. Dit belooft een groot potentieel voor de verlaging van de impact door het verminderen van de hoeveelheid reinigingsmiddel, het recycleren van het reinigingswater of het verlagen van de temperatuur van het spoelwater. Na bespreking van deze optimalisaties apart volgen 2 scenario's die verschillende optimalisaties van het reinigingsproces combineren. Uiteraard is de ecologische optimalisatie van de reinigungsstap beperkt door de functionaliteit van de reiniging. Appendix F bespreekt hoe getest kan worden of de reiniging onder elk van deze meer ecologische scenario's nog voldoende is.

#### 5.5.2.1 Reinigingsmiddel

Zoals vermeld in 4.3.1 is de gebruikte concentratie Wigol VR X 74 S van 4% hoger dan de door de fabrikant aanbevolen concentratie van 0,5–3%. Aangezien een fabrikant de incentive heeft om een concentratie aan te raden die zeker voldoende is, is er zeer waarschijnlijk geen nadelige invloed op de reiniging bij het verlagen van de concentratie. Bij het constant houden van alle andere parameters bestaat er een lineair verband tussen de totale impact van smeltloze recyclage en de concentratie reinigingsmiddel in het spoelwater. Bij de experimenteel gebruikte concentratie bedraagt de totale impact 244mPt, bij een concentratie van 0,5% bedraagt de impact slechts 182mPt. De richtingscoëfficiënt ( $a_r$ ) en het intercept ( $b_r$ ) van de rechte die de sensitiviteit van de impact (in mPt) op de concentratie reinigingsmiddel (in %) beschrijft kan bepaald worden aan de hand van onderstaand stelsel van vergelijkingen:

$$\begin{aligned} 244 &= 0,04 * a + b \\ 182 &= 0,005 * a + b \end{aligned}$$

$$a_r = 1771, b_r = 17314$$

Dit is een zeer grote sensitiviteit, een vermindering van de totale ecologische impact met 25% is mogelijk, enkel door de concentratie reinigingsmiddel te verlagen binnen de normen van de fabrikant.

### 5.5.2.2 Recyclage water

Voor elke batch is een nieuwe hoeveelheid reinigingswater en spoelwater gebruikt, om helemaal zeker te zijn van een optimale reiniging. In werkelijkheid, bij eerder licht vervuilde industriële spanen, zal het reinigingswater meerdere keren opnieuw gebruikt kunnen worden voor een onvoldoende reiniging van spanen opgemerkt kan worden. Meerdere batches spanen met hetzelfde water reinigen heeft een veel lagere impact. Dit betekent immers zowel een lagere totale massa water die opgewarmd moet worden als een lagere totale hoeveelheid reinigingsmiddel nodig.

Dit niet lineaire verband tussen de totale impact van smeltloze recyclage en het aantal keer dat het reinigingswater gebruikt wordt is beschouwd tot 5 keer hergebruiken, in de veronderstelling dat alle andere parameters constant blijven. Het spoelwater wordt niet hergebruikt. De nodige energie om het water op te warmen is gedurende de eerste cyclus van een batch reinigingswater nog steeds 0,64 kWh/kg spanen. In de daaropvolgende cycli hoeft echter slechts opgewarmd te worden van 50°C naar 70°C. Dit geeft een gemiddelde nodige energie per batch van :

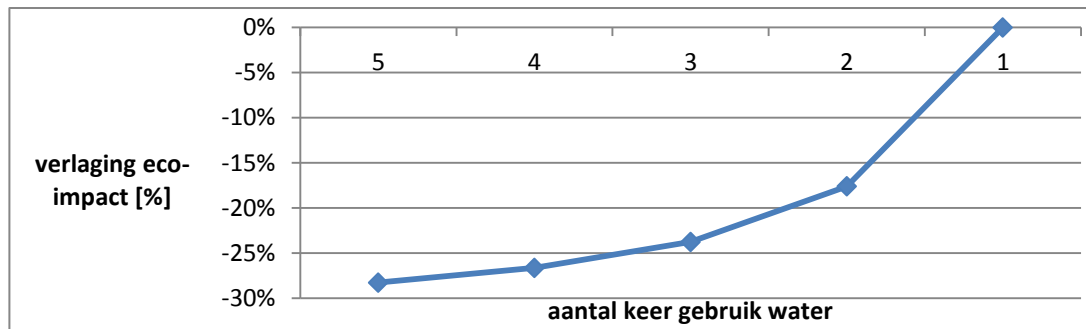
$$E_{\text{water recycleren}} = \frac{1 * 0,64 \text{ kWh} + (X - 1) * 10 \text{ kg} * 20^{\circ}\text{C} * 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{C}} * \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}}}{X}$$

Hierbij is X het aantal keer dat het reinigingswater gebruikt wordt alvorens het te vervangen. Dit geeft bijgevolg een niet lineaire vermindering van de nodige energie. Tabel 19 vat de waarden voor de hoeveelheid reinigingsmiddel, elektriciteit en water per cyclus samen.

aantal keer gebruik water	5	4	3	2	1
elektriciteit waswater [kWh]	0,31	0,33	0,37	0,44	0,64
elektriciteit spoelwater [kWh]	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
electriciteit molen [kWh]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
<b>totale elektriciteit [kWh]</b>	<b>1,01</b>	<b>1,03</b>	<b>1,06</b>	<b>1,13</b>	<b>1,34</b>
<b>reinigingsmiddel [kg]</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,13</b>	<b>0,20</b>	<b>0,40</b>
waswater [kg]	2	2,5	3,33	5	10
spoelwater [kg]	10	10	10	10	10
<b>totaal water [kg]</b>	<b>12</b>	<b>12,5</b>	<b>13,33</b>	<b>15</b>	<b>20</b>

**Tabel 19: Hoeveelheid water, energie en reinigingsmiddel bij hergebruik reinigingswater**

Uit Tabel 19 is reeds duidelijk dat de marginale vermindering in elektriciteit, reinigingsmiddel en watergebruik steeds kleiner wordt per bijkomende hergebruikstap. Dit vertaalt zich ook in een steeds kleinere marginale vermindering in de ecologische impact, wat duidelijk te zien is in Figuur 17. De totale ecologische impact van het experimentele recyclageproces is met meer dan 25% te verminderen door het water een aantal keer te hergebruiken.



**Figuur 17: Sensitiviteit van de eco-impact op het hergebruik van het reinigingswater**

Het spoelwater recycleren is ook mogelijk. Echter, dat geeft enkel een verlaging in ecologische impact ten gevolge van de lagere nodige energie en heeft geen invloed op de hoeveelheid gebruikt reinigingsmiddel. De verlaging van de totale ecologische impact ten gevolge van het recycleren van het spoelwater is dus redelijk klein. Bovendien is het vanuit functioneel reinigingsoogpunt waarschijnlijk nodig om telkens nieuw spoelwater te gebruiken om volledig te kunnen reinigen. Daarom is deze mogelijkheid niet verder onderzocht.

#### 5.5.2.3 Temperatuur water verlagen

De fabrikant raadt aan om het reinigingsmiddel te gebruiken in water met een temperatuur tussen de 50°C en 85°C. Aangezien het reinigingswater tijdens het reinigen in de ASSuRe test reeds afkoelt tot 50°C, is de enige mogelijkheid om dit minder op te warmen binnen de normen van de fabrikant, het beter isoleren van de reinigingsmachine. Dit isoleren zal echter slechts verminderingen in de nodige energie van rond de 10% inhouden, niet voldoende om nu reeds op te focussen. Er is dus weinig potentieel om de temperatuur van het reinigingswater te verlagen.

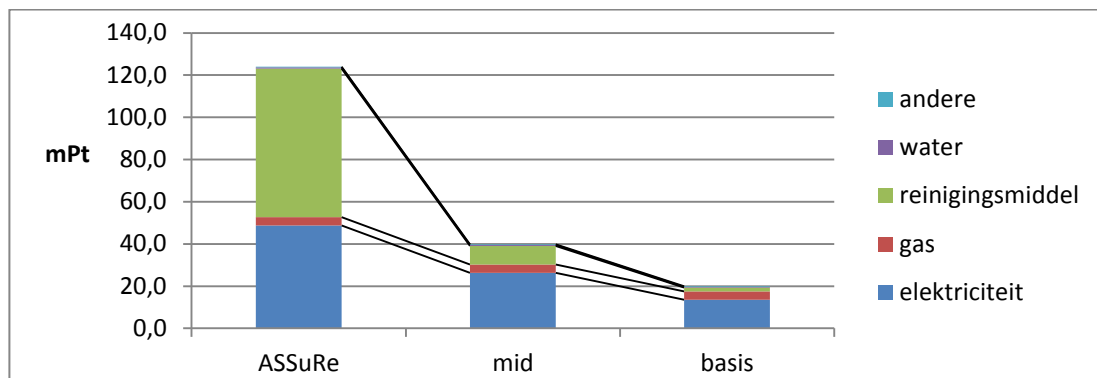
Wel is er de mogelijkheid om het spoelwater minder op te warmen of zelfs helemaal niet op te warmen. Een studie over metaalontvetting en oppervlaktereiniging in Vlaanderen stelt dat spoelwater meestal niet verwarmd wordt (Bogaert, 2002). Spoelen met water op leidingtemperatuur zorgt voor een niet onaanzienlijke vermindering van de totale ecologische impact van de experimentele smeltloze recyclage met 7% tot 227mPt, alle andere parameters constant.

#### 5.5.2.4 Enkele ecologische scenario's

Bij het verbeteren van de reinigungsstap zal men zich uiteraard niet beperken tot het verbeteren van één van de bovenstaande parameters. De opdracht voor onderzoekers is zoeken naar de beste combinatie van ecologische verbeteringen die nog steeds een voldoende reiniging als gevolg hebben. Om een idee te geven wat een combinatie van verbeteringen doet met de totale ecologische impact, wordt de impact van een scenario met de combinatie van parameters die de laagst mogelijke impact veroorzaakt vergeleken met een gemiddeld scenario.

Het lage impact scenario gebruikt een concentratie reinigingsmiddel van 0,5%, gebruikt het reinigingswater vijf keer alvorens het te vervangen en spoelt met water op leidingtemperatuur. Het gemiddelde impact scenario gebruikt een concentratie reinigingsmiddel van 1,5%, gebruikt het reinigingswater drie keer alvorens het te vervangen en spoelt met lauw water op 40°C. De impactvermindering tegenover de impact van het volledige proces zoals uitgevoerd in het ASSuRe project is zeer groot. Terwijl de totale impact van de ASSuRe recyclage 244mPt/kg is, is die voor het mid-scenario slechts 159mPt/kg en voor het basisscenario 140mPt/kg.

Figuur 18 verduidelijkt de oorzaken van deze verbetering nog eens: een zeer sterke reductie in de impact van het reinigingsmiddel samen met een sterke reductie in de nodige elektriciteit.



**Figuur 18: Eco-impact van de reiniging onder verschillende scenario's**

### 5.5.3 Precompactie

De hoeveelheid precompactie-energie in rekening gebracht voor het ASSuRe proces is een bovengrens van 113kWh/kg op de totale nodige precompactie-energie. Ze brengt immers de energie voor het precompacteren zelf zowel als de energie van het stationair draaien tijdens het vullen van de precompactiecylinder. Dat vullen gebeurde op een nogal inefficiënte wijze. De ondergrens (0,35kWh), die enkel de energie voor het precompacteren zelf in rekening brengt, heeft 70% minder elektriciteit nodig, wat resulteert in een verlaging van de totale impact met 18% tot 201mPt. De richtingscoëfficiënt ( $a_p$ ) en het intercept ( $b_p$ ) van de rechte die de sensitiviteit van de ecologische impact (in mPt) op de precompactie-energie (in kWh) bedragen:

$$a_p = 55,5, b_p = 181,3$$

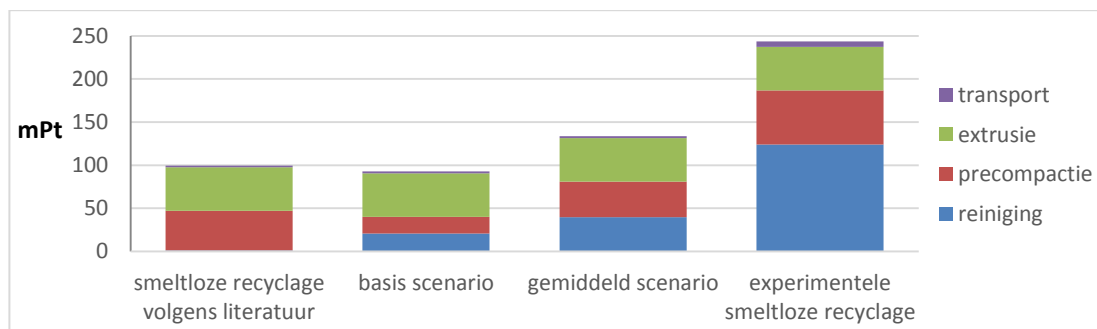
In een realistisch scenario ligt de nodige energie ergens tussen onder- en bovengrens en verlaagt de ecologische impact van ASSuRe recyclage met ongeveer 10%.

### 5.5.4 Reflectie op de impact

Uit Sectie 5.4 blijkt dat de impact van smeltloze recyclage lager is dan recyclage via hersmelten, maar dat het experimentele proces ecologisch veel belastender is dan

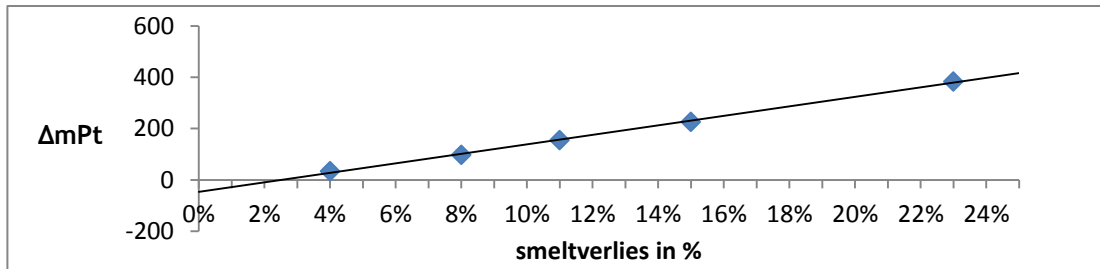
smeltloze recyclage gebaseerd op gepubliceerde waarden. Deze waarden, uit de EcoInvent database en van de EAA, zijn echter gemiddelde waarden van de deelprocessen, niet specifiek voor smeltloze recyclageprocessen. Voor industriële toepassing zal de impact van het experimentele proces sterk verlaagd worden door de verbeteringen uit Secties 5.5.2 en 5.5.3. Voor de vergelijking met het hersmelten is het bijgevolg aangewezen een derde scenario te gebruiken, namelijk het experimentele proces aangepast met een combinatie van doerbare procesverbeteringen. Dit scenario bestaat uit het gemiddeld scenario van de reiniging uit 5.5.2.4, een middenwaarde voor de precompactie-energie uit 5.5.3 en het realistische transportproces uit 5.3.4. Daarnaast beschouwt een basisproces de grootst mogelijke impactreductie van het experimentele proces louter door procesverbeteringen, zonder andere processen te gebruiken. Dit basisproces bestaat uit het basisscenario van de reiniging, de ondergrens voor de precompactie energie en het realistische transportproces.

Figuur 19 zet de totale ecologische impact uit van smeltloze recyclage volgens de literatuur, volgens een basisscenario en volgens een gemiddeld scenario samen met de werkelijke experimentele impact. Het gemiddelde scenario heeft een impact van 134 mPt/kg, bijna de helft van de experimentele impact en vergelijkbaar met de waarden uit de literatuur. Het basisscenario heeft zelfs een impact iets lager dan het scenario volgens de literatuur. De voorgestelde procesverbeteringen hebben dus een groot effect. Het gemiddeld scenario is verder in deze thesis de referentie voor vergelijking met recyclage via hersmelten.



**Figuur 19: Totale eco-impact onder verschillende scenario's**

In Sectie 5.5.1 was het nog niet mogelijk een éénduidig besluit te trekken over de laagste hoeveelheid smeltverliezen waarbij smeltloze recyclage nog een lagere impact heeft dan recyclage via hersmelten. Aan de hand van het gemiddelde referentiecenario is dit wel mogelijk (Figuur 20). Pas bij smeltverliezen lager dan 2,5% is de impact van smeltloze recyclage niet meer lager dan de impact van recyclage via hersmelten. Bij een gemiddeld smeltverlies van 4% voor aluminiumrecyclage (EAA, 2013) is het dus voor het meeste aluminium afval ecologisch voordeliger om smeltloos te recycleren.



**Figuur 20: Sensitiviteit van het verschil tussen de impact van hersmelten en smeltloze recyclage op de smeltverliezen**

De broeikasgasuitstoot van het realistische scenario bedraagt 1,57kg CO<sub>2</sub>-equivalent.

## 5.6 Macro-impact op Europees niveau

Gebaseerd op de totale mogelijke hoeveelheid smeltloos gerecycleerd aluminium per jaar in Europa, geschat op 331kton in Hoofdstuk 3, en het verschil tussen de impact van het smeltloze referentiescenario uit Sectie 5.5.4 (134mPt) en de impact van recyclage via hersmelten met smeltverliezen van 10,5% (289mPt), 15% (360mPt) en 22,5% (517mPt), is het nu mogelijk de potentiële impact van het valoriseren van smeltloze recyclage in Europa te schatten.

$$Impactreductie = (I_s - I_{zs}) * V_E$$

I = ecologische impact per kg biljet in mPt/kg

Met s: smelten = recyclage via hersmelten

En zs: zonder smelten = smeltloze recyclage

V<sub>E</sub> = jaarlijkse hoeveelheid verspaningsafval in Europa

Smeltloze recyclage van de volledige jaarlijkse hoeveelheid aluminium verspaningsafval in Europa leidt tot een impactreductie van 51-127 miljoen ecopunten, equivalent met de totale jaarlijkse impact van 51000-127000 mensen.

Dezelfde berekening voor de verminderde uitstoot van broeikasgassen levert een jaarlijkse reductie van 0,7-1,6 miljoen ton CO<sub>2</sub>-equivalenten.

De gemiddelde Europese auto verkocht in 2014 heeft een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 123,4g/km (Europese Commissie, 2016). Een Europese auto rijdt gemiddeld 14000km per jaar (ACEA, 2009). Bijgevolg bedraagt de gemiddelde jaarlijkse CO<sub>2</sub>-uitstoot van een Europese wagen 1730kg CO<sub>2</sub>. De totale broeikasgasvermindering mogelijk door valorisatie van smeltloze recyclage in Europa komt dus overeen met de jaarlijkse uitstoot van 400000-940000 wagens.

## 5.7 Conclusie

Dit hoofdstuk behandelt de ecologische impact van smeltloze recyclage en vergelijkt die impact met de impact bij het hersmelten aan de hand van drie vragen. De impact van smeltloze recyclage is 2-4 keer lager dan recyclage via hersmelten. Een referentiescenario heeft een totale ecologische impact van 134mPt/kg. De totale broeikasgasuitstoot van het referentiescenario bedraagt 1,57kg CO<sub>2</sub>-equivalent per kg.

De eerste vraag behandelt de verandering in de ecologische impact van smeltloze recyclageprocessen bij opschaling van laboschaal naar industriële schaal. Die verandering is significant. Voor waarden uit de literatuur is de impact van smeltloze recyclage slechts 100mPt per kg profiel. In de test op industriële schaal voor het ASSuRe project loopt die echter op tot 244mPt. Dit is nog steeds lager dan de impact bij hersmelten van spanen, die 289 tot 517mPt bedraagt, afhankelijk van de smeltverliezen. De grote verandering is vooral toe te schrijven aan het overgedimensioneerde reinigingsproces.

De tweede vraag behandelt de sensitiviteit van de ecologische impact van smeltloze recyclageprocessen tegenover de verandering van procesparameters. De concentratie reinigingsmiddel, het aantal keer dat het reinigingswater gebruikt wordt en de nodige precompactie-energie hebben een grote invloed op de impact van smeltloze recyclage. Elk apart kunnen ze de impact van de experimentele opstelling met 25% verlagen. Gecombineerd kunnen ze leiden tot een impact van slechts 92mPt, in de veronderstelling dat de spanen dan nog voldoende gereinigd worden. Zelfs bij een smeltverlies van 2,5% is de impact van smeltloze recyclage volgens het referentiescenario nog steeds lager dan de impact van recyclage via hersmelten. In de praktijk komt dit erop neer dat smeltloze recyclage voor het meeste aluminium afval ecologisch gezien beter is dan recyclage via hersmelten.

De laatste vraag bekijkt de totale ecologische winst in Europa bij valorisatie van smeltloze recyclageprocessen. Die kan oplopen tot 51-127 miljoen ecopunten. De vermindering in broeikasgasuitstoot bedraagt tot 0,7-1,6 miljoen ton CO<sub>2</sub> equivalenten.



# Hoofdstuk 6: aanbevolen kost-effectieve procesverbeteringen

De valorisatie van smeltloze recyclagetechnieken op industriële schaal vereist een economisch rendabel proces. Uit hoofdstuk 4 blijkt dat het proces, zoals in het ASSuRe project uitgevoerd om de technologische haalbaarheid van smeltloze recyclagetechnieken op industriële schaal te testen, een zeer hoge kost heeft. Het proces verbeteren tot een winstgevend proces is noodzakelijk om de nieuwe techniek te laten omarmen door bedrijven. Uit hoofdstuk 5 blijkt reeds dat procesverbeteringen de ecologische impact verminderen. Dit hoofdstuk bekijkt eerst dezelfde procesverbeteringen vanuit een kostperspectief. Daarbij behandelt het ook mogelijke automatisatie. Daarna gaat het na welke alternatieve processen te overwegen zijn voor een zo kost-effectief mogelijk proces.

## 6.1 Efficiëntieverbeteringen huidige processen

De meest voor de hand liggende manier om de kost van smeltloze recyclage te verminderen is te bouwen op de in het ASSuRe project gebruikte processen en deze efficiënter te maken. De bedoeling van dit deel is het evalueren en kwantificeren van deze efficiëntieverbeteringen. De referentie-éénheid is 1kg billet.

### 6.1.1 Transport en logistiek

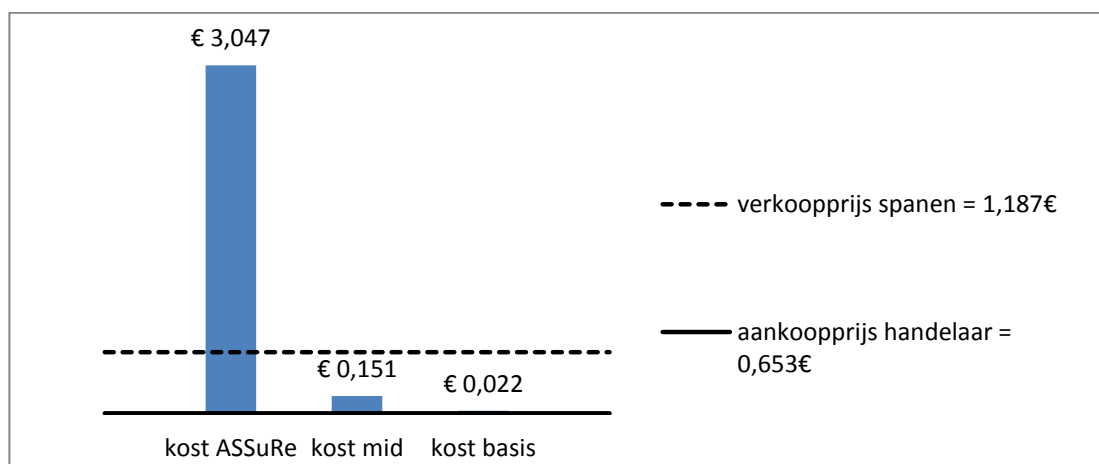
De transportkost zoals uitgevoerd in het ASSuRe project bedraagt 3,05€/kg billet terwijl de marge van de schroothandelaar slechts 0,53€/kg billet is, waarmee die handelaar ook nog zijn andere kosten moet kunnen dekken (zie sectie 4.8). De schroothandelaar is hier een fictief begrip, aangezien in het ASSuRe project het transport rechtstreeks gebeurde tussen de producent van spanen en de verwerker. Ook is in dit cijfer het transport inbegrepen tussen de verschillende processtappen in verschillende bedrijven, wat in werkelijkheid niet door de schroothandelaar gedaan wordt maar door de bedrijven zelf of door een logistieke partner.

Bij efficiëntieverbetering kan het werk van de schroothandelaar wel duidelijk gedefinieerd worden. Een eerste efficiëntieverbetering veronderstelt dat alle recyclagestappen op één locatie gebeuren zodat er geen intern transport meer nodig is.

Het enige nodige transport is bijgevolg het transport tussen spanenproducerend bedrijf en recyclagebedrijf, uitgevoerd door de schroothandelaar. Ter vereenvoudiging is geen tussentijdse opslag bij de schroothandelaar in rekening gebracht. Bij een meer gedetailleerde studie moet het effect daarvan op de totale kost in rekening gebracht worden. Dit effect is gedeeltelijk negatief, vanwege de opslagkost, maar ook gedeeltelijk positief, vanwege het efficiëntere transport mogelijk door tussentijdse opslag. Hier wordt verondersteld dat de negatieve en positieve effecten elkaar opheffen.

In sectie 4.7 is een basis- en een mid-scenario opgesteld voor de verbetering van het transport. De kost van deze scenario's volgt hier, de assumpties over het aantal kg per vrachtwagen en het al dan niet leeg terugrijden van de vrachtwagen volgend. In sectie 4.7 zijn deze scenario's bekeken voor zowel spanen die komen van Vasco als spanen die komen van Wuyts. Wuyts ligt op 85km van E-Max. Door de kost te berekenen voor de scenario's met Wuyts wordt dus verondersteld dat E-Max spanen kan verwerken van bedrijven die opereren binnen een straal van 170km rond E-Max met een gemiddelde afstand tot E-Max van 85 km. Deze afstand bestrijkt reeds een aanzienlijk deel van Vlaanderen, Wallonië en Nederland en moet dus voldoende zijn om representatief te zijn voor een klantenbestand van E-Max.

Bij de partners van het ASSuRe project bestaat de gedachte dat logistiek een substantiële kost zal bedragen omdat de spanen zo volumineus zijn dat het aantal spanen dat per vrachtwagen kan vervoerd worden zeer laag is. Om dat volume te verminderen willen de ASSuRe partners onderzoeken of het mogelijk is de spanen met een mobiele installatie te reinigen en te precompacteren. De reeds geprecompacteerde spanen nemen dan slechts weinig plaats in en kunnen dus efficiënt getransporteerd worden. Figuur 21 toont dat deze vrees ongegrond is. Een gemiddeld scenario voor transport behoudt ruime marges voor de schroothandelaar. Indien het basisscenario kan bereikt worden is de kost van transport zelfs verwaarloosbaar klein. Het is dus niet nodig om een mobiel precompactieproces te ontwikkelen.

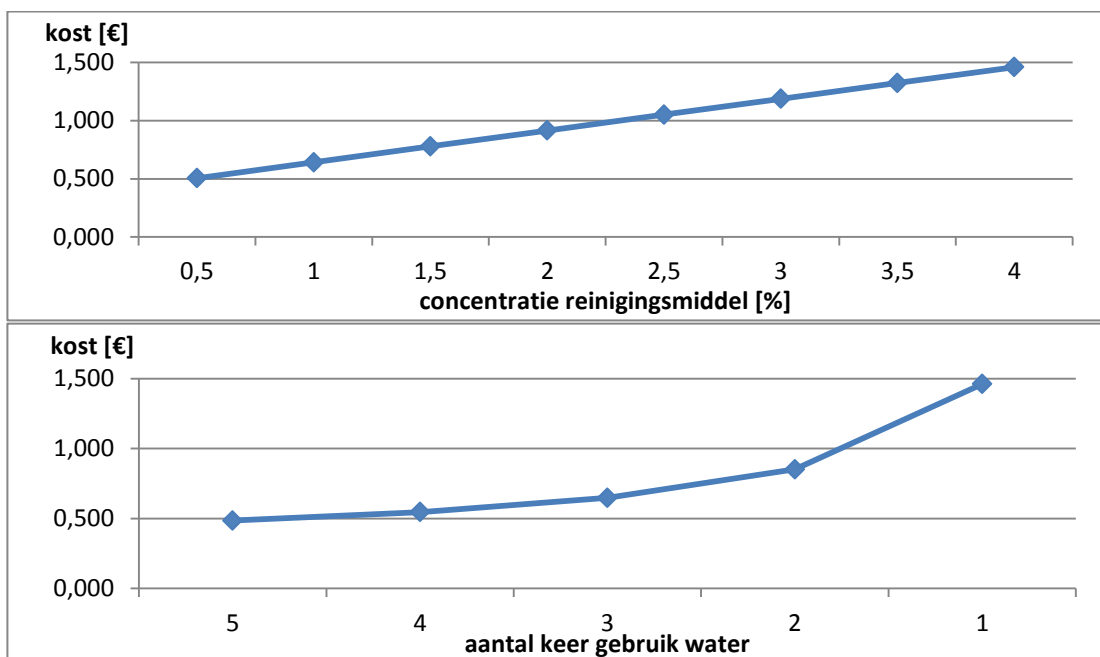


**Figuur 21: Operationele kost en marges schroothandelaar**

## 6.1.2 Reiniging

Het gekozen reinigingsproces, wassen, spoelen en drogen, is op een conservatieve manier uitgevoerd omdat het eerste doel van het ASSuRe project is om de technologische mogelijkheid te testen, niet de economische haalbaarheid. Dit laat ruimte voor een aantal efficiëntieverbeteringen die het proces mogelijk economisch rendabel kunnen maken. Vooral een lagere concentratie reinigingsmiddel, hergebruik van het reinigingswater en automatisatie beloven een vergaande verbetering van het proces. Het reinigingsmiddel heeft immers een kost van 1,1€/kg billet en de nodige arbeid om de spanen te reinigen is met 5,84€/kg billet de grootste kost in de ASSuRe test. Een beperking op deze efficiëntieverbeteringen is de functionaliteit of de mate waarin spanen 'rein' zijn na het reinigingsproces. Appendix F reikt een methode aan om de reinheid te vergelijken tussen verschillende processen. Hier volgt een bespreking van de invloed van efficiëntieverbeteringen op de reinigingskost, onder de veronderstelling dat deze verbeteringen voldoende reinigen.

De totale energie- en grondstofkost van de reiniging tijdens het ASSuRe project bedroeg 1,46€/kg billet. Figuur 22 zet de invloed van de efficiëntieverbeteringen uit tegenover die energie- en grondstofkost van de reiniging.

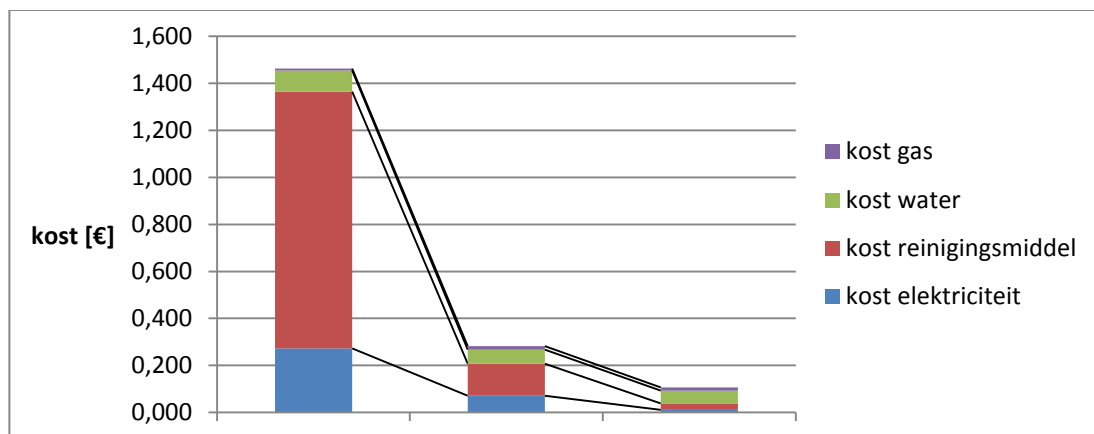


**Figuur 22: Energie- en grondstofkost reiniging als functie van (a) de concentratie reinigingsmiddel (b) het hergebruik van het reinigingswater**

Uit Figuur 22 blijkt dat de energie- en grondstofkost van de reiniging bij het verlagen van de concentratie reinigingsmiddel of het hergebruiken van het reinigingswater uitvlakt bij ongeveer 0,50€/kg billet. De temperatuur van het spoelwater verlagen heeft weinig invloed op de kost. Een bijkomende kostverlaging is het water opwarmen met gas in plaats van met elektriciteit, onder de assumptie dat de opwarming even

efficiënt gebeurt met gas als met elektriciteit. In de recyclage zoals uitgevoerd tijdens ASSuRe verlaagt dit de kost om het water op te warmen van 0,26€/kg spanen tot 0,05€/kg spanen.

Bij het efficiënter maken van de reiniging zal men zich uiteraard niet beperken tot het verbeteren van één van de bovenstaande parameters. Voor de scenario's met combinaties van verbeteringen uit sectie 5.5.2.4 met als extra toevoeging dat nu het water met gas opgewarmd wordt in het mid- en basisscenario, geeft Figuur 23 de totale energie- en grondstofkost van de reiniging weer. Bij het efficiënter maken van het huidige reinigingsproces zal de energie- en grondstofkost in het allerbeste geval, indien de spanen dan nog voldoende gereinigd zijn, uitvlakken bij 0,11€/kg profiel.



**Figuur 23: Scenario's voor de energie- en grondstofkost reiniging**

De nodige arbeid om de spanen te reinigen is met bijna zes euro per kg biljet de grootste kost in de ASSuRe test. Deze arbeidskost bestaat uit de arbeid nodig om de reinigingsmachines te vullen en leeg te halen, een component van 5,61€/kg profiel, en bijkomende handling om de spanen af- en aan te voeren naar de reinigingsmachines, een component van 0,23€/kg profiel. Naast deze ASSuRe arbeidskost volgt hier een volautomatisch scenario en een handmatig scenario met grotere batches.

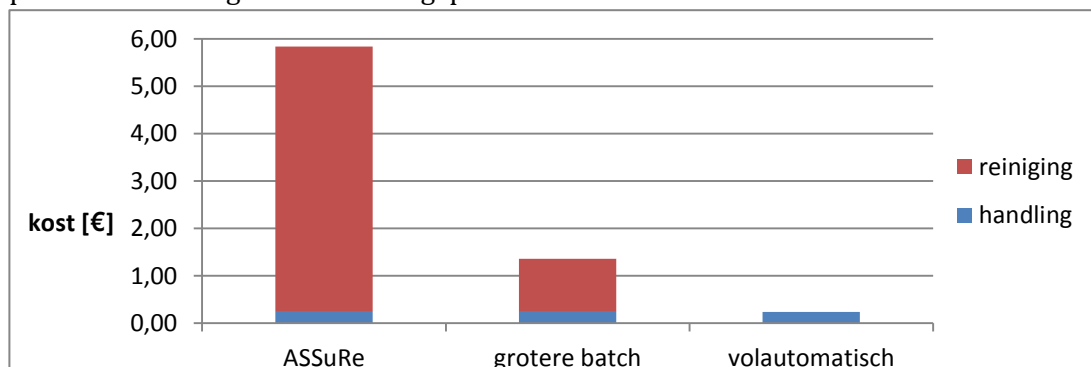
In de industrie zijn volledig geautomatiseerde reinigingssystemen beschikbaar. Gebruik van een dergelijke installatie doet de kost voor het vullen en leeghalen dalen tot 0. Enkel de handling om deze installaties van voldoende nieuwe spanen te voorzien en de bakken met gereinigde spanen weer weg te voeren is dan nog nodig. Een nadeel aan een dergelijke volautomatische installatie is uiteraard de hogere aankoopprijs.

Een tussenoplossing is een handmatig te bedienen wasmachine met normale batchgroottes. De gebruikte betonmolens kunnen maximaal drie kg spanen reinigen per batch, wat uiteraard economisch niet voordelig is. De tijd voor een arbeider om de machine te laden en te lossen is vooral gelinkt aan de hoeveelheid handelingen die hij moet doen, en niet zozeer aan het aantal kg spanen dat in de machine moet. In de industrie is 'tijd- en methodestudie' gebruikelijk om schattingen te maken van de nodige arbeidstijd voor een productieproces. Op MTM-3 niveau (een standaard uit de

tijd- en methodestudie) beschouwt men de sequentie van iets vastnemen, bewegen naar een nieuwe plaats en daar plaatsen als een handeling met een tijdsduur van één éénheid standaardtijd (Limère, 2013). Op basis daarvan, zonder dieper in te gaan op tijd- en methodestudie, is het mogelijk om een snelle schatting te maken van de tijds winst bij het overschakelen van een batch van 3kg op een batch van 30kg.

Om 30kg te reinigen in batches van 3kg moet 10 keer de volgende sequentie doorlopen worden: 1 handeling machine openen, 1 handeling 3kg eruit halen, 1 handeling 3kg erin steken, 1 handeling machine aanzetten. Dit resulteert in 40 éénheden standaardtijd.

Om 30kg te reinigen in een batch van 30kg moet de volgende sequentie éénmaal doorlopen worden, veronderstellende dat een operator 10kg per keer kan opheffen: 1 handeling machine openen, 3 handelingen 10kg eruithalen, 3 handelingen 10kg erin steken, 1 handeling machine aanzetten. Dit zijn slechts 8 éénheden standaardtijd. De originele tijd is dus door 5 gedeeld. Uiteraard moet voor een werkelijke studie van de tijd gevalideerd worden of de handelingen wel overeenkomen met de gedefinieerde standaardtijd. Echter, Figuur 24 toont aan dat het niet nodig is om dieper in te gaan op de mogelijke tijds winst met grotere batches. De totale arbeidskost voor de reiniging is zowel tijdens het ASSuRe project als in een scenario met grotere batches zeer hoog. Enkel in een proces met volledige automatisatie is het mogelijk om de kost laag te houden. Deze figuur volgt de assumptie dat de handelingstijd niet verandert. In verdere procesverbeteringen kan die aangepakt worden.



**Figuur 24: scenario's voor de arbeidskost tijdens de reiniging**

### 6.1.3 Precompactie

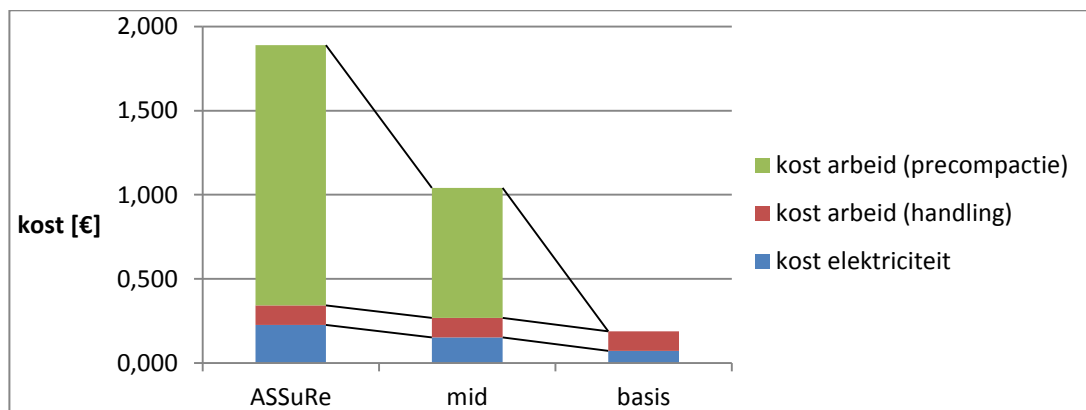
De operationele kost van de precompactie bestaat uit drie componenten. De electriciteitskost voor het persen, de arbeid nodig voor handling van de spanen tot aan de persmachine en de arbeid verricht tijdens het persen, de belangrijkste component met een kost van 1,55€/kg billet.

Efficiëntieverbeteringen in het persen kunnen leiden tot een mid-scenario met 0,74kWh/kg spanen en een basisscenario van 0,35kWh/kg spanen.

De arbeid voor handling is moeilijk te verbeteren in een eerste optimalisatie. De arbeid tijdens het persen daarentegen kan tot 0 herleid worden door automatisatie. Hoe een volledig geautomatiseerde precompactie tot stand moet komen is niet zo simpel. Er bestaan vandaag geen volautomatische machines die dergelijke grote billets kunnen maken uit spanen, rekening houdend met de enorme volumereductie van spanen tot billet. In 6.2.3 komen machines aan bod die mits adaptaties kunnen helpen bij het automatiseren.

Een tussenoplossing is een efficiëntere arbeid bij het precompacteren. 2 operatoren voerden de precompactie uit tijdens het ASSuRe proces : 1 om de machine te bedienen, 1 om de machine te vullen. De operator die de machine moet bedienen moet veel wachten op de operator die vult. Slechts 1 operator om zowel te vullen als de machine te bedienen zou weinig meer tijd nodig hebben om de precompactie te doen dan de tijd die de 2 operatoren nodig hadden voor precompactie. Bovendien gebeurde het vullen tijdens het ASSuRe project vrij traag. Daarom kan veilig verondersteld worden dat 1 operator precompactie in dezelfde tijd kan uitvoeren als de 2 operatoren uit het ASSuRe project, wat de kost reeds halveert.

Figuur 25 vat de verschillende scenario's voor de precompactiekost samen. Net als bij de reiniging is het duidelijk dat de precompactiekost enkel bij volledige automatisatie tot een aanvaardbaar niveau verlaagt. Het is bijgevolg niet nodig om tussenoplossingen met een lagere arbeidskost verder te onderzoeken.

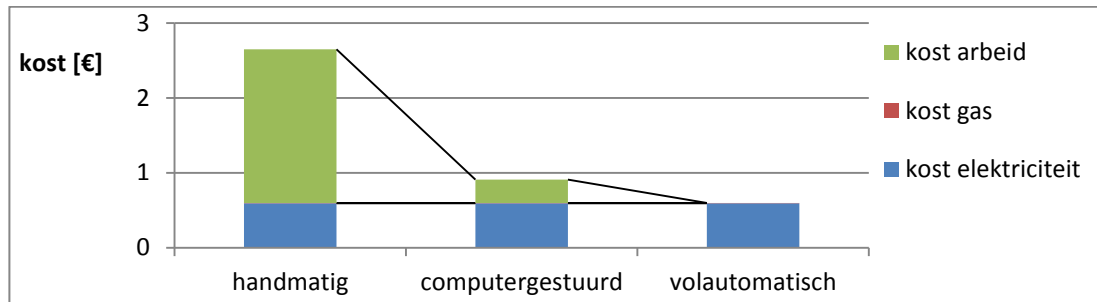


**Figuur 25: scenario's voor de precompactiekost**

#### 6.1.4 Vonkplasmasinteren

Sectie 4.5 schat de totale operationele kost van vonkplasmasinteren tijdens de ASSuRe test op 2,65€/kg. De nodige energiekost van het vonkplasmasinteren, die 0,59€/kg bedraagt, is slechts te verminderen door in te grijpen in het proces zelf. Aangezien vonkplasmasinteren een reeds ontwikkeld en commercieel proces is, is het weinig waarschijnlijk dat deze kost significant verlaagd kan worden. De energiekost van de warmtebehandeling volgende op vonkplasmasinteren is relatief laag. De arbeidskost daarentegen, die 2,05€/kg bedraagt, is de grootste kost bij het vonkplasmasinteren en

kan via automatisatie verlaagd worden. Een volautomatische vonkplasmasintering-machine als onderdeel van een automatische productielijn reduceert de arbeidskost tot 0. Een tussenstap is een automatische computergestuurde machine die de operator moet laden en lossen. Bij een geschatte laad- en lostijd van 3 minuten per cyclus voor de billet van 6,5kg (Sectie 4.5.3) is de arbeidskost voor een dergelijke computergestuurde machine 0,31€/kg. Figuur 26 vergelijkt de kost van vonkplasmasinteren in 3 gevallen. Een belangrijke opmerking bij deze operationele kost is dat de matrijs, nodig om het near-net-shape product te kunnen maken, niet inbegrepen is in deze kost.

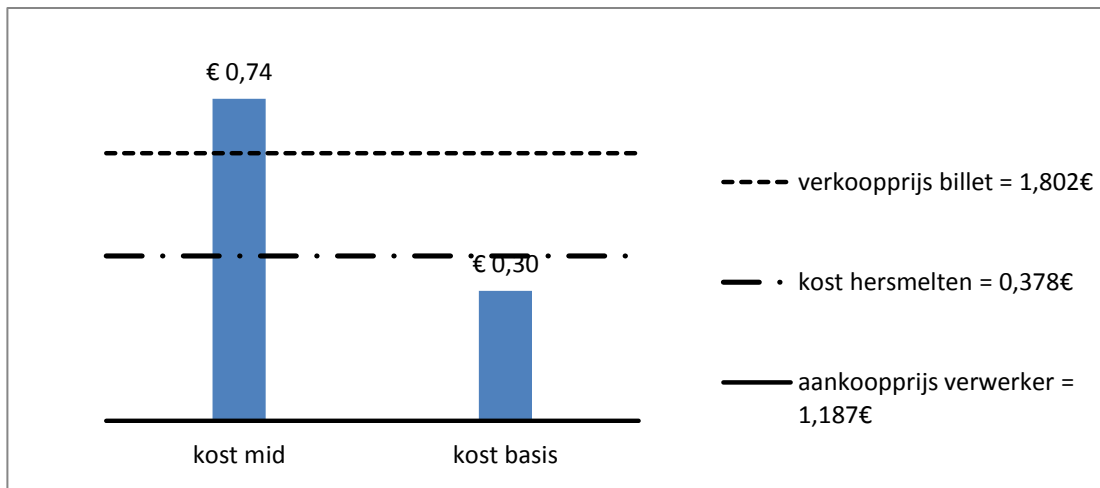


**Figuur 26: Scenario's voor de kost van vonkplasmasinteren**

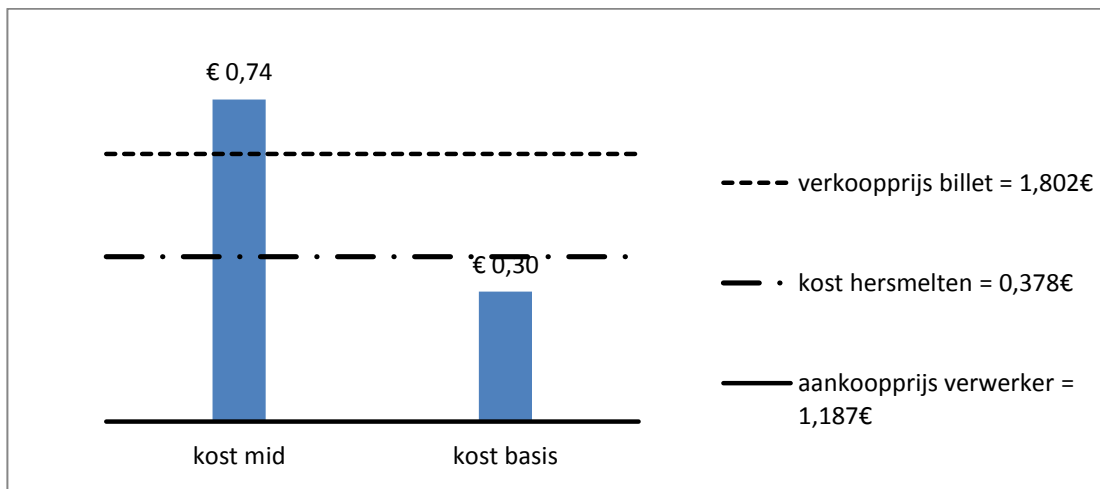
### 6.1.5 Evaluatie van de efficiëntieverbeteringen

De transportkosten, voor rekening van de schroothandelaar, kunnen dalen tot een zeer laag niveau, zoals de figuur in 6.1.1 duidelijk maakt.

De reinigings- en precompactiekosten, voor rekening van de schrootverwerker, kunnen met de stevige efficiëntieverbeteringen van het basisscenario en een volledig geautomatiseerde productielijn voldoende dalen om competitief te zijn met recyclage via hersmelten. Automatisatie van de machines, reeds verondersteld in het mid-scenario, is niet voldoende. Het is noodzakelijk om de machines te verbinden met elkaar in een volautomatische productielijn waar spanen tussen de machines bewegen op transportbanden. De handlingtijd wordt zo gereduceerd tot 0 tussen reiniging en precompactie. Slechts een handlingkost van 0,12€/kg billet, de helft van de opgemeten handlingtijd nodig tijdens de reiniging, is dan nodig aan het begin van de productielijn. De handling aan het eind van de productielijn is verwaarloosbaar wegens de compactheid van de billets. Dit betekent uiteraard dat het volledige recyclageproces moet plaatsvinden op één locatie.



Figuur 27 vergelijkt die kost voor de schrootverwerker in een mid- en basisscenario. Dit midsenario valt met 0,74€/kg billet buiten de marges die de schrootverwerker heeft. Het basisscenario is met 0,30€/kg billet goedkoper dan recyclage via hersmelten dat een kost heeft van 0,38€/kg billet. Het basisscenario is de som van het basisscenario uit 6.1.2 en 6.1.3, aangevuld met de assumptie van een volledig geautomatiseerde productielijn. Het midsenario komt overeen met de midsenario's van 6.1.2 en 6.1.3 voor grondstofkost en energiekost en veronderstelt automatische machines.



**Figuur 27: operationele kost en marges schrootverwerker mid- en basisscenario**

## 6.2 Alternatieven voor de huidige processen

Een kost-effectief smeltloos recyclageproces via efficiëntieverbeteringen, goedkoper dan het huidige hersmeltproces is mogelijk. Echter, sectie 6.1.5 veronderstelt dat sterk besparen op water en reinigingsmiddel de spanen nog steeds voldoende reinigt. Ook veronderstelt het dat het proces volledig geautomatiseerd kan worden in een



productielijn. Deze sectie bekijkt welke alternatieve processen bestaan die mogelijk nog goedkoper zijn en gaat op zoek naar automatische processen voor reiniging en precompactie.

### 6.2.1 Transport en logistiek

Efficiëntieverbeteringen volstaan om transport kost-effectief te maken (zie 6.1.1). Het is onnodig om alternatieve processen, bijvoorbeeld mobiele reiniging en precompactie, op te stellen. Van belang is dat alle processtappen binnen één bedrijf gebeuren, dit vermijdt tussentijds transport, opslag en handling.

### 6.2.2 Reiniging

Deze sectie beschouwt de volgende mogelijkheden:

- 1) Niet reinigen
  - a. Droog verspanen
  - b. Cryogeen verspanen
  - c. Vervuilde spanen rechtstreeks gebruiken
- 2) Anders reinigen
  - a. Centrifugeren
  - b. Thermisch
  - c. Vervuiling uitpersen bij briketteren
  - d. Reinigen met solventen die verdampen
  - e. Magnetisch
  - f. trillingsreinigen

#### 6.2.2.1 Niet reinigen

Indien de hierboven besproken reinheidstest uitwijst dat ongereinigde spanen even goede eigenschappen bekomen als gereinigde, kan de reinigungsstap volledig overgeslaan worden. Dit is echter weinig waarschijnlijk. Een mogelijkheid die wel potentieel heeft is het droog verspanen of cryogeen verspanen. Droog verspanen gebruikt geen koelvloeistoffen. Cryogeen verspanen koelt het werkstuk tot extreem lage temperaturen met vloeibare stikstof. Dat stikstof verdampt meteen bij aanraking met het werkstuk. Deze twee methodes laten geen smeer- of koelvloeistoffen achter op het werkstuk. Voor smeltloze recyclage hoeven spanen na deze methodes dus niet gereinigd te worden. Een gedetailleerde beschrijving van de methodes valt buiten de omvang van deze thesis. De belangrijkste voor- en nadelen en de situaties waarin het verspanen met koelvloeistoffen kan vervangen worden wel besproken.

De drie voornaamste redenen voor fabrikanten om koelvloeistoffen en smeermiddelen te gebruiken bij het verspanen is het vermijden van oververhitting, de resulterende oppervlakteruwheid en de langere levensduur van het gereedschap. Echter, waar de gereedschapskost vroeger erg hoog lag en koelvloeistoffen goedkoop waren, bedragen koelvloeistoffen nu 16% van de totale kost van een verspaningsproject terwijl

gereedschappen slechts 4% van die kost bedragen (Graham et al., 2003). Ook een recentere publicatie haalt een kost van de vloeistoffen aan die tussen de 7 en 17% van de totale kost ligt (Kouam et al., 2012). Graham et al. halen industriële voorbeelden aan waarin de totale kost goedkoper is zonder vloeistoffen, doordat de iets lagere levensduur van het gereedschap niet opweegt tegen de kost van de vloeistoffen of doordat het gereedschap net langer meegaat omdat koelvloeistoffen wel afkoelen maar tegelijk de temperatuurgradiënten vergroten, en de huidige veelal brosse gereedschappen breken daardoor regelmatig af. Verder stellen ze dat voor de meeste aluminiumlegeringen koelvloeistoffen niet nodig zijn omwille van de relatief lage snijtemperaturen (Graham et al., 2003).

Ook het Nederlandse Aluminium Centrum stelt dat de meeste aluminiumlegeringen, waaronder AA6060, zeer goed te verspanen zijn en zonder smeer- of koelvloeistoffen verspaand kunnen worden. Ze waarschuwen voor de thermische schokken die koelvloeistoffen kunnen veroorzaken en die de standtijd van gereedschappen verminderen. Wel leveren enkele zachtere legeringen moeilijkheden omdat ze zo zacht en taai zijn dat de spanen moeilijk afbreken. Een geschikt smeermiddel biedt in dit geval de oplossing (Aluminium Centrum, 2002).

Het verspanen van aluminium produceert fijn stof en aerosolen, die het milieu vervuilen en schadelijk zijn voor de operator (Kouam et al., 2012). Die generatie van aerosolen is veel lager bij droog verspanen dan bij verspanen met koelvloeistoffen. Dit is een groot voordeel voor bedrijven die begaan zijn met de gezondheid van hun medewerkers.

De oppervlaktekwaliteit daarentegen is bij droog verspanen meestal minder goed dan bij verspanen met smeer- en koelvloeistoffen. Sreejith vergelijkt flankslijtage, snijkracht en oppervlakteruwheid bij het verspanen van aluminium AA6061 voor droog verspanen, verspanen met een minimale hoeveelheid koelvloeistof en gewoon verspanen. Alle parameters zijn vergelijkbaar voor gewoon verspanen en verspanen met een minimale hoeveelheid koelvloeistof, maar slechter voor droog verspanen (Sreejith, 2007). Dit verband is echter niet universeel. Kouam et al. bekomen een lagere ruwheid bij het verspanen met minimale hoeveelheid koelvloeistof en droog verspanen tegenover het verspanen met koelvloeistoffen (2012). Dit resultaat behaalden ze voor verschillende snijsnelheden en voedingssnelheden.

Een probleem met droog verspanen van aluminium is de hoge affiniteit van aluminium met gereedschapsmaterialen (Thamban et al., 2013). Adhesie tussen gereedschap en aluminium werkstuk veroorzaakt gemakkelijk een ongewenste opbouwsnikant. Het onderzoek naar geschikte gereedschapsmaterialen en geometrieën om dit op te lossen is nog volop bezig. Thamban et al. frezen aluminium AA6061 zonder koelvloeistoffen met een wolframcarbidegereedschap zonder coating en hetzelfde gereedschap met diamantcoating (2013). Met diamant bekomen ze een constante oppervlakteruwheid, terwijl die ruwheid sterk fluctueert bij het ongecoate gereedschap.

Ook is de nodige energie, wanneer men naar het totale verspaningssysteem kijkt, dus met inbegrip van onder andere vloeistoffiltering, koeling en reiniging, hoger bij het droog verspanen dan bij verspanen met snijvloeistoffen (Madanchi et al., 2015). Dit is onder andere het gevolg van de verhoogde wrijving en van de nodige perslucht om de spanen van het werkstuk weg te blazen bij droog verspanen, waar de vloeistof deze functie op zich neemt bij gewoon verspanen.

Het probleem van de opbouwsnikkant en de hogere oppervlakteruwheid bij droog verspanen is op te lossen met cryogeen verspanen. Murugappan et al. vergelijken droog draaien van aluminium AA6063 met cryogeen verspanen van dezelfde legering (2015). Met cryogeen verspanen bereiken ze betere oppervlaktekwaliteiten en kunnen ze een grotere voedingssnelheid aanhouden voor dezelfde oppervlaktekwaliteit, wat het totale proces economischer maakt. Dhokia et al. vergelijken frezen met koelvloeistoffen, droog frezen en cryogeen frezen van aluminium AA6061. Cryogeen frezen leidt tot een 43% lagere oppervlakteruwheid vergeleken met droog frezen. Van de drie onderzochte processen heeft het traditionele frezen met koelvloeistoffen de hoogste oppervlakteruwheid. Daarnaast verhoogt cryogeen frezen de standtijd van het gereedschap. (Dhokia et al., 2012).

Droog verspanen is geschikt voor het ruw verspanen van grote hoeveelheden materiaal. Cryogeen verspanen kan door de extreme koeling met hoge snijsnelheden toch een goede oppervlakteruwheid van het werkstuk en lange standtijd van het gereedschap bekomen. In veel bedrijven zijn ze echter nog onbekend en vereisen ze nieuwe kennis. Verspanen met smeer- en koelvloeistoffen daarentegen heeft zijn werking reeds bewezen gedurende de afgelopen decennia en is ingeburgerd bij operatoren en ingenieurs. In productieomgevingen, sterk gericht op efficiëntie, vormt die gebrekkige kennis een obstakel voor het invoeren van nieuwe processen met minder of geen koelvloeistoffen, omwille van de angst voor complicaties en onderbrekingen in het productieproces (Unist, 2013).

Bedrijven die deze angst overwinnen kunnen sterk besparen op de kost van aankoop en afvalverwerking van koelvloeistoffen, verlagen hun ecologische impact en verhogen de veiligheid voor operatoren door het verminderen van de schadelijke uitstoot van aerosolen. Echter, ze kijken op tegen een hogere energiekost en voor droog verspanen ook een hogere gereedschapskost. Verder onderzoek naar de totale systeemkost is nodig om te bepalen of deze alternatieve verspaningsmethodes interessant zijn voor aluminium verspanende bedrijven. Uitbreiden van dit systeem tot de recyclage van de spanen is wenselijk om het vermijden van de reinigingsstap bij smeltloos recycleren in rekening te brengen.

#### 6.2.2.2 Anders reinigen

##### *Centrifugeren*

Centrifugeren van spanen is een zuivere mechanische methode. De scheiding van spanen en koelvloeistoffen en smeermiddelen gebeurt via de middelpuntvliedende

kracht. De centrifugeermachine bestaat uit een zeer snel ronddraaiende trommel afgesloten door een rooster. Spanen komen de trommel binnen in het midden bewegen onder invloed van de middelpuntvliedende kracht over het rooster naar de buitenkant van de trommel. Ondertussen blijven de vloeistoffen achter bij het rooster. Nieuw bijkomende natte spanen duwen de reeds drogere spanen onderaan de trommel naar buiten. Onderaan achter het rooster kunnen de koelvloeistoffen opgevangen worden, klaar voor hergebruik (National Conveyors Company, 2015).

Een technische productfiche voor een centrifugemachine van Nederman, een Zweedse fabrikant van milieutechnologieproducten voor productiebedrijven, helpt bij een eerste schatting van de reinigingskost en effectiviteit van centrifugeren. Nederman vermeldt een residuele vochtigheid van 2-5% (Nederman, 2012). Dat betekent dat centrifugeren vooral geschikt is om zeer vochtige spanen af te scheiden van de koelvloeistoffen. Echter, de spanen gebruikt in het ASSuRe project hebben slechts een residuele vochtigheid van 2-3%. Het doel van de reiniging is om die nog meer te zuiveren. Bijgevolg is reiniging via centrifugeren niet geschikt voor dit doeleind. Dit komt ook overeen met de informatie die de ASSuRe partners hebben over centrifugeren.

De kleinste centrifugemachine van Nederman, de HD50, heeft een capaciteit van 3 tot 600 kg spanen per uur, afhankelijk van het volume en de hoeveelheid koelvloeistoffen. De motor heeft een vermogen van 4kW. Verder werkt de machine volautomatisch en is ook schoonmaken van de machine zeer éénvoudig, dit duurt slechts 5 minuten. De operationele kost kan dus in eerste instantie benaderd worden door de kost van de elektriciteit met de veronderstelling dat er een verwaarloosbare hoeveelheid arbeid nodig is om de machine te bedienen. Tabel 20 geeft de operationele kost bij een gemiddelde capaciteit van 300kg/u weer. Deze is zeer laag. Ook de aankoopprijs is relatief laag. Today's Machining World vermeldt een aankoopprijs van \$110000 voor een volledig centrifugesysteem voor een bedrijf dat 50ton spanen per maand verwerkt in 2005 (Graff, 2005).

Centrifugeren	energie per kg spanen	Éénheidsprijs	Kost	
	kWh/kg	(€/kWh)	(€/kg)	
Centrifugeren	0,0133		0,2	0,003

**Tabel 20: De kost van centrifugeren**

### *Thermische reiniging*

Thermische reiniging brandt de koel- en smeermiddelen af van het metaaloppervlak. Deze organische verontreinigingen zijn vluchtiger dan het aluminiumsubstraat. Bijgevolg kunnen ze afgebrand worden aan een temperatuur lager dan de smeltemperatuur van aluminium. Zelfs op die lagere temperatuur bestaat wel het gevaar dat het aluminium, een sterk oxiderend metaal, niet verwaarloosbaar oxideert tijdens thermische reiniging. Dit is de reden dat tijdens het ASSuRe project niet voor thermische reiniging gekozen is.

Zoals in de literatuurstudie besproken hebben Cui et al. onderzoek gedaan naar de reiniging van spanen (2010). Decompositie van de smeermiddelen gebeurt rond een temperatuur van 290°C, terwijl oxidatie van aluminium pas bij een temperatuur van 370°C piekt. Thermische reiniging bij een temperatuur rond de 300°C is dus een mogelijk geschikt alternatief voor de reiniging via wassen, spoelen en drogen. Gewone stofdeeltjes en andere vaste verontreinigingen worden echter niet verwijderd met thermische reiniging.

De kost van thermische reiniging bestaat slechts uit twee componenten: de handling om de spanen in en uit de oven te steken, die vergelijkbaar is met de handling tijdens de ASSuRe droogstap, dus de helft van de handling nodig voor ASSuRe reiniging, en de energieconsumptie van de oven. Om een idee te krijgen van die nodige energie kan gekeken naar vergelijkbare warmtebehandelingen voor aluminium. Homogenisatie is een warmtebehandeling die na het gieten gebeurt en gedurende enkele uren de billet opwarmt bij een temperatuur van 450°C-600°C. De nodige energie voor thermische reiniging heeft dus een verwachte lagere waarde dan de nodige energie voor homogenisatie. Die nodige energie voor homogenisatie is 1,4MJ/kg (Milford et al., 2011). Tabel 21 geeft dus een schatting voor de kost van thermische reiniging, een veel lagere kost dan de ASSuRe reiniging. Echter, doordat het thermisch reinigen meerdere uren duurt is het niet mogelijk om dit in een geautomatiseerde productielijn in te bouwen. Daardoor is steeds handling nodig en is het bijgevolg zeer moeilijk de operationele kost verder te verlagen.

<b>Thermische reiniging</b>	energie/ kg spanen kWh/kg	uren/ kg spanen u/kg	Éénheidskost (€/u) of (€/kWh)	Kost (€/kg)
Handling		0,003	40	0,117
Oven	0,39		0,04	0,016

**Tabel 21: De kost van thermische reiniging**

### *Briketteren*

Briketteren is een vorm van precompactie tot kleine cilinders. Hersmelters gebruiken deze methode momenteel om de oppervlakte/ volumeverhouding van spanen te reduceren alvorens ze te hersmelten. De details van het briketteren en de eventuele mogelijkheid om te precompacteren via deze methode komen aan bod in 6.2.3. Een bijkomend voordeel is dat briketteren het reinigingsmiddel uit de spanen perst. Indien dat de spanen voldoende reinigt kan de reinigingsstap gecombineerd worden met de precompactiestap. Zo wordt de operationele kost van het reinigen 0 en blijft er enkel een precompactiekost over die als positieve bijkomstigheid ook reinigt.

Echter, zeer waarschijnlijk reinigt briketteren de spanen niet voldoende. Stansz, een Nederlandse producent van briketteermachines, vermeldt een residuele vochtigheid van 1% (2015). Lubriserv, een andere fabrikant, stelt dat de residuele vochtigheid minder dan 3% is (2016). RUF, een derde fabrikant, vermeldt een case studie met aluminium gietspanen die na briketteren een residuele vochtigheid van 3% heeft die

na drogen op kamertemperatuur gereduceerd wordt tot 1%. In een andere case hebben briketten van aluminium AA6060 spanen een residuele vochtigheid van 3%. Net als centrifugeren zal briketteren de niet sterk vervuilde spanen uit het ASSuRe project slechts weinig verder reinigen. Enkel indien de aanwezigheid van een percentage koelvloeistoffen van 1-3% de eigenschappen van het gerecycleerd profiel niet nadelig beïnvloeden is briketteren een mogelijkheid.

### *Solventreinigen*

Een alternatief voor reinigen via wassen, spoelen en drogen in waterig milieu is het solventreinigen in een organisch milieu. Meer specifiek zijn niet-polaire koolwaterstoffen zeer geschikt voor het verwijderen van vetten en oliën afkomstig van de koelvloeistoffen en smeermiddelen waarmee de spanen vervuild zijn (Bogaert et al., 2002). Ze zijn minder geschikt voor het verwijderen van vuildeeltjes en stof.

De meestgebruikte solventen voor het reinigen van metalen zijn zuivere koolwaterstoffen (KW) of gechloreerde koolwaterstoffen (CKW). Gechloreerde koolwaterstoffen zijn echter niet bruikbaar voor de reiniging van aluminium. Ze ontbinden immers en vormen HCL bij contact met aluminium (VITO, 2012). KW daarentegen zijn brandbaar. Ook verdampt in de praktijk meer dan 80% van het ingezette solvent (VITO, 2012). Dit heeft niet alleen een sterke impact op de luchtverontreiniging maar is ook gevaarlijk. Daarom vereisen de Europese milieurielijn en Vlaamse milieuwetgeving dat solventreinigen zoveel mogelijk in een gesloten kringloopsysteem gebeurt. Dit vereist een grote investeringskost en sluit niet uit dat nog steeds een aanzienlijk deel solvent in de atmosfeer terecht komt. Een voordeel van solventreinigen is wel dat het solvent niet opgewarmd hoeft te worden en dat het vluchtige solvent drogen na het reinigen overbodig maakt (Bogaert et al., 2002). Met uitzondering van de afzuigingsinstallatie is dit bijgevolg een laag-energetisch proces.

Een innovatie bij het solventreinigen is de chemische leasing formule (Dow, 2016). Hierbij verkoopt het chemiebedrijf geen solvent meer aan het productiebedrijf, maar betaalt het productiebedrijf per vierkante meter gereinigd oppervlak. De sterke drijfveer die dit aan het chemiebedrijf geeft om de hoeveelheid solvent te verminderen leidt bij bedrijven die al met een gesloten systeem werkten tot bijkomende verminderingen in solventgebruik van 80% (Dow, 2016). Het TaBaChem consortium ontwikkelt chemische leasing in Vlaanderen (Plan C, 2016).

Omwille van de geanticiperde hoge milieu- en investeringskost wordt hier niet verder ingegaan op solventreinigen. De ontwikkelingen van TaBaChem kunnen solventreinigen in de toekomst wel interessant maken voor smeltloze recyclage.

### *Trillend reinigen*

Een combinatie van mechanisch en chemisch reinigen is een trillende reinigingsmachine. Hierbij zitten de spanen in een trillende trommel, waar water en

reinigingsmiddel aan toegevoegd wordt. De trillingen zorgen voor wrijving tussen de spanen onderling en veelvuldig contact met het reinigingsmiddel. Dit resulteert in een intensieve reiniging met een laag gebruik van reinigingsmiddel.

Rösler, wereldwijd marktleider in mechanische oppervlaktetechnieken, heeft dergelijke machines in zijn aanbod. Een systeem uitermate interessant voor smeltloze recyclage bestaat uit de Rösler R 480/ 2 LR roterende trillingsreinigingsmachine, de roterende droogmachine RT 550 Euro en een automatische Rösler reinigingscentrifuge. Dit systeem kan elke 6 tot 10 minuten 350l spanen reinigen en drogen in een volautomatische productielijn. Drogen gebeurt zo snel door een combinatie van hete lucht, het verwarmen van de bodem en het ronddraaien van het materiaal in de droogmachine. Op het einde van de reiniging valt het reinigingswater onder invloed van de zwaartekracht door een rooster. Dit water vloeit vervolgens naar de reinigingscentrifuge, waar oliën, vetten en vervuiling afgescheiden worden. Daarna is het water weer geschikt voor de reiniging. Vincent Raman van Rösler stelt dat dit volledig gesloten systeem slechts éénmaal per jaar een volledige reinigingsmiddelwissel nodig heeft, met slechts sporadisch bijvullen van water tussenin (Raman, 2016). Omdat de wrijving tussen de spanen als gevolg van de trilling voor de voornaamste wrijving zorgt, hoeft het reinigingswater niet opgewarmd te worden. Dit zorgt voor een grote besparing in economische en ecologische kost tegenover de reiniging zoals uitgevoerd in de ASSuRe test.

Er moet nog getest worden of de zeer onregelmatige vorm en dikwijls sterke spreiding in grootte tussen verschillende spanen deze vorm van reiniging niet hindert. Ook is het mogelijk dat zeer kleine spaandeeltjes in het reinigingswater terechtkomen en bijgevolg de tijd tussen twee reinigingsmiddelwissels verkorten.

Een schatting van de operationele kost van trillend reinigen volgt hier op basis van de gegevens verstrekt door Rösler. De trillingsreinigingsmachine heeft een vermogen van 7,5kW. De droogmachine heeft een motorvermogen van 3kW en een warmtevermogen in te stellen op 6,5 of 9,75kW, waarvan het hoogste vermogen defensief gebruikt is in deze schatting. Een gemiddelde doorlooptijd van 8min voor 350l spanen is aangenomen. De meest volumineuze spanen, met een dichtheid van slechts 80kg/m<sup>3</sup>, zijn hier opnieuw defensief verondersteld als representatief, wat resulteert in een massadebiet van 210kg spanen per uur. Dit betekent een nodige energie van 0,01kWh/kg. Voor de schatting van het totale verbruik aan water en reinigingsmiddel heeft Rösler niet voldoende gegevens verstrekt. Door de recyclage van het water in gesloten kringloop is die kost vermoedelijk laag.

### *Magnetisch*

In de literatuurstudie in hoofdstuk 2 is vermeld dat de verontreiniging van spanen met ijzercontaminaties resulteert in een verminderde weerstand tegen corrosie. In hoofdstuk 3 is vermeld dat corrosieweerstand een belangrijke eigenschap is voor vele eindtoepassingen. Magnetische scheiding van aluminium spanen en ijzerdeeltjes is

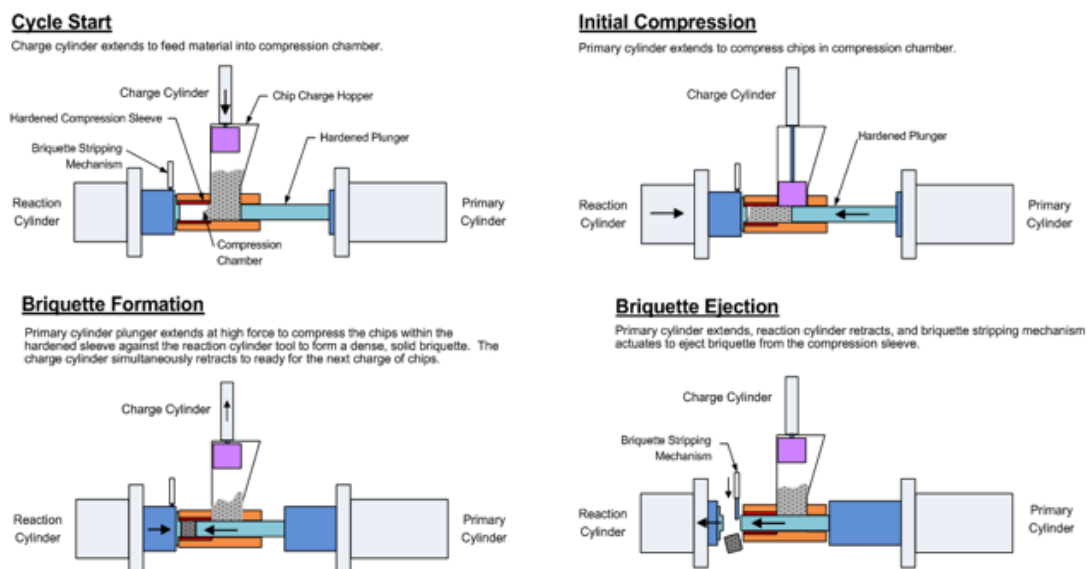
bijgevolg wenselijk voor verspaningsafval dat sterk verontreinigd is door ijzerdeeltjes. Magneten kunnen echter geen olie- of stofresten verwijderen, waardoor magneten steeds gecombineerd moeten worden met een andere reinigingsmethode. Theoretisch is magneetscheiding van spanen en ijzerdeeltjes een zeer éénvoudig proces. Een permanente magneet boven de transportband van de spanen trekt de ijzerdeeltjes aan. In de praktijk echter is het magneetscheiding niet zo éénvoudig. Dolf Vernooij van Abdulco, een handelaar in magneetfilters, meldt dat de zeer kleine ijzerverontreinigingen moeilijk te verwijderen zijn van de relatief grote spaandeeltjes (2016). Samuel lost deze moeilijkheid op door de spanen eerst te vermalen tot korrels alvorens ijzerdeeltjes te verwijderen met een magneet (2003).

### 6.2.3 Precompactie

Volledig automatisch precompacteren is een vereiste voor de kost-effectiviteit van smeltloze recyclage. Automatische perssystemen voor aluminium billets zijn echter niet commercieel verkrijgbaar. Deze sectie bespreekt een mogelijkheid voor die automatisatie via briketteren. Ook bij het balenpersen kan inspiratie opgedaan worden. Het mogelijk vermijden van precompactie is besproken in de volgende sectie.

#### *Briketteren*

Briketteren is het samenpersen van spanen tot briketten om de oppervlakte/volumeverhouding te verkleinen en zodoende smeltverliezen te beperken. Figuur 28 legt de 4 stappen van het briketteerproces uit (National Conveyers Company, 2015). De aankoopprijs is relatief laag. Today's Machining World vermeldt een aankoopprijs van \$160000 voor een briketteermachine voor een bedrijf dat 50ton spanen per maand verwerkt in 2005 (Graff, 2005).



**Figuur 28: De 4 stappen van het briketteerproces (National Conveyers Company, 2015)**



Standaard hebben de cilindervormige briketten diameters tot 225mm en hoogtes tot 100mm (Stansz, 2015). Dit is te klein voor het produceren van billets geschikt voor extrusie. Wietse Sijpersma, zaakvoeder van Stansz, de Nederlandse producent van briketteermachines, verduidelijkt de reden van deze kleine briketten (2016). “Bij het samenpersen van aluminium spanen in de briketteerpers zit je bijna tegen de vloeigrens van aluminium aan. In het midden zal de briket zich vastzetten in de mantel. Bij nog langere briketten krijg je daardoor geen constante verdichting doorheen de volledige mantel.” Bij de vraag of het mogelijk is om briketten van 100mm lengte te maken en vervolgens vijf van deze briketten samen te persen tot een billet, antwoordt hij ook negatief. De onregelmatige geometrie van spanen bevordert het in elkaar haken van deze spanen en bijgevolg de stevigheid van de briket. Omdat een dergelijke samengestelde billet slechts platte vlakken tegen elkaar perst zonder het in elkaar haken van de spanen, gelooft hij dat die billet terug kan afbreken op de grensvlakken van de briketten. Hij gelooft dat Stansz een automatische precompactiemachine kan ontwerpen op de volgende manier:

De basis van de machine is hetzelfde als een normale briketteermachine. De slag van de primaire cilinder en de reactiecilinder is nu 500mm langer, zodat een totale slag van 600mm bereikt kan worden, nodig voor de billet. De primaire cilinder is niet vlak maar geprofileerd. In de eerste stap staat de reactiecilinder op zijn dichtste punt bij de primaire cilinder. De perskamer vult zich met spanen en de primaire cilinder perst die spanen tegen de reactiecilinder. Het resultaat is een briket van 100mm lengte met een geprofileerd oppervlak. Vervolgens verplaatst de reactiecilinder zich 100mm naar achter. Opnieuw is de perskamer vrij en vult die zich met spanen. De primaire cilinder perst de spanen samen tegen de eerste briket. Omwille van de geprofileerde vorm haken de briketten in elkaar, wat de kans op het afbreken van de billet op de briketgrens verkleint. Dit proces herhaalt zich tot een billet van 500-600mm gevormd is.

Sijpersma is bereid een dergelijke precompactiepers samen met het ASSuRe consortium te ontwerpen. De investeringskost is nog niet bekend. Aangezien het een volautomatisch proces is, is de operationele kost beperkt tot de elektriciteitskost om de pers aan te drijven.

#### 6.2.4 Extrusie

Extrusie van billets is een volledig matuur proces. Het is ook niet opgenomen in de kostcalculatie van hoofdstuk 4. Echter, om precompactie te vermijden en een continue automatische productielijn op te stellen zijn de alternatieven schroefextrusie en Conform™ mogelijk interessant.

##### 6.2.4.1 Schroefextrusie

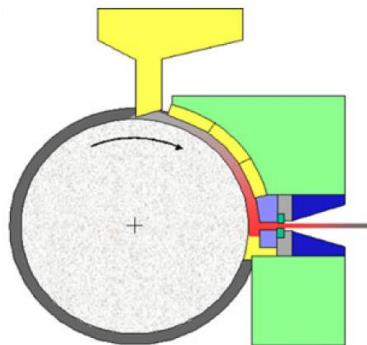
Schroefextrusie is reeds in de literatuurstudie besproken als een alternatieve extrusievorm. Het is een continu proces dat via een schroefbeweging spanen verdicht en door de extrusiematrijs perst. Voor smeltloze recyclage biedt het een duidelijk

voordeel doordat het precompactie vermijdt en in een continue lijn kan volgen op een automatisch reinigingsproces. Het proces is echter nog niet commercieel. De materiaalstroom richting extrusiekamer is veranderlijk en discontinu. Dit resulteert in cyclische variaties in de extrusiesnelheid en bijgevolg geen constante kwaliteit van het profiel (Wideroe, 2013). Geen andere onderzoeksgroepen met vergelijkbare processen zijn bekend bij de auteur.

#### 6.2.4.2 Conform™

Een alternatief voor extrusie is het Conform™ proces, ook soms aangeduid met de naam CRE (Continuous Rotary Extrusion). Dit is een continu extrusieproces dat geen voorafgaande precompactie vereist. Het Brits atoomagentschap vond dit proces oorspronkelijk uit voor gebruik in kerncentrales, maar het vond vooral toepassingen in de industrie (Henley, 1991). Het traditionele toevoermateriaal naar de conform™ extrusiepers is in de vorm van een solide staaf. Sinds de jaren 70 is poeder ook een mogelijk toevoermateriaal. Het proces uitvoeren onder vacuumcondities kan dan nodig zijn om blaarvorming te vermijden (Henley, 1991). Meer recent is het volgens Katsas et al. zelfs mogelijk om partikelmateriaal van verschillende groottes als toevoer te gebruiken, gaande van fijn poeder tot korrels van meerdere centimeters lang (2010). Van Geertruyden vermeldt dat hij in contact is met fabrikanten van conform™ machines voor een industriële opschaling van het compacteren van spanen (2005).

Katsas et al. beschrijven de werking van conform™ (2010). Een trechter voegt partikels toe in een groef op de omtrek van een ronddraaiende schijf (Figuur 29). Deze groef is nauw omsloten en na een hoek van 90° over de omtrek van de schijf is verdere doorgang van de partikels geblokkeerd en bevindt zich een extrusiematrijs. De wrijving tussen schijf en partikels veroorzaakt een zeer sterke lokale opwarming en doet de partikels plastisch vervormen. De opgebouwde spanningen dwingen het materiaal tenslotte door de extrusiematrijs.



**Figuur 29: Conform™ ronddraaiende schijf met extrusiematrijs (Katsas et al. , 2010)**

Wegens de rechtstreekse extrusie van partikelmateriaal lijkt het conform™ proces een geschikt proces voor de rechtstreekse extrusie van spanen. Dit vermijdt de kost van een precompactiestap en kan volgen op reiniging in een automatische lijn omdat het een continu proces is. Echter, de auteur kon weinig recente publicaties vinden over dit

proces. Een mogelijke reden daarvoor is dat het onderzoek naar dit proces vroeger geleid werd door het 'BNF Metals Technology Centre' in het Verenigd Koninkrijk terwijl dit onderzoekscentrum sinds de jaren '90 opgeheven is. Een andere reden is dat onderzoekers het thermomechanisch gedrag van het materiaal in het proces niet goed begrijpen (Thomas et al., 2016). Ben Thomas behoort tot de onderzoeksgroep van Martin Jackson in het departement materiaalkunde van de universiteit van Sheffield in het Verenigd Koninkrijk. Zij onderzoeken het conform™ proces om titanium om te vormen van erts tot primair metaal zonder smelten. Ze behandelen ook de industriële opschaling van dit rechtstreeks consolideren van titanium via conform™ (Thomas, 2016).

In een gesprek met Ben Thomas, volgend op de constatactie dat weinig onderzoek naar het conform™ proces bekend is, verduidelijkt hij dat het meeste recente onderzoek door commerciële instellingen die hun onderzoek niet bekend maken gevoerd is (2016). Voor het extruderen van granulair materiaal, zoals spanen, bestaat er een uitbreiding op het conform™ proces met een precompactiewiel. Dit verzorgt het rollen/precompacteren van de spanen alvorens de eigenlijke extrusie. Zelf zijn ze ook bezig met onderzoek naar recyclage van spanen, onder andere van aluminium, maar dit is niet de hoofddoelstelling van hun onderzoek. Ze hebben een Meltech Ex300 CRE machine beschikbaar voor experimenteel onderzoek. Thomas besluit met het verwijzen naar recent onderzoek naar het conform™ proces voor aluminium. Velay modelleert het conform™ proces met eindige elementensoftware (2004). De resultaten zijn echter weinig representatief voor het recycleren van spanen. Stadelmann ontwikkelde een model dat de persdruk en warmteopbouw beschrijft gedurende conform™ extrusie van aluminium poeder, op basis van experimenten met het extruderen van AlSi12, AlMgSi0,5 en commercieel puur aluminium en een numerische simulatie (Stadelmann, 2009).

### 6.3 Conclusie en keuze van het beste proces

In sectie 6.1 zijn efficiëntieverbeteringen geëvalueerd. In sectie 6.3 zijn alternatieve processen besproken. Deze sectie vat dit samen en geeft een aanbeveling voor een industrieel toepasbaar smeltloos recyclageproces.

In de ASSuRe test is de reiniging de belangrijkste kost omwille van de arbeid en het inefficiënt gebruik van water en reinigingsmiddel. Tabel 22 vat alternatieve processen samen.

Alternatieve verspaningsmethodes, zoals droog of cryogeen verspanen, vermijden de reinigingsstap. Echter, fabrikanten passen ze vandaag slechts zeer beperkt toe. Het is onzeker of de totale systeemkost lager of hoger is met het gebruik van deze alternatieve methodes. Zelfs indien verder onderzoek de hypothese bevestigt dat de systeemkost lager is, rest er nog de moeilijkheid van het overtuigen van fabrikanten

om over te schakelen op nieuwe processen. Dit vertraagt de schaalvergroting van het smeltloos recycleren, terwijl die schaalgrootte nodig is om een volautomatische productielijn te verantwoorden, een vereiste voor een kost-competitief recyclageproces. Daarom is het niet aan te raden om het slagen van smeltloze recyclage te laten afhangen van het vermijden van de reinigingsstap.

Centrifugeren en briketteren reinigen de spanen niet voldoende. Centrifugeren is eventueel in te zetten voor pre-reiniging van sterk vervuilde spanen. Thermische reiniging is een mogelijkheid en gebaseerd op de beschikbare literatuur is oxidatie waarschijnlijk geen probleem. Het is echter moeilijk in te bouwen in een automatische productielijn omdat thermisch reinigen een tijdsduur heeft van meerdere uren. Dit betekent dat er een handlingkost gepaard gaat met thermische reiniging, die het relatief duur maakt. Reinigen met organische solventen is vooral omwille van de ecologische kost niet aan te raden. In de nabije toekomst, indien chemische leasingformules beschikbaar worden, kan dit echter veranderen.

Gewoon reinigen via wassen, spoelen en drogen valt verder te optimaliseren en er kunnen automatische machines voor gezocht worden. Echter, het lijkt zeer sterk op het trillend reinigen, wat een aantal grote voordelen heeft:

- minder nood aan reinigingsmiddel & wassen met koud water
- volledig gesloten kringloop
- droogstap kan in volautomatische productielijn

De voordelen maken het een kosteffectief proces. Het enige verdere nodige onderzoek is of de onregelmatige vorm van spanen de reiniging niet hinderen en of kleine spaandeeltjes die terechtkomen in het reinigingswater geen probleem vormen. Trillend reinigen is aangeraden als de meest veelbelovende piste voor de reinigingsstap.

Voor precompactie is slechts één manier gevonden om te automatiseren, via het opschalen van een machine voor het produceren van briketten uit spanen. Producent Stansz wil dit mee ontwikkelen. Een niet-automatische precompactie is niet kost-competitief. Alternatief is het gebruik van de continue extrusiemethodes Conform™ of schroefextrusie, die geen precompactie vereisen. Hierbij is het Conform™ proces het meest aangewezen, aangezien dit verder ontwikkeld is dan schroefextrusie en commerciële machines bestaan. Wel is verder onderzoek nodig naar de precieze eigenschappen van een Conform™ extrusieprofiel op basis van aluminium spanen.

Proces	function- aliteit*	operationele kost [€/kg]	Voordelen	Nadelen
droog verspanen	5	0	vermijdt reiniging & impact koelvloeistoffen, minder aerosolen	stysteemkost lager?, verspaners overtuigen, standtijd, oppervlakteruwheid
cryogeen verspanen	5	0	vermijdt reiniging & impact koelvloeistoffen, minder aerosolen, lange standtijd	stysteemkost lager?, verspaners overtuigen
Centrifugeren	2	0,003	pre-zuivering zeer vervuilde spanen	reiniging onvoldoende
Thermisch	4	0,133	éénvoud, geen reinigingsmiddel	oxidatie?, geen reiniging vaste stofdeeltjes, tijdsduur
Briketteren	2	0	gratis' voordeel van precompacteren via briketteren, recyclage koelvloeistof	reiniging onvoldoende
Solventreinigen	5	vergelijkbaar met wassen	zeer goede reiniging organische verontreinigingen, drogen niet nodig	impact emissies, brandbaar, investeringskost
trillend reinigen	5	0,02	volautomatisch, recyclage reinigingsmiddel, lage impact	investeringskost
magnetische scheiding	3	0	verwijdering ijzercontaminaties	moet in combinatie met andere reinigingsmethode, moeilijke verwijdering kleine ijzerdeeltjes

\*(1=zeer slecht,  
5=uitstekend)

**Tabel 22: Vergelijking van de alternatieve reinigingsprocessen**

Het invoeren van deze processen leidt tot een volautomatisch proces dat zuinig omspringt met grondstoffen. De vooropgestelde operationele kost voor het basisproces van 0,30€/kg billet is hiermee te behalen en mogelijk zelfs te overtreffen. Smeltloze recyclage kan dus kost-competitief worden met recyclage via hersmelten. De eerste vereiste om dit te doen slagen is een smeltloos recyclageproces in een volledig automatische lijn, wat schaalgrootte en het samenbrengen van het proces op één locatie vereist. Daarnaast moet nog bevestigd worden of de voorgestelde processen zoals verwacht de reinigungsstap en precompactiestap kunnen uitvoeren.

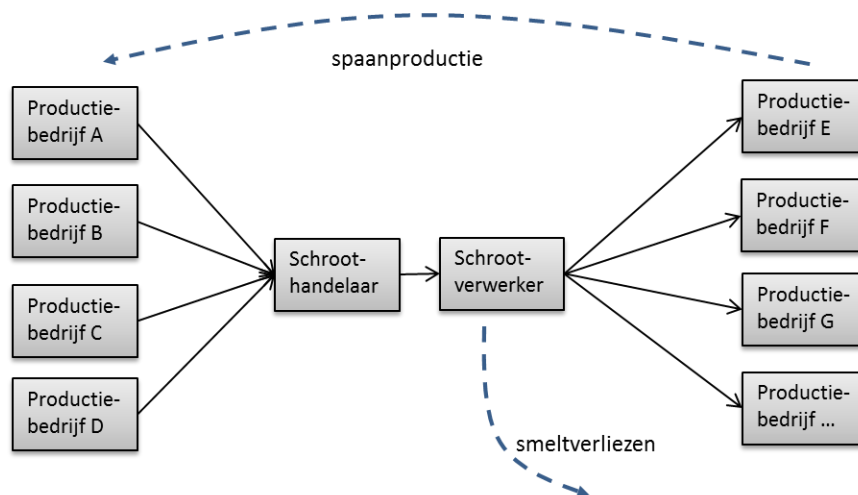
# Hoofdstuk 7: businessmodellen die smeltloze recyclage een succes kunnen maken

Geschikte businessmodellen kunnen de waardecreatie van smeltloze recyclage vergroten en zo het valorisatiepotentieel optimaal benutten. Het doel van het businessmodel is een win-winsituatie creëren voor elke betrokken partner in het systeem. Dit hoofdstuk bekijkt het huidige bedrijfssysteem en businessmodel voor de recyclage van verspaningsafval. Het identificeert de tekortkomingen van dit model voor smeltloze recyclage van verspaningsafval. Vervolgens stelt het een alternatief businessmodel voor. Dit model wordt tenslotte getoetst aan de realiteit van de partners betrokken in het ASSuRe project.

## 7.1 Het huidige businessmodel

### 7.1.1 Beschrijving van het huidige businessmodel

Het bedrijfssysteem toegepast bij de huidige recyclage via hersmelten bestaat uit verspanende productiebedrijven, schroothandelaars, schrootverwerkers en productiebedrijven met profielen of billets als grondstof. Verspanende productiebedrijven verkopen de afvalstroom die ze genereren, verspaningsafval, aan de schroothandelaar. De schroothandelaar transporteert en verzamelt verspaningsafval van vele productiebedrijven. Dikwijls briketteert de schroothandelaar dat verspaningsafval om het compacter te kunnen vervoeren. De schrootverwerker koopt spanen aan bij de schroothandelaar. Vervolgens hersmelt de schrootverwerker het verspaningsafval tot billets. Hierbij oxideert een deel van de aluminiummassa, de smeltverliezen. Een deel van die billets worden geëxtrudeerd tot profielen. De schrootverwerker verkoopt zowel billets als profielen aan productiebedrijven. Deze bedrijven verwerken billets en profielen in hun eindproducten. Dikwijls genereren ze hierbij opnieuw verspaningsafval. Figuur 30 beschrijft deze waardeketen.



**Figuur 30: Het businessmodel bij recyclage via hersmelten**

Dit systeem levert een werkend businessmodel voor alle betrokken partners. Het verspanend bedrijf recupereert een deel van zijn grondstofkost. De schroothandelaar verdient een winstmarge op het verzamelen, vervoeren en opslaan van grote hoeveelheden verspaningsafval. De schrootverwerker is verzekerd van voldoende aanvoer en kan zich concentreren op zijn kerntaak, het recyclen zelf. Met de toegevoegde waarde gecreëerd door het omvormen van spanen tot secundair aluminium grondstoffen voor productiebedrijven behaalt de schrootverwerker zijn winstmarge.

### 7.1.2 Problemen voor smeltloze recyclage met het huidige businessmodel

Indien de schrootverwerker overschakelt op reinigen en precompacteren van de spanen in plaats van hersmelten, kan het huidige businessmodel rechtstreeks overgenomen worden. Dit levert echter enkele problemen op.

#### 7.1.2.1 Zuiverheid afvalstroom

Bij smeltloze recyclage kunnen legeringen niet opnieuw samengesteld worden door te mengen, zoals bij het hersmelten wel mogelijk is. De spanen moeten dus dezelfde legering hebben als het eindprofiel. Dit is enkel mogelijk door ze per legering te scheiden tijdens productie en die scheiding aan te houden tot aan de verwerking.

Afhankelijk van de vervuilingsgraad en de legeringssamenstelling krijgen verspanende bedrijven een hogere prijs voor hun verspaningsafval. Echter, schroothandelaars scheiden slechts per legeringsfamilie, niet per specifieke legering. Verspanende bedrijven hebben bijgevolg geen enkele drijfveer om verschillende legeringen van eenzelfde legeringsfamilie te scheiden binnen hun productie. Zelfs indien ze slechts één legering verspanen, wordt deze bij de schroothandelaar opnieuw gemengd met andere legeringen van dezelfde familie.

### 7.1.2.2 Competitiviteit smeltloze recyclage in opstartfase

In Hoofdstuk 6 blijkt dat smeltloze recyclage, met een operationele kost voor de schrootverwerker van 0,30€/kg billet, competitief is met recyclage van spanen via hersmelten, indien het proces wordt uitgevoerd op een efficiënte en volautomatische productielijn. Hiervoor is echter een zekere schaalgrootte nodig. Tijdens de opstartfase is de operationele kost voor de schrootverwerker geschat op 0,74€/kg billet. In het huidige businessmodel is de marge die een schrootverwerker heeft tussen de aankoop van verspaningsafval van de schroothandelaar en de verkoop van een billet aan een productiebedrijf gemiddeld slechts 0,61€/kg billet.

Bovendien wordt het bereiken van schaalgrootte bemoeilijkt doordat de schrootverwerker geen rechtstreeks contact heeft met de verspanende bedrijven, zodat die moeilijk kunnen aangespoord worden om verspaningsafval van verschillende legeringen te scheiden. Ook zal het vinden van een grote afzetmarkt moeilijk zijn omdat klanten mogelijk de herkomst van het afval willen kennen om hen in te dekken indien toch problemen zouden opduiken met de profielen geproduceerd via de nieuwe techniek van het smeltloos recycleren. Startupkost, leveranciers en klanten maken de startupfase voor de schrootverwerker zeer moeilijk in het huidige businessmodel.

### 7.1.2.3 Ongelijke winst- en risicoverdeling

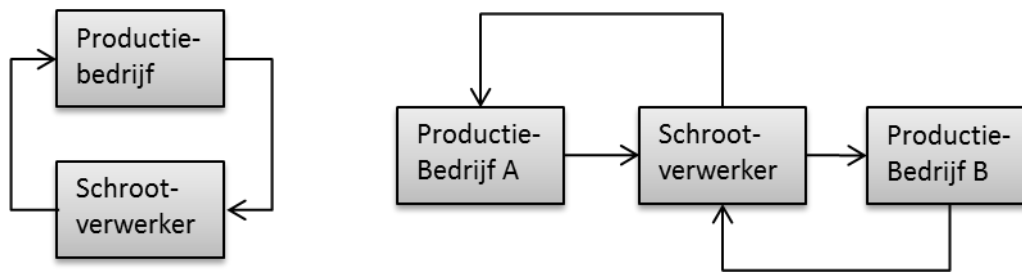
In een ideaal systeem is de winst min of meer evenredig verdeeld tussen de verschillende deelnemende bedrijven. Bij het rechtstreeks overnemen van het businessmodel voor recyclage via hersmelten is dat echter niet meer het geval. De schrootverwerker heeft bij startup een operationele kost hoger dan zijn volledige marge (Sectie 6.1.5). De schroothandelaar daarentegen heeft een transportkost die laag is tegenover zijn winstmarge (Sectie 6.1.1). Bovendien moet de schrootverwerker investeren in nieuwe machines, terwijl de schroothandelaar dat niet doet. Het investeringsrisico ligt vooral bij de schrootverwerker, de winst ligt vooral bij de schroothandelaar. Ook het verspanend bedrijf moet investeren in het scheiden van afvalstromen en zal dit enkel doen indien het kan meedelen in de winst.

## 7.2 Een voorgesteld businessmodel voor smeltloze recyclage

### 7.2.1 Beschrijving

Het voorgestelde circulaire businessmodel bestaat in zijn éénvoudigste vorm slechts uit 2 actoren: een productiebedrijf en een schrootverwerkend bedrijf (Figuur 31). Het productiebedrijf sorteert zijn verspaningsafval en verkoopt dit aan het schrootverwerkend bedrijf. Het schrootverwerkend bedrijf recycleert tot profielen (warmextrusie) of near-net-shape producten (vonkplasma-sinteren). Hetzelfde productiebedrijf koopt deze profielen aan als grondstof.





**Figuur 31: (a) circulair businessmodel en (b) semi-circulair businessmodel**

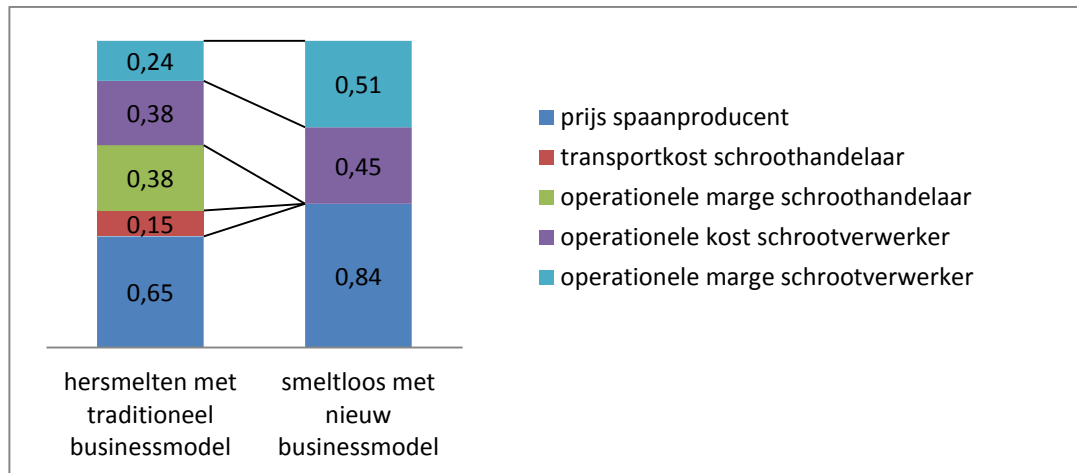
De meest geschikte markt voor smeltloos gerecycleerd aluminium is de constructiesector (zie Hoofdstuk 3). Bedrijven die ramen en andere bouwproducten maken uit profielen verspanen echter meestal slechts een klein deel van hun aangekochte grondstoffen. Om aanbod aan verspaningsafval en vraag naar profielen of near-net-shape producten beter op elkaar af te stemmen, is het waarschijnlijk nodig dit model uit te breiden naar een semi-circulair businessmodel (Figuur 31). In dit semi-circulair model bestaat het systeem uit 2 productiebedrijven en een schrootverwerker. De hoeveelheid verspaningsafval en de legeringen van dat verspaningsafval van het eerste bedrijf komen precies overeen met de hoeveelheid en legering van de profielen die het tweede bedrijf nodig heeft.

### 7.2.2 Opbrengsten

Financieel gezien is het belangrijkste voordeel van dit businessmodel het elimineren van de schroothandelaar. Sectie 7.1.2.3 haalt aan dat die schroothandelaar in het traditionele businessmodel het grootste deel van de winst van smeltloze recyclage zou opstrijken zonder mee het risico van een nieuw proces te dragen. Bij rechtstreekse verkoop en transport van verspaningsafval tussen productiebedrijf en schrootverwerker moet de kost van transport natuurlijk wel gedragen worden. De rest van de marge die de schroothandelaar neemt in het traditionele businessmodel kan nu verdeeld worden tussen productiebedrijf en schrootverwerker.

In Sectie 4.8 is de marge die de schroothandelaar heeft geschat als 0,53€/kg billet. In Sectie 4.7 is de kost van transport een redelijk efficiënt maar nog niet optimaal scenario geschat als 0,15€/kg billet. Dit betekent dat een additionele winst van 0,38€/kg billet kan verdeeld worden tussen productiebedrijf en schrootverwerker na het elimineren van de schroothandelaar uit het systeem. Bij een gelijke verdeling van deze winst resulteert dit voor het productiebedrijf in een verkoopprijs van de spanen die 30% hoger ligt dan de gemiddelde prijs die een productiebedrijf voor verspaningsafval krijgt. Voor de schrootverwerker resulteert dit in een vergroting van de marge van 0,61€/kg billet tot 0,80€/kg billet. Dat betekent dat zelfs in de opstartfase de operationele kost van 0,74€/kg billet binnen de totale marge valt. Omdat deze totale marge ook overheadkosten moet dekken betekent dit waarschijnlijk nog geen winst, maar wordt het verlies beperkt. Wanneer de operationele kost bij het bereiken van voldoende schaalgrootte daalt tot 0,30€/kg billet vergroot de

operationele marge voor de schrootverwerker met 60% door het elimineren van de schroothandelaar. Tegenover hersmelten, met een operationele kost van 0,38€/kg billet, vergroot de operationele marge voor de schrootverwerker zelfs met 117%, van 0,24€/kg billet tot 0,51€/kg billet (Figuur 32).



**Figuur 32: Vergroten van de marge via smeltloze recyclage en het voorgestelde businessmodel**

Het productiebedrijf heeft nu een duidelijke drijfveer om verspaningsafval te sorteren per legering omwille van 2 redenen. Ten eerste krijgt het productiebedrijf een hogere prijs voor dit verspaningsafval. Ten tweede neemt het productiebedrijf profielen af gemaakt uit het eigen verspaningsafval. Bij volledig gescheiden afvalstromen is de legeringssamenstelling van de gerecycleerde profielen constant en kan dus een hogere kwaliteit van eindproduct gewaarborgd worden. Het bedrijf controleert dus zelf de kwaliteit van zijn gerecycleerde grondstoffen door de afvalstroom zuiver te houden. Door het kleinere aantal tussenstappen tussen productie en recyclage van verspaningsafval verkleint bovendien de kans dat afvalstromen verder in de keten nog vermengd raken.

De schrootverwerker is bij aankoop van verspaningsafval van een productiebedrijf verzekerd dat het gerecycleerd profielen afgenomen zal worden door hetzelfde bedrijf. Dit laat lange termijndenken toe. Bij verzekerde afname verkleint het risico om te investeren in nieuwe processen. Door rechtstreeks contact met productiebedrijven kan de schrootverwerker snel inspelen op veranderingen in de beschikbare hoeveelheid verspaningsafval bij die bedrijven.

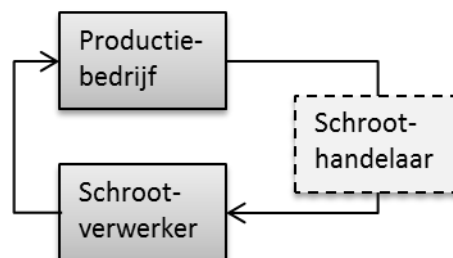
### 7.2.3 Uitdagingen

#### 7.2.3.1 De schroothandelaar

Het elimineren van de schroothandelaar uit de keten houdt risico's in. Momenteel zijn zowel het productiebedrijf als de schrootverwerker voor verschillende afvalstromen afhankelijk van de schroothandelaar. Deze machtspositie kan de schroothandelaar

uitbuiten door het weigeren van het afnemen van andere afvalstromen indien het verspaningsafval niet meer via hem passeert.

Een voorstel om dit te vermijden is het inschakelen van de schroothandelaar via een tollingscontract (Figuur 33). Bij een tollingscontract wordt de schroothandelaar geen eigenaar van de spanen. Hij transporteert ze van het productiebedrijf naar de schrootverwerker en krijgt een vaste vergoeding voor dit transport. De schroothandelaar beperkt hierdoor zijn risico's. Schommelingen in de LME wereldmarktprijs voor aluminium in de periode tussen aankoop en verkoop van het verspaningsafval hebben geen invloed meer op de winst van de schroothandelaar, omdat die niet zelf eigenaar is van de spanen. Daarnaast is het onmogelijk dat een partij verspaningsafval geen afnemer vindt. Ook heeft de schroothandelaar geen financiële reserves nodig om de tijd tussen betalen aankoop van het verspaningsafval en betaald worden bij verkoop van het verspaningsafval te overbruggen.



**Figuur 33: risicobeperkend circulair businessmodel met tollingsovereenkomst**

De kost van de schroothandelaar is in dit geval beperkt tot transport, in Hoofdstuk 6 geschat als 0,15€/kg billet. Indien in een tollingscontract overeengekomen wordt om de schroothandelaar 0,20€/kg te betalen, heeft die een operationele winstmarge van 25%. Een gelijke verdeling van de overige 0,33€/kg billet marge die de schroothandelaar in het traditionele businessmodel moet krijgen resulteert in 25% hogere prijs voor verspaningsafval van het productiebedrijf en een 40% grotere totale marge voor de schrootverwerker.

### 7.2.3.2 Kwaliteit en schaalgrootte

De vergelijking van kosten en opbrengsten bij smeltloze recyclage en recyclage via hersmelten veronderstelt een zelfde kwaliteit eindproduct. Op basis van de literatuurstudie kan verondersteld worden dat dit voor de mechanische eigenschappen geldt. Echter, vele andere eigenschappen zijn slechts beperkt onderzocht. Specifiek voor de bouwsector kan de oppervlaktekwaliteit en corrosieweerstand van profielen minder goed zijn dan bij referentieprofielen.

Bij dergelijke onzekerheid is het moeilijk om productiebedrijven te overtuigen smeltloos gerecycleerde profielen als grondstof te gebruiken. Tegelijk is schaalgrootte nodig om kost-efficiënt te recyclen en van smeltloze recyclage een winstgevende activiteit te maken. Een nauwe samenwerking tussen bedrijven en kennisinstellingen

is vereist om eigenschappen waar vraag naar is in de markt te onderzoeken, documenteren en verbeteren.

### 7.2.3.3 Investerings

In deze master thesis is de operationele kost behandeld. Dat veronderstelt dat investeringen in machines om de processen uit te voeren reeds gebeurd zijn. Bij het ontwikkelen van een nieuw proces moeten deze investeringen uiteraard nog gebeuren. Bovendien is investeren in een nieuw proces steeds een risico. Het proces kan immers mislukken en veelal is dan slechts gedeeltelijke recuperatie van de investeringskost mogelijk. De vraag naar de totale investeringskost en de nodige schaalgrootte van smeltloze recyclage om deze investering te verantwoorden staat nog open.

## 7.3 Toetsing van het voorgestelde model bij de ASSuRe partners

Deze sectie bestudeert eerst het aluminiumgebruik en de fractie verspaningsafval daarvan bij Vasco en Wuyts, partners in het ASSuRe project. Dit gebeurt kwalitatief, op basis van informatie verstrekt door Vasco en Wuyts en kwantitatief, met behulp van een door Sirris bij Vasco en Wuyts uitgevoerde materialenscan (OVAM, 2016). Op basis van deze gegevens toetst het de geschiktheid van het voorgestelde businessmodel voor beide bedrijven.

### 7.3.1 Case study Vasco

Vasco is een producent van radiatoren, vloerverwarming en ventilatie. De materialenscan behandelt enkel de aluminium producten in hun aanbod. Dat zijn de radiatoren Zaros, Aluzen, Bryce, Canyon en Beams, samen goed voor 9% van de omzet van Vasco.

#### 7.3.1.1 Vraag naar aluminium profiel

Vasco koopt jaarlijks 325ton aluminium aan, waarvan 265,6ton aluminium AA6060 profielen aan een prijs van 2,7€/kg. De inkomende profielen hebben een lengte van 6m en een doorsnede variërend van 25\*40mm tot 150\*150mm. Deze worden verwerkt tot radiatorprofielen, geassembleerd, getest en krijgen een poedercoating. De belangrijkste eigenschappen voor deze aluminium profielen zijn een goede warmtegeleidbaarheid, goede bewerkbaarheid en ze mogen niet te zacht of te bros zijn. Warmtegeleidbaarheid is vooral afhankelijk van de uiteindelijke vorm van de radiator, wat het belang van deze eigenschap enigszins vermindert. Lasbaarheid is van geen belang.

Het vervangen van deze profielen door smeltloos gerecycleerde profielen heeft weinig voordelen. De betere hardheid en sterkte van smeltloos gerecycleerde profielen is geen belangrijke eigenschap voor Vasco. De verminderde ductiliteit bij warmextrusie benadeelt de bewerkbaarheid daarentegen. Warmtegeleidbaarheid kan ook licht

verminderen door de hogere concentratie vreemde deeltjes in smeltloos gerecycleerd aluminium. Het enige mogelijke voordeel komt er wanneer Vasco een radiator gemaakt uit smeltloos gerecycleerde profielen in de markt kan zetten als 'groene' radiator, waar klanten een meerprijs voor willen betalen. De radiatoren Zaros, Bryce en Aluzen hebben een massa van 15-20kg aluminium voor de kleinste afmeting en een massa van 35-43kg voor de grootste afmeting. Tegenover het gebruik van aluminium gerecycleerd via hersmelten, zoals nu het geval is, besparen dergelijke 'groene' radiators 3400-10000mPt en 35-130kg CO<sub>2</sub>. Vanuit de veronderstelling dat de ecologische impact van een radiator in de gebruiksfase vele malen groter is, is dit echter slechts een zwak argument vanuit ecologisch oogpunt. Dit moet geverifieerd worden met een LCA studie indien gewenst.

#### 7.3.1.2 Aanbod verspaningsafval

Vasco is geen bedrijf dat veel verspaant. Wel zagen en frezen ze de aluminium AA6060 profielen voor de radiatoren op maat waar nodig. Het gaat om verspaningsafval met een gekende compositie, geschikt dus voor smeltloos recycleren. Dit resulteert in 3270kg verspaningsafval per jaar met een verkoopwaarde van 2943 euro of 0,9€/kg. Deze prijs is 40% hoger dan de berekende gemiddelde prijs voor verspaningsafval, waarschijnlijk omdat het een gescheiden afvalstroom van één legering is. Deze hoeveelheid verspaningsafval bedraagt slechts 1% van de totale hoeveelheid aangekocht aluminium.

#### 7.3.1.3 Toetsing aan het voorgestelde businessmodel

Smeltloos gerecycleerde profielen zijn niet geschikt voor Vasco. Een circulair businessmodel kan dus niet toegepast worden. Enkel indien Vasco een hogere prijs kan krijgen voor verspaningsafval is meewerken aan smeltloze recyclage interessant. De prijs die Vasco nu krijgt is echter al hoog. In het semi-circulaire model zonder schroothandelaar krijgt Vasco maximaal 0,19€/kg verspaningsafval bovenop de prijs die ze nu krijgen. Dat betekent een maximale jaarlijkse bijkomende winst van 620 euro. Het is duidelijk dat de hoeveelheid verspaningsafval die Vasco genereert niet voldoende is om significant voordeel te halen uit het meewerken aan smeltloze recyclage via het voorgestelde businessmodel.

### 7.3.2 Case study Wuyts

Wuyts maakt straatmeubilair en stadsinfrastructuur, gevelbekleding, kogelwerende wanden en ramen en deuren op maat. Het hoofdmateriaal voor deze producten is aluminium.

#### 7.3.2.1 Vraag naar aluminium profiel

Wuyts koopt jaarlijks 84,5ton aluminium aan, waarvan 34,5ton AA6060 profielen en 50ton AlMg3 platen. 65% van de profielen zijn verwerkt in straatmeubilair, 25% in gevelbekleding en 10% in op maat gemaakte ramen en deuren. Dit zijn toepassingen in Hoofdstuk 3 geïdentificeerd als potentieel geschikt voor smeltloos gerecycleerde

profielen, indien deze een voldoende oppervlaktekwaliteit hebben en na poedercoating ook een voldoende corrosieweerstand hebben. De goede sterkte van smeltloos gerecycleerde profielen is nuttig voor zowel straatmeubilair, gevelbekleding als ramen en deuren. De lagere ecologische impact van smeltloos gerecycleerde profielen is een voordeel voor aanbestedingen van straatmeubilair bij de overheid, die een voorbeeldfunctie heeft voor het gebruik van ecologisch verantwoorde producten. Het maatwerk en de kleine series van Wuyts laten meer variatie in kwaliteit of kleinere productiehoeveelheden aluminium profiel toe. Dit is vooral nuttig bij opstart van smeltloze recyclage. Onder voorwaarde van de goede oppervlaktekwaliteit is Wuyts een potentieel geschikte afnemer van smeltloos gerecycleerde profielen.

#### 7.3.2.2 Aanbod verspaningsafval

Wuyts genereert 1500kg AlMg3 verspaningsafval per jaar en verkoopt dit aan 0,30€/kg. Dit is lager dan de geschatte gemiddelde prijs van 0,65€/kg die schroothandelaars betalen voor verspaningsafval. De jaarlijkse hoeveelheid is echter zo klein dat dit optimaliseren slechts een verwaarloosbaar effect heeft. Bovendien is het verspaningsafval afkomstig van een legering geschikt voor plaatmateriaal die mogelijk via differentiële snelheidsrollen smeltloos gerecycleerd kan worden. Een circulair businessmodel is echter niet mogelijk door de zeer kleine hoeveelheid verspaningsafval, slechts een fractie van de hoeveelheid aluminium grondstoffen die Wuyts aankoopt.

#### 7.3.2.3 Vraag naar near-net-shape product

Een onderdeel van het straatmeubilair dat Wuyts maakt zijn voetstukken uit de AlMg3 legering. Ze worden gemaakt op basis van dikke aluminium platen en uitgefreesd in het vlak tot de gewenste vorm. Met vonkplasmasinteren is het mogelijk om deze platen meteen in de gewenste vorm te sinteren. Hoewel Wuyts de precieze hoeveelheid voetstukken die ze produceren en de verspaande hoeveelheid materiaal per voetstuk niet ter beschikking heeft, kan een schatting de mogelijke winst door vonkplasmasinteren gemaakt worden op basis van de bij Wuyts uitgevoerde materialenscan.

Het straatmeubilair gemaakt bij Wuyts bestaat voornamelijk uit aluminium AA6060 extrusieprofielen. Daarnaast bestaat dit straatmeubilair gemiddeld gezien voor 20% uit AlMg3 platen. In totaal bedraagt dit 7500kg AlMg3 plaatmateriaal dat jaarlijks aangekocht wordt voor de verwerking in straatmeubilair. De fractie daarvan in voetstukken is niet precies gekend, maar geschat op 50%. Dit geeft een totaal van 3250kg plaatmateriaal dat Wuyts jaarlijks tot voetstukken verwerkt.

De vermeden kost bij het gebruik van near-net-shape producten valt uiteen in de vermeden kost van de aankoop van aluminium dat verspaningsafval wordt en de vermeden productiekost van het bewerken van het materiaal. Verder wordt verondersteld dat het near-net-shape product 90% van de huidige hoeveelheid nodige verspaning kan vermijden.

Wuyts koopt het plaatmateriaal aan 3,00€/kg en verkoopt verspaningsafval aan 0,30€/kg. Per vermeden kg spaanafval bespaart Wuyts bijgevolg 2,70€/kg grondstofkost. 70% van het verspaningsafval wordt verspaand bij het produceren van straatmeubilair. Onder de veronderstelling dat binnen het straatmeubilair enkel de voetstukken een verspaningsbewerking vereisen, resulteert dit in 1050kg verspaningsafval afkomstig van voetstukken per jaar. Dat betekent dat 1/3 van de massa van de voetstukken verspaand wordt. Per kg aangekocht plaatmateriaal komt dit neer op een verloren grondstofkost van 0,87€/kg.

De materialenscan alloceert een verloren productiekost per materiaal op basis van de totale loonkost in het bedrijf. De verloren productiekost voor het onnodig bewerken van AlMg3 platen bedraagt in totaal 137000€. Per kg aangekocht plaatmateriaal komt dit neer op een verloren productiekost van 2,74€/kg. Deze ruwe schatting is zelfs een onderschatting omdat ze gebaseerd is op al het AlMg3 plaatmateriaal, terwijl de voetstukken een disproportioneel grotere verloren productiekost genereren.

Indien Wuyts de aluminium platen voor voetstukken vervangt door een smeltloos gerecycleerd near-net-shape product dat 90% van het huidige verspaningsafval vermijdt, komt dit neer op een vermeden kost van 3,25€/kg aangekochte massa plaatmateriaal voor voetstukken. Voor de totale hoeveelheid plaatmateriaal voor voetstukken die Wuyts aankoopt komt dit neer op een vermeden kost van 10500€/jaar. Ook in dit geval is een circulair businessmodel niet nodig, omdat het gebruiken van near-net-shape producten de resterende hoeveelheid verspaningsafval bij Wuyts zeer sterk herleidt.

Anders gesteld betekent dit dat near-net-shape producten geproduceerd met smeltloze recyclage via vonkplasma-sintering tot 3,25€/kg duurder mogen zijn dan het huidig aangekochte plaatmateriaal, dat een prijs heeft van 3,00€/kg. Dat betekent meer dan een verdubbeling. De totale operationele kost van vonkplasma-sinteren, inclusief reinigen en precompacteren van de spanen, bedraagt in een semi-automatische opstelling 1,64€/kg en in een volautomatische productielijn 0,89€/kg (Hoofdstuk 6). Zelfs een semi-automatisch proces valt dus ruim binnen de marges mogelijk gemaakt door de meerwaarde van een near-net-shape product. De vermoedelijk hoge kost voor het maken van een matrijs voor dit near-net-shape product kan deze meerwaarde echter volledig teniet doen voor de lage aantallen voetstukken die Wuyts nodig heeft. Dat is onderwerp voor verder onderzoek.

## 7.4 Conclusie

Het huidige businessmodel voor de recyclage van verspaningsafval heeft enkele nadelen voor smeltloze recyclage: het geeft de spaanproducent slechts de drijfveer om te sorteren per legeringsfamilie, niet per legering en het legt het risico voor het starten van smeltloze recyclage vooral bij de schrootverwerker en de gebruiker van smeltloos

gerecycleerde aluminium, terwijl de winst, zeker in de opstartfase, vooral bij de schroothandelaar ligt. Om die reden is een circulair businessmodel voorgesteld, waarbij de schroothandelaar geëlimineerd is of slechts betrokken is via een tollingsovereenkomst.

Het toetsen van dit model aan de situatie bij projectpartners Vasco en Wuyts levert echter weinig bruikbare resultaten. Smeltloos gerecycleerde profielen zijn omwille van de eigenschappen niet interessant voor Vasco. De hoeveelheid verspaningsafval die Vasco, zowel als Wuyts genereren is zeer klein. Voor hen is een circulair businessmodel waar ze hun eigen verspaningsafval gebruiken in hun producten dus weinig realistisch. Een semi-circulair businessmodel met de aankoop van smeltloos gerecycleerde profielen uit verspaningsafval van een ander bedrijf is mogelijk wel geschikt voor Wuyts. Ook toont de case study bij Wuyts aan dat near-net-shape producten, gerecycleerd uit spanen via vonkplasma'sinteren aanzienlijke besparingen kunnen genereren. In het geval van Wuyts kan een kost van 3,25€ per kg aangekocht plaatmateriaal voor voetstukken vermeden worden. Dit betekent dat vonkplasma'sinteren omwille van de capaciteit voor het produceren van near-net-shape producten aanzienlijk duurder mag zijn dan traditionele productietechnieken. Verder onderzoek moet uitwijzen vanaf welke productieaantallen dit voordeel opweegt tegenover de investering in een matrijs voor een near-net-shape product.

Uit deze toetsing blijkt dat beide projectpartners niet geschikt zijn voor een circulair smeltloos recyclage-businessmodel. Omwille van de kleine hoeveelheden verspaningsafval die Wuyts en Vasco genereren lijkt het moeilijk om de schroothandelaar, die niet alleen transporteert maar ook aan schaalvergroting doet door het afval van meerdere bedrijven samen te brengen, buiten spel te zetten. Ook hebben bedrijven als Vasco en Wuyts reeds een afvalstroom gescheiden per legering, omdat ze slechts één legering verspanen. Zij hoeven dus geen drijfveer meer te hebben om afval te scheiden, terwijl de schroothandelaar wel een drijfveer nodig heeft om de afvalstromen gescheiden te houden per legering. In de veronderstelling dat Vasco en Wuyts representatief zijn voor de meeste bedrijven in de bouwsector, is het voorgestelde circulaire businessmodel niet geschikt voor die sector. Toetsing aan andere bedrijven moet dit uitwijzen. Het kan wel een geschikt businessmodel zijn voor toeleveranciers in de vliegtuigindustrie, die grote hoeveelheden aluminium van dezelfde legering verspanen (zie Hoofdstuk 3).



## Hoofdstuk 8: Conclusie

Deze thesis bestudeert het valorisatiepotentieel van de smeltloze recyclagetechnieken warmextrusie en vonkplasma-sinteren voor aluminium. Op basis van zijn eigenschappen is er een mogelijke vraag naar smeltloos gerecycleerd aluminium. Het ecologische voordeel tegenover recyclage via hersmelten is significant. Bij integratie in een volautomatisch proces is smeltloze recyclage kostcompetitief met recyclage via hersmelten. Op basis van deze bevindingen wordt besloten dat smeltloze recyclage potentieel valoriseerbaar is. Hiervoor moeten echter nog belangrijke stappen gezet worden.

De in Hoofdstuk 2 bestudeerde eigenschappen van smeltloos gerecycleerd metaal hangen af van het materiaal en het gebruikte proces. De meeste processen resulteren in een verfijnde microstructuur met een bijhorende vloeispanning en treksterkte die even goed of beter is dan een referentiemateriaal. Omwille van de grote hoeveelheid oxides in het materiaal is de vervormbaarheid en vermoeiingsweerstand iets lager dan voor het referentiemateriaal. De herhaalbaarheid van smeltloze recyclage door het steeds hogere oxidegehalte is beperkt. Corrosieweerstand en oppervlaktekwaliteit zijn soms goed en soms minder goed dan een referentiemateriaal. Een onderzoeksvraag die zich stelt is of smeltloos gerecycleerd aluminium wel functioneel gelijkgesteld mag worden met primair aluminium, rekening houdend met al deze, zij het kleine, verschillen in eigenschappen.

Hoofdstuk 3 identificeert de meest veelbelovende toepassingen. De constructiesector is het meest geschikt. Profielen voor ramen, deuren en gordijngevels zijn waarschijnlijk een geschikte toepassing voor aluminium verspaningsafval gerecycleerd via warmextrusie. Vonkplasma-sinteren kan mogelijk spanen recyclen tot voetstukken en diverse andere producten gebruikt in constructie. Een tweede geschikte categorie eindtoepassingen zijn toepassingen in de transportsector, vooral niet structurele en niet veiligheidskritieke componenten. Een voorbeeld hiervan zijn profieltjes voor zetelbevestiging in auto's.

Vanuit de marktvraag zijn prioritaire onderzoeksvragen in verband met de volgende eigenschappen geïdentificeerd: vervormbaarheid, vermoeiingsweerstand, impactsterkte, corrosieweerstand, esthetische oppervlaktekwaliteit en warmte- en elektrische geleidbaarheid. Indien corrosieweerstand en oppervlaktekwaliteit voldoende zijn, is smeltloos gerecycleerd aluminium geschikt voor ongeveer 27,5% van alle eindtoepassingen van aluminium. Dat komt overeen met 3 miljoen ton aluminium

per jaar in Europa dat mogelijk gebruik kan maken van smeltloos gerecycleerd aluminium. In het ASSuRe project is Wuyts een meer geschikte afnemer voor smeltloos gerecycleerd aluminium dan Vasco. Om smeltloos gerecycleerde profielen breed toepasbaar te maken in de bouwsector moet de mogelijkheid tot oppervlaktebehandeling onderzocht worden.

Het jaarlijks aanbod aan verspaningsafval in Europa bedraagt 331kton. Bedrijven uit de bouwsector, zoals Wuyts en Vasco, verspanen slechts enkele procenten van de totale hoeveelheid aluminium die ze verwerken. Bedrijven gespecialiseerd in verspanen werken met zeer veel legeringen en productwissels, wat sorteren van de spanen per legering duur en moeilijk maakt. Bedrijven die vliegtuigonderdelen uit aluminium produceren, verspanen wel zeer grote hoeveelheden aluminium van dezelfde legering.

De experimentele testen beschreven in Hoofdstuk 4 bewijzen dat de voorbehandelingsstappen voor smeltloze recyclage technisch haalbaar zijn op industriële schaal. De testen van de warmextrusie zelf maar ook het vonkplasma-sinteren op industriële schaal waren nog niet uitgevoerd bij het indienen van deze thesis. Op basis van de succesvolle extrusie- en vonkplasma-sinteringstesten van verschillende auteurs in de literatuurstudie, wordt verondersteld dat beide processen technisch haalbaar zullen blijken na de test. Dit moet uiteraard nog experimenteel bevestigd worden.

Hoofdstuk 4 berekent de totale gemaakte operationele kost per kg geprecompacteerde billet. Die bedraagt 12,24€/kg. De bijkomende operationele kost voor het vonkplasma-sinteren van een geprecompacteerde billet bedraagt 2,65€/kg. De hoogste kost ligt in de verrichte arbeid, gevolg van de volledig handmatige experimentele opstelling. Daarnaast is het reinigingsproces duur door overdimensionering. Transport kost veel door de kleine getransporteerde hoeveelheden en het veelvuldig transport tussen de verschillende processtappen. Onderzoek naar procesverbeteringen moet focussen op het verbeteren van deze elementen.

Deze kosten zijn vergeleken met de huidige marges van de bedrijven betrokken in de recyclageketen van aluminium verspaningsafval. De marge van de schroothandelaar, die instaat voor transport en tussentijdse opslag, bedraagt 0,53€/kg. De marge van de schrootverwerker, die instaat voor hersmelten in de huidige situatie en voor reiniging en precompactie bij smeltloze recyclage, bedraagt 0,61€/kg. De experimentele ASSuRe kost moet bijgevolg minimum met een factor 10 gereduceerd worden om kost-competitief te zijn.

Hoofdstuk 5 vergelijkt de ecologische impact van theoretische en experimentele smeltloze recyclage via warmextrusie met recyclage via hersmelten. De impact van smeltloze recyclage is steeds lager. Het verschil tussen de experimentele smeltloze recyclage en recyclage via hersmelten is echter slechts klein, en bij smeltverliezen lager dan 8% heeft de experimentele smeltloze recyclage zelfs een hogere impact.

Die hoge impact van het experimentele proces is voornamelijk het gevolg van de overdimensionering van de reiniging. De sensitiviteit van de totale impact op het verlagen van de concentratie reinigingsmiddel en hergebruik van het reinigingswater is zeer groot. 2 efficiëntere verbeterscenario's zijn voorgesteld, onder de veronderstelling dat die de spanen nog steeds voldoende reinigen. Dit is aanneembaar op basis van vergelijkbare industriële reinigingspraktijken maar moet experimenteel bevestigd worden. Een openstaande onderzoeksvraag is de reinheid die nodig is om smeltloos gerecycleerd materiaal met goede eigenschappen te bekomen.

Het voorzichtige verbeterscenario gebruikt een concentratie reinigingsmiddel van 1,5%, gebruikt het reinigingswater 3 keer alvorens het te vervangen en spoelt met lauw water op 40°C. Voor de precompactie veronderstelt het een verlaging van de nodige elektriciteit door de tijd waarin de pers stationair moet draaien te halveren. Het meer optimistische verbeterscenario gebruikt een concentratie reinigingsmiddel van 0,5%, gebruikt het reinigingswater 5 keer alvorens het te vervangen en spoelt met water op leidingtemperatuur. Voor de precompactie veronderstelt het dat alle stationaire tijd voor de pers geëlimineerd kan worden. Het voorzichtige verbeterscenario heeft een impact van 134mPt per kg, vergelijkbaar met theoretische smeltloze recyclage en 2 tot 4 keer lager dan recyclage via hersmelten. De impact is, tot smeltverliezen van slechts 2,5%, lager dan de impact van hersmelten. Dit betekent dat verder academisch onderzoek het recycleren van meer hoogwaardige afvalstromen met lage smeltverliezen via smeltloze recyclage ook kan bestuderen vanuit het oogpunt van de verlaging van ecologische impact.

De broeikasgasuitstoot in CO<sub>2</sub> equivalenten is 2 tot 4 keer lager bij smeltloze recyclage vergeleken met hersmelten. Bij smeltverliezen van 15%, gemiddeld voor verspaningsafval, vergeleken met het voorzichtige verbeterscenario voor smeltloze recyclage bedraagt de totale vermeden broeikasgasuitstoot bij volledige valorisatie van smeltloze recyclage in Europa 1 miljoen ton CO<sub>2</sub> equivalenten per jaar. De totale vermeden impact in ecopunten bedraagt 75 miljoen Pt per jaar in Europa.

Uit Hoofdstuk 6 blijkt dat enkel de agressieve efficiëntieverbeteringen uit Hoofdstuk 5, gecombineerd met een volautomatische productielijn, smeltloze recyclage kostcompetitief kunnen maken. De operationele kost van smeltloze recyclage voor de schrootverwerker bedraagt dan 0,30€/kg, lager dan de huidige operationele kost van 0,38€/kg die een schrootverwerker maakt bij het hersmelten van verspaningsafval, rekening houdend met de smeltverliezen. Verder onderzoek naar de investeringskost is noodzakelijk om te bepalen welke schaalgrootte nodig is om de investering in een volautomatische productielijn te verantwoorden.

De transportkost van smeltloze recyclage blijft beperkt indien het volledige recyclageproces plaatsvindt op één locatie en bij voldoende grote hoeveelheden spaanafval per transport, minimum 500-2700kg per transport. Lokaal reinigen en precompacteren, zoals voorgesteld in het ASSuRe project, is niet nodig.

De reinigingsstap is te vermijden indien productiebedrijven droog of cryogeen verspanen. Dit heeft zowel voor- als nadelen voor productiebedrijven. Een openstaande onderzoeksvraag is of droog en cryogeen verspanen in combinatie met smeltloze recyclage de totale systeemkost van verspanen en recycleren kan verlagen. Omwille van de nodige schaalgrootte voor kost-effectieve smeltloze recyclage en het huidige zeer geringe gebruik van droog of cryogeen verspanen in de industrie vergroot de kans op slagen van smeltloze recyclage aanzienlijk indien het niet afhankelijk is van deze alternatieve verspaningsprocessen.

Een automatische trillingsreinigingsmachine belooft de reiniging kosteffectief en met een lage ecologische impact uit te voeren. Experimenteel testen van een hoeveelheid spanen in de machine, in samenwerking met de fabrikant, is een volgende nodige stap voor industriële opschaling. Voor automatische precompactie zijn geen bestaande machines gevonden. Een fabrikant van briketteerpersen heeft een voorstel gedaan voor het ontwerp van een automatische precompactiemachine. Het ontwerpen van die machine is onderwerp voor verder onderzoek.

Hoofdstuk 7 stelt een circulair businessmodel voor dat 2 problemen in het huidige businessmodel oplost. In dit model is het verspaningsafval afkomstig van een productiebedrijf dat tevens het door de schrootverwerker smeltloos gerecycleerd aluminium zelf gebruikt. De tussenstap van de schroothandelaar is geëlimineerd. Dit model geeft het verspanend bedrijf een drijfveer om verspaningsafval gescheiden te houden. De schrootverwerker is verzekerd dat aangekochte spanen ook opnieuw verkocht kunnen worden na recyclage, aan hetzelfde bedrijf. Ook verdeelt het de winst van de schroothandelaar, die weinig risico draagt, tussen de partners die het investeringsrisico dragen, het productiebedrijf en de schrootverwerker.

Een versoepeling van het vernieuwende businessmodel kan door de schroothandelaar voor transport te betrekken via een tollingsovereenkomst. Een toetsing van het businessmodel aan de situaties van Vasco en Wuyts beperkt echter de bruikbaarheid van het voorgestelde model. Het ASSuRe project moet op zoek naar bedrijven die grote hoeveelheden verspaningsafval van eenzelfde legering genereren om een circulair businessmodel waar te maken. De case van Wuyts toont het potentieel van near-net-shape producten gerecycleerd met vonkplasma'sinteren. De toegevoegde waarde van een dergelijk near-net-shape product overstijgt de kost van vonkplasma'sinteren.

De 7 hoofdstukken samen bevestigen de stelling dat smeltloze recyclage valoriseerbaar is indien de besproken onderzoeksvragen beantwoord kunnen worden.

# Appendices

# Appendix A: Vergelijking eigenschappen en toepassingen

Deze appendix bespreekt de eigenschappen nodig voor de verschillende eindtoepassingen van aluminium. Deze worden ook vergeleken met de eigenschappen die smeltloze recyclage kan bereiken. Sectie 3.1.4 maakt gebruik van deze bespreking om de totale mogelijke vraag naar smeltloos gerecycleerd aluminium te kunnen schatten.

## Auto's en lichte vrachtwagens

De gemiddelde aluminium content voor een EU27 auto in 2012 is 140 kg. Tegen 2020 zal dit 180 kg bedragen (Ducker Research, 2012). Dit grote potentieel aan aluminiumgebruik en dus mogelijks gerecycleerd aluminiumgebruik bestaat echter grotendeels uit aluminium gietstukken, niet geschikt voor smeltloze recyclagetechnieken. Meerbepaald bestaat 70% van al het aluminium in Europese auto's uit gietstukken (Ducker research, 2012). De overige 30% hebben mogelijk potentieel voor smeltloze recyclagetechnieken. De reden van het aluminiumgebruik in auto's is voornamelijk de mogelijkheid tot lichtgewicht ontwerp. De belangrijkste nodige eigenschappen in de meeste niet gegoten toepassingen in auto's zijn de hoge specifieke sterkte, de esthetiek en de corrosieweerstand (Cooper, Allwood, 2012).

Vermoeiingsweerstand is in auto's meestal geen limiterende parameter omdat de mechanische sterkte gedimensioneerd wordt voor piekbelastingen zoals een crash (AAM, 2011a). Echter, Chino et al. stellen dat de vermoeiingsweerstand van smeltloos gerecycleerd magnesium slechter is dan van vergelijkbaar primair aluminium door de insluitsels, vooral oxides, waar zich microscheurtjes rond vormen (2006). Hoewel hier geen onderzoek rond gedaan is, is het waarschijnlijk dat smeltloos gerecycleerd aluminium dezelfde lagere vermoeiingsweerstand heeft, omdat het dezelfde insluitsels heeft. Alle transporttoepassingen ondergaan trillingen en dynamische belasting. Met smeltloos gerecycleerd aluminium is de vermoeiingsweerstand mogelijks wel kritiek. Bij het ontwerp van transportcomponenten uit smeltloos gerecycleerd aluminium moet hiermee rekening gehouden worden.

Typisch aan de transportsector in het algemeen en zeker aan de autosector is de vraag naar zeer hoge, constante kwaliteit om de veiligheid te garanderen, zowel bij langdurige, dynamische belasting als bij plotse impact. Om deze reden zullen

aluminiumgebruikers uit de transportsector zich eerder conservatief opstellen tegenover de nieuwe techniek van het smeltloos recyclen. Het rechtstreeks gebruiken van verspaningsafval vormt waarschijnlijk een moeilijk te overwinnen psychologische drempel. Pas als in andere toepassingen is bewezen dat deze techniek werkt en veilig is, zullen autoconstructeurs beginnen overwegen om zelf gebruik te maken van dergelijke technieken. Dit terzijde gelaten, heeft elke aluminiumtoepassing in auto's specifieke nodige eigenschappen, hieronder besproken.

#### *Motorblok*

Het motorblok grotendeels vervangen door een aluminium motorblok is een gewichtsbesparende maatregel die de meeste constructeurs reeds ingevoerd hebben. 31% van het aluminiumgebruik in auto's zit in het motorblok (Bertram et al., 2009). Het gaat hierbij om een gegoten aluminium, meestal van de AA356 legering (Cooper, Allwood, 2012), en biedt dus geen potentieel voor SSR technieken. Deze legering heeft een zeer hoog gehalte aan legeringselementen, waar de industrie handig van gebruik maakt voor het recyclen van gemengde afvalstromen.

#### *Transmissiebehuizing*

Ook de transmissiebehuizing, de tweede belangrijkste aluminium component in auto's, is een aluminium gietstuk en niet interessant voor SSR. Het gaat meestal om de AA380 legering die een dankbare legering is voor de recyclage van gemengde aluminium afvalstromen (Cooper, Allwood, 2009).

#### *Onderstel, ophanging, stuurinrichting*

Deze onderdelen bestaan voornamelijk uit gietstukken. Bepaalde delen zijn echter extrusieprofielen, smeedstukken of platen. Een goed voorbeeld hiervan zijn de ophangingsarmen (Cooper, Allwood, 2009). Dit zijn meestal smeedstukken van de AA6053 legering. Daarnaast bestaan er ophangings- en controlearmen uit gebogen plaatstukken, gietstukken of uit extrusieprofielen. Deze armen zijn een veiligheidskritiek onderdeel en moeten een hoge sterkte in de richting van de belasting hebben (AAM, 2011b). Aluminium is staal zeer snel aan het vervangen in deze toepassing aangezien de massavermindering van de ophangingsarm een sterk positieve invloed op het ophangingsysteem heeft.

Waar de traditionele ophanging met mechanische veren uit staal gemaakt is, bestaat een luchtveersysteem meestal uit aluminium. De hoge gasdichtheid, corrosieweerstand en het lage gewicht maakt aluminium zo geschikt voor luchtvering. Autofabrikanten vervangen hydraulische dempers uit staal soms door aluminium dempers om 20-30% gewicht te besparen (AAM, 2011b).

In de stuurinrichting is de veiligheid het allerbelangrijkst. Soms bestaat ze uit aluminium onderdelen om gewicht te besparen, met concurrentie van magnesium en kunststoffen. Ingewikkelde aluminiumprocestechnieken, zoals bijvoorbeeld

impactextrusie, verzorgen zeer sterke en veilige onderdelen uit de AA6082, AA7021 en AA7108 legeringen (AAM, 2011c).

Omdat de ophanging en de stuurinrichting veiligheidskritiek zijn voor een auto, zal de toepassing van smeltloos gerecycleerd aluminium voor deze onderdelen pas werken wanneer in voldoende andere toepassingen is bewezen dat aluminium uit spanen even veilig zijn als primair aluminium. Ophangingsarmen zijn een mogelijke toepassing voor smeltloos recyclen via smeden. De stuurinrichting is een mogelijke toepassing voor smeltloos recyclen via extrusie en zeker ECAP extrusie, die zorgt voor een hogere sterkte.

#### *Wielen en reservewiel*

Aluminium wielen bestaan meestal uit AA356 gietstukken. Sterkte, stijfheid en het esthetische aspect speelt een belangrijke rol (Cooper, Allwood, 2009). Smeedstukken zijn 20% lichter dan gietstukken maar zijn duurder door het meer ingewikkelde productieproces. Smeedstukken hebben immers een hogere specifieke sterkte en stijfheid maar moeten in meerdere delen opgebouwd worden. Veelal zijn ze een optie op sportwagens. Zelfs het maken van wielen uit in dunne stukken gesneden extrusieprofielen is mogelijk.

Het potentieel voor smeltloze recyclagetechnieken is beperkt omdat de meeste wielen gietstukken zijn en het esthetische aspect zo belangrijk is. Toch zijn er mogelijkheden, bijvoorbeeld via het BMA proces gevolgd door smeden, zoals voorgesteld door Luangvaranunt et al. (2002). Dit proces resulteert in de precipitatie van de ijzercontaminaties in de aluminium matrix, wat leidt tot een versterkt materiaal en eliminatie van de weinig esthetische oxideresten op het oppervlak.

#### *Warmtewisselaar*

Wegens de hoge thermische geleidbaarheid is aluminium zeer geschikt voor warmtewisselaars. Daarnaast zijn eigenschappen als lage dichtheid, voldoende sterkte bij hoge temperaturen, goede vervormbaarheid en een hoge weerstand tegen corrosie van belang. Warmtewisselaaronderdelen worden meestal met rollen of extrusie gemaakt en daarna mechanisch gelinkt of gebraseerd. Ze komen voor in een zeer uiteenlopend gamma van legeringen (AAM, 2011d).

Warmtegeleidbaarheid van smeltloos gerecycleerd aluminium is in geen van de onderzoeken uit de literatuurstudie opgenomen als onderzochte parameter. Ook over corrosieweerstand en de sterkte bij hoge temperatuur is nog meer onderzoek nodig om te bepalen of smeltloos gerecycleerd aluminium een toepassing kan vinden in warmtewisselaars.

#### *Remmen*

Rembekrachtigers, kleppen, zuigers en het ABS systeem zijn remonderdelen die uit aluminium bestaan. Corrosieweerstand is de belangrijkste reden om hier aluminium te



gebruiken. Naast hardheid is ook het lage gewicht belangrijk voor de excentrische onderdelen vastgemaakt op het wiel. Zowel extrusie, platen, smeedstukken als gietstukken komen voor (AAM, 2011e).

Daar de weerstand tegen corrosie de belangrijkste ontwerpparameter is, is het onzeker of smeltloze recyclagetechnieken een toepassing kunnen vinden in remonderdelen.

### *Deuren en sluitingen*

De algemene eigenschappen nodig voor deze onderdelen zijn een hoge stijfheid, knikweerstand, oppervlaktekwaliteit en corrosieweerstand (Alumatter, 2001). Om de complexe vormen mogelijk te maken is een goede vervormbaarheid nodig. Deze brede categorie valt nog uiteen in de subcategorieën kofferdeksel, vleugels, deuren, dak en schuifdak, met elk hun specifieke eisen.

Aluminium in het kofferdeksel is vooral toegepast bij grotere wagens zoals SUV's omdat het lichtgewicht aluminium het kofferdeksel beter hanteerbaar maakt. Superplastische vormgeving is één van de gebruikte technieken die de nodige complexe vormen met een goede oppervlaktekwaliteit mogelijk maakt (AAM, 2011f).

De vleugels zijn de panelen boven de voorwielen. Dit zijn éénvoudige componenten met als basismateriaal aluminium of plastic. De nodige eigenschappen zijn stijfheid, knikweerstand, dynamisch indeuken en oppervlaktekwaliteit. De 6xxx legeringen zijn het meest geschikt. Superplastische vormgeving wordt gebruikt voor de meer ingewikkelde vormen van vleugels (AAM, 2011f).

Aluminium deuren zijn een serieuze gewichtsbesparing in een auto en zorgen ook voor een betere hanteerbaarheid. Ze kunnen zowel uit getrokken plaat, gietstukken als geassembleerd met extrusieversterkingen gemaakt zijn. De 6xxx legeringen zijn het meest geschikt. Sterkte en stijfheid zijn belangrijk. Zelfs als de deur niet uit aluminium is, is het deurframe meestal gemaakt uit aan elkaar gelaste aluminium extrusieprofielen (AAM, 2011f).

Een dak uit aluminium is lichtgewicht en heeft ook een esthetisch voordeel wanneer het aluminium niet geverfd wordt en met het glanzend oppervlak contrasteert tegen de rest van de wagen. Het bestaat uit 6xxx extrusieprofielen en 5xxx plaatmateriaal. Sterkte, weerstand tegen corrosie en een esthetisch goede oppervlaktekwaliteit zijn de belangrijkste parameters. Het openingsmechanisme van het schuifdak bestaat ook veelal uit aluminium profielen, waarbij weerstand tegen corrosie en slijtvastheid, dus hardheid, erg belangrijk zijn. Het dakrail is ook meestal een aluminium extrusieprofiel, als visueel attractief bevestigingselement met een hoge sterkte (AAM, 2011g).

Smeltloze recyclagetechnieken produceren over het algemeen een verfijnde microstructuur, zeker degene met SPD processen. Die verfijnde microstructuur is een voorwaarde voor superplastische vormgeving. Potentieel is smeltloos gerecycleerd

aluminium dus geschikt voor vele van deze toepassingen. Verder onderzoek naar de reactie van SSR aluminium op superplastische vormgeving is aan te raden. Oppervlaktekwaliteit, een belangrijke eigenschap, is niet vanzelfsprekend voor alle SSR technieken. DSR rollen is een techniek waarmee de gewenste oppervlaktekwaliteit potentieel te bereiken valt. Corrosieweerstand is belangrijk. Onderzoek moet uitwijzen of smeltloos gerecycleerd aluminium even goed geanodiseerd en geleverd kan worden als primair aluminium.

Het deurframe, met zijn hoge nodige stijfheid en sterkte en waarbij oppervlaktekwaliteit en corrosieweerstand niet zo belangrijk zijn omdat het een inwendige structurele component is, is een potentieel goede toepassing voor SSR via extrusie of extrusie met ECAP. Daktoepassingen, waarbij het visuele en de corrosieweerstand zo belangrijk zijn, kunnen misschien via DSR rollen geproduceerd worden.

#### *Chassis, koetswerk & instrumentpaneelbalk*

Nog niet veel automodellen maken gebruik van een aluminium carrosserie, hoewel dit één van de grootste gewicht besparende toepassingen in een auto kan zijn. De Jaguar XJ was de eerste auto met een volledig aluminium chassis in 2003 en bespaarde hiermee 100-150 kg (Cooper, Allwood, 2009). Andere premiumwagens volgden. Voor kleinere auto's weegt de meerkost echter nog niet op tegenover de gewichtsbesparing. Chassis in deze paragraaf verwijst naar een monocoque chassis. De meeste autofabrikanten bouwen vandaag auto's met dit chassis, wat een combinatie is van chassis en koetswerk.

De nodige hoofdeigenschappen zijn stijfheid en sterkte om alle onderdelen te kunnen dragen, impact kunnen opnemen bij een crash en zo licht mogelijk zijn (AAM, 2011h). Afhangende van het design bestaat het chassis vooral uit extrusieprofielen, plaatmateriaal of een combinatie van extrusieprofielen en gietstukken. Het chassis van de Jaguar XJ, bij wijze van voorbeeld, bestaat uit 85% plaatmateriaal, 5% gietstukken en 10% extrusieprofielen van de AA6082, AA7108, AA6060 en AA6063 legeringen. In meer recente Jaguar of Land Rover modellen met een aluminium chassis is het aandeel van extrusieprofielen in het totaal eerder rond de 5%. Audi, in het vorige A8 en A2 model, maken minder gebruik van plaatmateriaal, met 20% gietstukken en 20% extrusieprofielen in het chassis. Bij de sportieve auto's, zoals de Lamborghini Gallardo, de Audi R8, Aston Martin's en verschillende Ferrari modellen, maken extrusieprofielen zelfs meer dan 50% van al het aluminium uit. Bij Spyker, BMW en Rolls-Royce is dit ook het geval, Mercedes gebruikt dan weer vooral gietstukken. Lotus gebruikt 90% extrusieprofielen. Porsche, Audi, Mercedes en BMW hebben ook automodellen met een chassis gecombineerd uit aluminium en staal (AAM, 2011h). Het is duidelijk dat het gebruik van een aluminium chassis vandaag vooral voorkomt in luxewagens en dat de productiemethodes sterk verschillen van model tot model.

Het achterframe, dat het reservewiel en de brandstoftank draagt, is soms een AA6060 extrusieprofiel. Andere mogelijke aluminium extrusieprofielen zijn deurdrempels, langsdragers en A- en B-stijlen (AAM, 2011i).

De instrumentpaneelbalk is een belangrijke structurele component voor de veiligheid van de passagiers en bestuurder. Een hoge sterkte en stijfheid is vereist. Een aluminium instrumentpaneelbalk is een gietstuk of een combinatie van extrusieprofielen, platen, smeedstukken en gietstukken. AA6060 is een geschikte legering. Een grote buigvervormbaarheid is nodig om de complexe vorm te produceren (AAM, 2011i).

Smeltloze recyclage via extrusie en ECAP kan zeer sterke en stijve componenten produceren, mogelijks geschikt om de extrusieprofielen in de instrumentpaneelbalk nog lichter te maken. Smeltloze recyclage via extrusie is mogelijks geschikt voor het achterframe, deurdrempels, langsdragers en A- en B-stijlen. Smeltloos gerecycleerd plaatmateriaal met goede oppervlaktekwaliteit, zoals na DSR rollen, en smeltloos gerecycleerde extrusieprofielen kunnen gebruikt worden in auto's met een volledig aluminium chassis, met als grote troef hun hoge sterkte. Vooral in nichemarkten zoals sportwagens kan dit een verkoopargument zijn waarvoor een meerprijs kan gevraagd worden.

#### *Hitteschild*

Hitteschilden vormen een barrière tussen componenten in de auto die heel warm worden en componenten die niet aan zulke oververhitting blootgesteld mogen worden. Ze bestaan meestal uit dun aluminium plaatmateriaal van de 1050A, 3003, 5052 of 5182 legering (AAM, 2011j). De belangrijke eigenschappen in deze toepassing zijn de reflectiviteit, warmtegeleidbaarheid en hoge warmtecapaciteit van aluminium. Daarnaast zijn de vervormbaarheid en de weerstand tegen corrosie zeer belangrijk. Vervormbaarheid omdat het schild zo precies mogelijk rond het te beschermen onderdeel moet passen, omdat er beperkte plaats is in het motorcompartiment. Corrosie bevordert in de typisch warme en vochtige motorruimte en de weerstand daartegen is dus noodzakelijk (AAM, 2011j).

Warmtegeleidbaarheid van smeltloos gerecycleerd aluminium is in geen van de onderzoeken uit de literatuurstudie opgenomen als onderzochte parameter. Ook over corrosieweerstand is meer onderzoek nodig om te bepalen of smeltloos gerecycleerd aluminium een toepassing kan vinden in hitteschilden. Smeltloos gerecycleerd plaatmateriaal uit spanen is minder goed vervormbaar dan gewoon aluminium, aangetoond door onderzoek van Chino et al. (2004). Om bovenstaande redenen is het onwaarschijnlijk dat smeltloos gerecycleerd aluminium een toepassing vindt in hitteschilden.

#### *Bumpers*

Extrusieprofielen van de 7xxx en 6xxx legeringen kunnen dienst doen als bumper. Ze moeten zeer veel energie kunnen opnemen en moeten dus een zeer hoge sterkte en ductiliteit hebben (Alumatter, 2001). De front-end carrier, de structurele component achter de zichtbare voorzijde van een auto, is meestal een aluminium gietstuk of een structuur die deels uit kunststof en deels uit aluminium bestaat (AAM, 2011i).

De front-end carrier is geen potentiële toepassing voor smeltloze recyclagetechnieken. Smeltloze recyclageprocessen met hevige plastische vervorming, zoals extrusie met ECAP, kunnen mogelijk extra sterke en ductiele aluminium profielen maken voor de bumper. Verder onderzoek naar de breuktaaiheid en veiligheid van bumpers uit smeltloos gerecycleerd aluminium is nodig.

#### *Andere componenten*

Frames van zetels uit aluminium extrusieprofielen zijn een door sommige fabrikanten ontwikkelde gewicht besparende maatregel. De belangrijkste parameter is een hoge sterkte zodat de zetel energie kan opnemen bij een crash en bestand is tegen de hoge trekkrachten die de driepuntsgordel uitoefent op de zetel, ook vooral bij een crash. Daarnaast zijn de zetelrails ook dikwijls aluminium extrusieprofielen, waarbij de verbeterde hardheid van smeltloos gerecycleerd aluminium een voordeel kan opleveren. De behuizing van airbags zijn ook dikwijls aluminium profielen (AAM, 2011k).

#### Truck en bus

De applicaties voor aluminium in trucks en bussen volgen grotendeels de applicaties in auto's. Deze bespreking beperkt zich daarom tot de belangrijkste verschillen. Trucks en bussen gebruiken aluminium vooral voor het lichtgewicht en de corrosieweerstand. Staal hebben ze nodig voor sterkte en duurzaamheid. Dit beperkt het gebruik van aluminium enigszins tegenover het gebruik in auto's. De grote dieselmotoren en transmissiebehuizingen moeten zoveel vermogen leveren dat enkel staal en gietijzer geschikt is (Cooper, Allwood, 2009). Waar deze componenten, als aluminium gietstukken, 45% van de totale massa in auto's uitmaken, zijn die voor trucks en bussen dus nooit uit aluminium. Dit betekent dat de verhouding aluminium gietstukken / aluminium extrusies, platen en smeedstukken opschuift in de richting van de laatste drie, interessanter voor SSR. De cabinestructuur en koetswerk bestaan meestal uit aluminium, waarbij een heel belangrijke parameter voor het koetswerk de corrosiebestendigheid is. Dit is zo belangrijk dat wanneer toch een stalen cabine gebruikt wordt, deze eerst meerdere corrosie werende zinklagen krijgt. De bumper is ook soms van aluminium. De meeste tankwagens zijn volledig uit aluminium, omwille van de hoge corrosieweerstand en gasdichtheid. De laadbak van kiepwagens is ook bijna altijd uit aluminium opdat het kantelsysteem zo beperkt mogelijke krachten ondergaat (Cooper, Allwood, 2009). Afhankelijk van de lading, is deze laadbak onderhevig aan sterke slijtagekrachten. Een laadbak aluminium legering met hoge hardheid is gewenst (EAA, 2011). Smeedstukken voor ophangingsarmen zijn een

laatste frequente toepassing van aluminium in trucks en bussen, met dezelfde nodige eigenschappen als de ophangingsarmen in auto's (Allwood et al., 2012).

Extrusies in de cabinestructuur en bumper bieden potentieel voor toepassing van smeltloos gerecycleerd aluminium. Het koetswerk zelf en zeker tankers kunnen dit enkel indien de corrosieweerstand even goed is als bij primair aluminium, voorlopig dus een iets minder zekere piste voor het gebruik van smeltloze recyclagetechnieken. Een toepassing met heel veel potentieel is de laadbak, waarvoor de hogere hardheid die de meeste smeltloze recyclagetechnieken bereiken een verbetering kan opleveren tegenover de huidig gebruikte materialen.

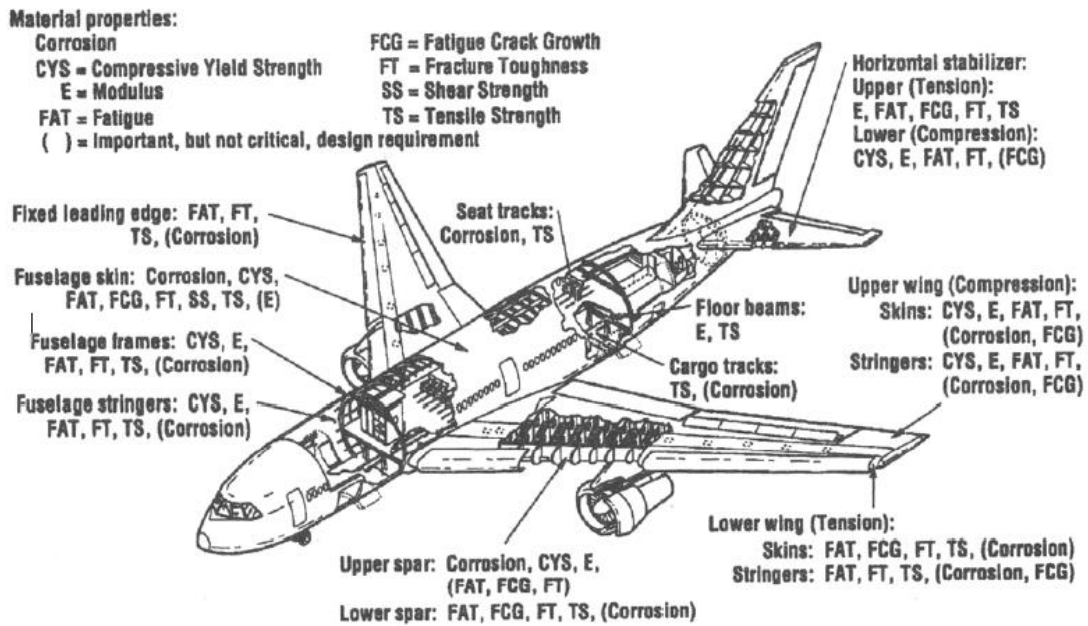
### Schepen

Aluminium in schepen heeft het voordeel van de heel hoge corrosieweerstand, nodig voor het zeewater, gecombineerd met een hoge specifieke sterkte, zodat het schip hoger in het water drijft dan wanneer het schip uit zwaardere materialen bestaat. Cruiseschepen, ferry's en jachten maken veelvuldig gebruik van aluminium voor deze redenen (Cooper, Allwood, 2009).

Het belang van de corrosieweerstand tegen water vereist verder onderzoek naar de corrosieweerstand van smeltloos gerecycleerd aluminium. Indien extra coating nodig is om een eventueel slechtere corrosieweerstand van smeltloos gerecycleerd aluminium te compenseren zullen scheepsbouwbedrijven dit aluminium enkel willen kopen wanneer de lagere prijs de extra kosten die ze moeten maken rechtvaardigt.

### Vliegtuigen

De meeste commerciële vliegtuigen bestaan voor 80% uit aluminium. Starke en Staley geven een overzichtsfiguur van de belangrijkste eigenschappen waaraan aluminium in verschillende delen van het vliegtuig moet voldoen in Figuur 34.



**Figuur 34 : De benodigde eigenschappen voor aluminiumtoepassingen in vliegtuigen (Starke, Staley 1996)**

Voor bijna alle toepassingen is corrosieweerstand of de weerstand tegen vermoeiing een kritieke eigenschap. Smeltloze recyclageprocessen kunnen beide eigenschappen nog niet zeker garanderen. In het vliegtuiginterieur zijn deze eigenschappen minder van belang. Daar speelt vooral de specifieke sterkte en stijfheid. Mogelijks kan de hogere specifieke sterkte van aluminiumprofielen, smeltloos gerecycleerd via iECAP, leiden tot een lichter design van interieurelementen zoals vloerbalken en zetel- of cargotracks. In totaal vertegenwoordigt het aluminium gebruikt in vliegtuigen slechts 1% van alle aluminiumtoepassingen. Door de hoge veiligheidseisen in de luchtvaart en de benodigde eigenschappen die SSR niet zeker kan garanderen is het daarom niet de meest aangewezen toepassing om met SSR te proberen doorbreken. Kleinere specifieke toepassingen, zoals interieurapplicaties, kunnen wel geval per geval bekeken worden.

### Spoorvoertuigen

Ongeveer 27% van de nieuwe steenkoolwagons in de USA zijn gemaakt uit aluminium. Doordat een aluminium wagon slechts 33% lichter is dan een stalen wagon, kan deze zwaarder beladen worden. Dit betaalt de hogere aankoop prijs van een aluminium wagon terug in twee jaar. Daarnaast zorgt de hoge corrosieweerstand en duurzaamheid (hardheid en slijtageweerstand) van aluminium ervoor dat de wagon lang meegaat, belangrijk voor treinwagons die een levensduur van gemiddeld 30 jaar hebben (Skillingberg, 2007).

Dit voorbeeld illustreert de hoofdredenen om aluminium in goederentreinen te gebruiken. In spoorvoertuigen voor passagiers, vooral hogesnelheidstreinen,

metrostellen en trams, gebruikt men zeer lange aluminium extrusieprofielen om de stijfheid van de volledige wagon te waarborgen. De meeste gebruikte legeringen zijn de 5xxx en 6xxx legeringen. Snelle treinen, zoals de TGV of de snelle Japanse treinen gebruikt voor stadstransport, bestaan bijna volledig uit aluminium (Skillingberg, 2007).

De zeer hoge specifieke sterkte en stijfheid van smeltloos gerecycleerd aluminium, bijvoorbeeld via iECAP, maakt dit een interessant materiaal voor de structuur van goederenwagens en passagierstreinen, inclusief trams en metrotostellen. Ook de hogere hardheid en bijgevolg duurzaamheid van smeltloos gerecycleerd aluminium zijn voordelen, corrosieweerstand daarentegen is onzeker. Ook de weerstand tegen vermoeiing is, zoals eerder vermeld, een niet goed gekende eigenschap, die van belang is voor de trillingsbelasting waar treinwagens aan onderworpen zijn. Verder onderzoek naar deze laatste twee eigenschappen is nodig om te bepalen of smeltloos gerecycleerd aluminium een toepassing kan vinden in spoorvoertuigen.

### Constructie

Het meeste aluminiumgebruik in constructie bestaat uit visuele profielen of platen aan de buitenkant van een gebouw of constructie. Voordelen van aluminiumlegeringen zijn de lange levensduur, flexibel ontwerp, beperkt onderhoud, de vele afwerkingsmogelijkheden, de specifieke sterkte, brandveiligheid en hoge reflectie (EAA).

De profielen moeten visueel aantrekkelijk zijn. Om de corrosieweerstand te verbeteren zijn ze meestal geanodiseerd, soms gelakt. Het zijn geen kritieke dragende veiligheidsonderdelen van gebouwen, maar moeten wel sterk genoeg zijn om bijvoorbeeld inbraakgevaar of windbelasting te weerstaan. In tegenstelling tot aluminium in transport is vermoeiingsweerstand ten gevolge van trillingen geen belangrijke eigenschap. Het grote aandeel extrusieprofielen en het minder kritiek zijn van vele toepassingen in constructies maakt dat aluminium in constructie een mogelijk interessante toepassing voor smeltloos gerecycleerd aluminium is.

### *Raamprofielen*

Bijna een kwart van al het aluminiumgebruik in constructie komt van raamprofielen. Belangrijke voordelen van aluminium AA6060 of AA6063 extrusieprofielen voor het maken van ramen zijn de duurzaamheid, sterkte, onderhoudsvriendelijkheid, esthetische aantrekkelijkheid en weerstand tegen corrosie. Om duurzaamheid en weerstand tegen corrosie nog te verhogen worden ze meestal geanodiseerd en soms geverfd. Een nadeel van aluminium is de hoge warmtegeleidbaarheid. Het binnen- en buitenframe is van elkaar gescheiden door een plastic thermische barrière.

Smeltloos gerecycleerd aluminium, via warmextrusie geproduceerd kan hier een mogelijke toepassing vinden. Vooral in geverfde of geanodiseerde toepassingen, die minder kritisch zijn voor het esthetische aspect en waarbij de corrosieweerstand

minder belangrijk is. Onderzoek naar de mogelijkheid om smeltloos gerecycleerd aluminium te anodiseren of verven is de eerste stap voor het gebruik van smeltloos gerecycleerd aluminium in raamprofielen.

### *Gordijngevens*

Een gordijngewel is een niet dragende gevel die de afsluiting vormt tussen een gebouw en de buitenlucht. De glaspartijen van wolkenkrabbers zijn het meest bekende voorbeeld van gordijngevens. Aluminium is bijna altijd het materiaal dat dit glas ondersteunt, voor de hoge specifieke sterkte, het esthetisch uitzicht en de corrosieweerstand. Daarnaast zijn ook de stijfheid, bestendigheid tegen het weer en sterkte onder windbelasting belangrijke parameters. Meestal worden deze AA6060 of AA6063 aluminiumprofielen geanodiseerd of geverfd om de corrosieweerstand en duurzaamheid te verhogen (Cooper, Allwood, 2009).

De bespreking voor de mogelijke toepassing van smeltloos gerecycleerd aluminium in gordijngevens is identiek aan die voor raamprofielen.

### *Gevelbekleding en dakwerk*

Aluminium gevelbekleding kan bestaan uit eenvoudige gecorrugeerde platen voor een landbouwschuur tot structuren met twee aluminium buitenplaten waartussen isolatie zit, gebruikt in industriële en commerciële gebouwen (Cooper, Allwood, 2009). Sterkte, stijfheid en duurzaamheid zijn de redenen om aluminium te kiezen. Daarnaast moet het geheel vuurbestendig en isolerend zijn. Om esthetische redenen en om een grote duurzaamheid te verzekeren krijgen de aluminium 3xxx of 5xxx legering platen bijna altijd een coating. Het profiel van de platen is sinusoidaal, trapezoïdaal of gewoon vlak. In vlakke vorm gaat het meestal om prefab composietpanelen (MCRMA, 2004).

Smeltloos recycleren via rollen levert platen met de gewenste hoge sterkte en stijfheid. Een esthetisch en glad oppervlak, een voldoende vervormbaarheid voor de fabricatie van profielen in de platen en een goede corrosieweerstand zijn echter niet zeker te behalen met smeltloze recyclagetechnieken. Differentieel snelheidsrollen verzekert een totale breking van de oxides en kan deze problemen dus waarschijnlijk tegemoetkomen.

### *Andere*

De bovenvermelde toepassingen bevatten ongeveer 80 % van het totale aluminiumgebruik in constructietoepassingen. De overige toepassingen zijn zeer uiteenlopend. De EAA vermeldt onder andere toepassingen in zonweringen, lichtreflectoren, rolgordijnen, tussenwanden, verwarming en ventilatie, prefab gebouwen, offshore woonkwartieren, boorplatformen, helikopterdekken, balustrades, stellingen en ladders (EAA, 2010). Daarnaast zijn er ook nog toepassingen in veranda's, serres, trappen, schuifdeuren, inkommatten, trapleuningen, scheidingswanden, poorten en hekken.



Ook in de meeste van deze toepassingen is het aluminium gekozen voor de esthetische kenmerken, de hoge specifieke sterkte, de lange levensduur en de corrosieweerstand. Het gebruik van smeltloos gerecycleerd aluminium in kritieke omgevingen zoals een boorplatform is niet direct aangewezen. Daarentegen zijn veel van de andere toepassingen, bijvoorbeeld rolgordijnen, mogelijk te produceren met smeltloze recyclage via extrusie.

Industriële goederen

#### *Elektrisch materiaal*

Elektrische leidingen, de buizen die elektrische kabels in gebouwen beschermen, worden uit aluminium AA6063 extrusiebuizen gemaakt wanneer er nood is aan een lichtgewicht, niet-magnetische en corrosiewerende bescherming. Daarnaast zijn sterkte en stijfheid de belangrijkste parameters voor de bescherming van de kabels in de leiding (Cooper, Allwood, 2009).

Aluminium rails of busbars geleiden elektriciteit op een hoog voltage in een elektrisch schakelbord of distributiestations (Cooper, Allwood, 2009). Elektrische geleidbaarheid is de belangrijkste vereiste. In distributiestations is ook de corrosieweerstand van belang.

Vele kabels in gebouwen hebben een beschermende mantel van aluminium of een aluminium versterkt omhulsel. Dit aluminium moet sterk en stijf zijn, en moet goed beschermen tegen corrosie.

#### *Elektrische kabels*

Bovengrondse elektriciteitslijnen, vooral lange afstand hoogspanningslijnen, bestaan typisch uit een stalen kern met daar rond aluminium kabel gewikkeld. Het staal ondersteunt en zorgt voor sterkte, het aluminium zorgt voor de geleiding van de elektriciteit. Koper zou te zwaar en te duur zijn voor deze toepassing, hoewel het nog betere geleidende eigenschappen heeft (Alumatter, 2001b). De benodigde eigenschappen van de AA1350-H19 legering zijn uiteraard een hoge elektrische geleidbaarheid, maar ook het lage gewicht, flexibiliteit ten opzichte van uitwijking door eigengewicht en weerstand tegen corrosie (Cooper, Allwood, 2009).

#### *Warmtewisselaar*

Industriële warmtewisselaars gebruiken aluminium om dezelfde redenen als het gebruik van warmtewisselaars in auto's : thermische geleidbaarheid, lage dichtheid, sterkte bij hoge temperaturen, vervormbaarheid en oppervlaktekwaliteit voor productietechnieken en corrosieweerstand. De lagere prijs in vergelijking met andere goede geleidende materialen is ook een voordeel.

In bijna alle toepassingen van aluminium in industriële goederen is de hoofdreden om voor aluminium te kiezen de grote thermische of elektrische geleidbaarheid. Ook de

corrosieweerstand is steeds een belangrijke eigenschap. Verder onderzoek is nodig om te bepalen of smeltloos gerecycleerd aluminium deze noden kan tegemoetkomen.

#### Drankblikjes

Frisdrank en bierblikjes kent iedereen als een belangrijke toepassing van aluminium. Het deksel bestaat uit een AA5182 legering, is relatief dik en vertegenwoordigt 20% van de massa van het blik. De rest van het blik wordt getrokken uit een AA3004, 3104 of 3204 legering. De nodige hoofdeigenschappen zijn de sterkte tegen de inwendige druk, ductiliteit of vervormbaarheid zodat het materiaal getrokken kan worden, een inert binnenoppervlak en een buitenoppervlak dat beschilderd kan worden. Het deksel hoeft niet beschilderbaar te zijn maar moet een zekere stijfheid hebben, zodat het niet te bol gaat staan. Het aluminiummateriaal maakt 75% van de kost van het blik uit, wat een sterke incentive in de industrie genereert om het blik lichter te maken (Cooper, Allwood, 2009).

Haase et al. recycleerden aluminium tot blikken zonder te hersmelten via iECAP (2014). De oppervlaktekwaliteit van deze blikken is niet zichtbaar verschillend met blikken uit primair aluminium. De wanddikte van 1 mm is echter significant dikker dan de wanddikte van commerciële aluminium drankblikken. Verder onderzoek moet uitwijzen of de benodigde oppervlaktekwaliteit ook bij een kleinere dikte behaald kan worden en of de sterkte en ductiliteit bij die diktes gewaarborgd kan worden.

#### Aluminiumfolie

Huishoudfolie en folieverpakkingen of foliecontainers zijn de andere belangrijke verpakkingstoepassing van aluminium. De belangrijkste eigenschappen voor huishoudfolie zijn de flexibiliteit en een inert oppervlak vormen voor eten dat geen licht, geur of zuurstof doorlaat. Folieverpakkingen moeten ook bacteriën tegenhouden en moeten een hoge warmtegeleidbaarheid hebben zodat het voedsel erin kan opgewarmd worden. Foliecontainers moeten niet flexibel maar wel stijf zijn, alle andere eigenschappen zijn dezelfde. Huishoudfolie bestaat uit de AA8011 legering waar verpakkingen en containers bestaan uit 1xxx, 3xxx of 8xxx legeringen. De productie van deze zeer dunne folies gebeurt door middel van een geïntegreerd giet- en rolproces : 'Twin Roll Casting '. Een warmtebehandeling direct na het rollen verzekert de flexibiliteit. Onzuiverheden in het materiaal kunnen een probleem zijn voor de zeer dunne folies (Cooper, Allwood, 2009).

Smeltloze recyclagetechnieken zijn om verschillende redenen niet geschikt voor het produceren van folie. De folie komt uit een gietproces, terwijl een smeltloos recyclageproces de gietstap net vermijdt. Smeltloos gerecycleerd aluminium kan onzuiverheden bevatten, wat moeilijkheden in het productieproces oplevert en de inertie ten opzichte van voedsel kan beperken. De warmtegeleidbaarheid vermindert door onzuiverheden en oxides. Ten slotte is het onwaarschijnlijk dat smeltloze recyclagetechnieken zulke dunne folies zonder defecten kunnen produceren.

Diverse andere toepassingen

#### *Deoxidatie van staal*

Aluminium is de meest gebruikte deoxidator in het staalproductieproces. De hoge affiniteit van aluminium met zuurstof voor het vormen van aluminaverbindingen maakt aluminium zo geschikt voor dit proces. Om een ton staal te deoxideren is één tot twee kg 98% zuiver aluminium nodig (Cooper, Allwood, 2009).

De legeringselementen en vooral het hoge oxidegehalte in smeltloos gerecycleerd aluminium maken dit niet geschikt voor deze toepassing.

#### *Duurzame consumptiegoederen*

##### Koelkast

Het buitenpaneel en de deur, het binnenpaneel en de warmtewisselaar van een koelkast bestaan soms uit aluminium. De belangrijkste eigenschappen van het binnen- en buitenpaneel zijn het beschermen van de binnenkant, esthetische aantrekkelijkheid en corrosieweerstand. Voor het binnenpaneel gelden dezelfde eigenschappen van esthetiek en corrosieweerstand. De onderdelen van de warmtewisselaar, vinnen en buisjes, moeten een grote warmtegeleidbaarheid hebben en een groot oppervlak. De corrosieweerstand moet zeer hoog zijn aangezien ze langs de binnenkant koelvloeistoffen bevatten en langs de buitenkant in contact zijn met zout en water (Cooper, Allwood, 2009).

##### Wasmachine

Slechts een klein deel van de wasmachines heeft aluminium gerolde buitenpanelen. Deze hebben dezelfde nodige eigenschappen als de buitenpanelen van koelkasten : bescherming, esthetiek en corrosieweerstand. De transmissiebehuizing voor de motor bestaat soms ook uit aluminium AA380 of AA384 gietstukken, waarbij vooral de stijfheid belangrijk is (Cooper, Allwood, 2009).

De benodigde combinatie van esthetiek en corrosieweerstand voor de buitenpanelen van duurzame consumptiegoederen beperkt het potentieel voor smeltloos gerecycleerd aluminium. Differentieel snelheidsrollen kan deze eigenschappen mogelijk bekomen. Voor gebruik in de warmtewisselaar moet de thermische geleidbaarheid van smeltloos gerecycleerd aluminium onderzocht worden. De transmissiebehuizingen in koelkasten zijn gietstukken en bijgevolg niet interessant voor SSR toepassingen.

#### *Lithografische platen*

Aluminium lithografische platen moeten herhaaldelijk tekst en afbeeldingen kunnen printen (Cooper, Allwood, 2009). De belangrijkste vereiste hiervoor is een perfecte en zeer gladde oppervlaktekwaliteit. De plaat moet volledig vlak zijn. De

hydrofobe/hydrofiele eigenschappen zijn ook van belang. Daarnaast is de duurzaamheid belangrijk om het drukken in hoge oplagen te bewerkstelligen.

Het is onzeker of smeltloze recyclagetechnieken deze eigenschappen kunnen waarborgen. De grotere onzuiverheid vergeleken met primair of hersmolten aluminium doet vermoeden dat de hoge eisen voor een perfect oppervlak moeilijk te bereiken zijn.

#### *Poeder*

Aluminium poeder en nanokristallijn poeder is een grondstof voor de poedermetallurgie, additive manufacturing technieken en het produceren van composieten. Smeltloos recycleren van aluminium spanen tot dergelijke poeders via het vermalen van spanen is mogelijk, maar valt buiten het bestek van deze thesis.

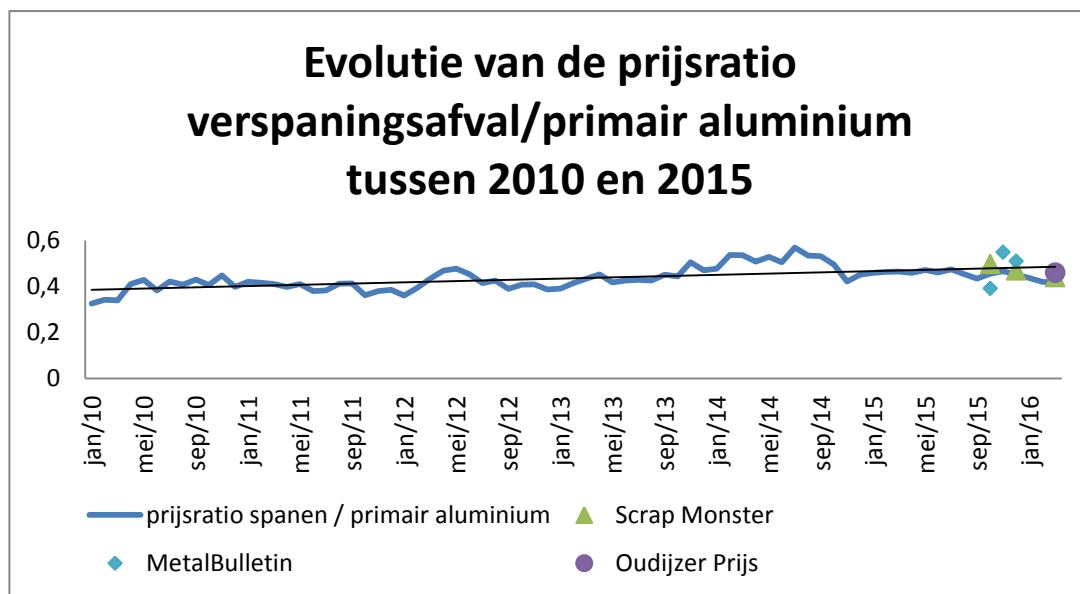
## Appendix B: prijs verspaningsafval

De prijs van aluminium afval is afhankelijk van twee parameters: de kwaliteit van het afval en de wereldmarktprijs van primair aluminium. Nieuw afval, afkomstig uit de productie, is duurder dan het meer gecontamineerde en gemixte einde-levensafval. Binnen het nieuw afval is het afval duurder naarmate de compositie beter gekend en nauwer is. Dit maakt immers een gesloten kringrecyclage mogelijk in plaats van het open kring recycleren van afval met gemixte samenstelling. Verspaningsafval, zelfs al is de compositie goed gekend, heeft een lage waarde omwille van de grote verliezen bij recyclage. De tweede parameter, de wereldmarktprijs is bepalend aangezien dit de maximum prijs bepaalt waaraan aluminium smelters hun eindproduct kunnen verkopen (Frees, 2007). Die prijs minus de werkingskosten geeft de maximumprijs die smelters kunnen geven voor aluminium afval. De correlatie tussen wereldmarktprijs en aluminium afvalprijs is sterk omdat de jaarlijkse vraag naar aluminium producten veel groter is dan de hoeveelheid aluminium afval die elk jaar beschikbaar komt om te recyclen. Aluminiumrecyclage is vandaag immers vooral beperkt door de onvoldoende beschikbaarheid van aluminium afval voor een redelijke prijs (Modaresi, Müller, 2012). Dit kan in de nabije toekomst veranderen door de invoer van elektrische voertuigen die de vraag naar gerecycleerde aluminium motorblokken zullen doen verminderen. Die gegoten motorblokken, met zeer ruime toleranties voor legeringselementen, zijn vandaag immers de grootste toepassing voor gerecycleerd aluminium (Hatayama et al., 2012). Moest de aluminium markt niet meer groeien of er een surplus aan secundair aluminium komt, is die relatie tussen wereldmarktprijs en afvalprijs niet duidelijk meer. Deze studie beschouwt de relatie als een statisch gegeven.

De wereldmarktprijs van aluminium wordt dagelijks gepubliceerd door de 'London Metal Exchange' LME. De aankoopprijs van aluminium verspaningsafval voor hersmelters is ter beschikking gesteld door de partners uit het ASSuRe project en bedraagt ongeveer 80% van die LME prijs. De verkoopprijs die spaanproducerende bedrijven krijgen voor hun aluminium verspaningsafval daarentegen moet gezocht worden op de websites van schroothandelaars en andere recyclage-organisaties. Schroothandelaars delen aluminium afval op in verschillende categorieën met hun respectievelijke prijzen. De Engelstalige categorie 'turning scrap' is de gradatie van aluminium afval die alle verspaningsafval bevat. De prijs voor dit verspaningsafval is niet helemaal gelijk bij verschillende organisaties en bedrijven. Om deze

moelijkheden te omzeilen bepaalt deze studie een benaderende gemiddelde prijs voor verspaningsafval als percentage van de LME prijs. Door dat percentage te vermenigvuldigen met de LME prijs van de dag kunnen lezers de margeberekeringen in deze master thesis steeds aanpassen op latere tijdstippen, zonder zelf op zoek te moeten gaan naar verspaningsafvalprijzen bij schroothandelaars. Deze benadering is voldoende voor financiële berekeningen bij het ontwerp van een smeltloos recyclagesysteem.

Voor de berekening van de gemiddelde prijsratio is de LME prijs en de schrootprijs bestudeerd over een periode van 10 jaar. De LME aluminiumprijs bedraagt 1379,6 euro per ton in maart 2016. In januari 2010 bedroeg die 1562,8 euro per ton (Index Mundi, 2016). Letsrecycle.com, een informatieplatform voor schroothandelaars in het Verenigd Koninkrijk, publiceert maandelijks een benaderende prijs voor aluminium verspaningsafval (2016). Figuur 35 geeft de prijsratio weer van de verspaningsafvalprijs gepubliceerd door Letsrecycle.com over de LME aluminiumprijs gedurende de laatste 10 jaar. Daarnaast illustreert Figuur 35 deze ratio voor enkele recente prijspunten van verschillende schroothandelaars (Scrap Monster; MetalBulletin; Oudijzer Prijs, 2016). Deze prijspunten zijn nauw gedistribueerd rond de waarden van Letsrecycle.com, wat aangeeft dat de kwaliteit van de data aanvaardbaar is.



**Figuur 35: Evolutie prijsratio verspaningsafval**

Een licht stijgende trend in de prijsratio is zichtbaar in Figuur 35. Deze stijging is waarschijnlijk te verklaren doordat de vraag naar aluminium en dus ook recycleerbaar secundair aluminium sneller stijgt dan het aanbod aan te recycleren aluminium afval.





Het gemiddelde van de maandelijkse prijsratio's gedurende de laatste 10 jaar geeft een gemiddelde verspaningsafvalprijs die 44% van de LME aluminiumprijs bedraagt.

Indien een normaalverdeling wordt verondersteld, aanneembaar wegens het hoge aantal datapunten, ligt de prijsratio met 95% zekerheid tussen 34% en 53% van de aluminium LME prijs.

Toegepast op maart 2016 is de schatter voor de verspaningsafvalprijs, berekend op basis van deze ratio en de gekende LME prijs, 601 euro per ton en kan die liggen tussen 470 en 733 euro per ton. Dit komt bijna exact overeen met de prijs van 0,6 euro per kg in maart 2016, zoals gepubliceerd op oudijzer-prijs.com (2016).

# Appendix C: test reinigingsmiddel

## Tests

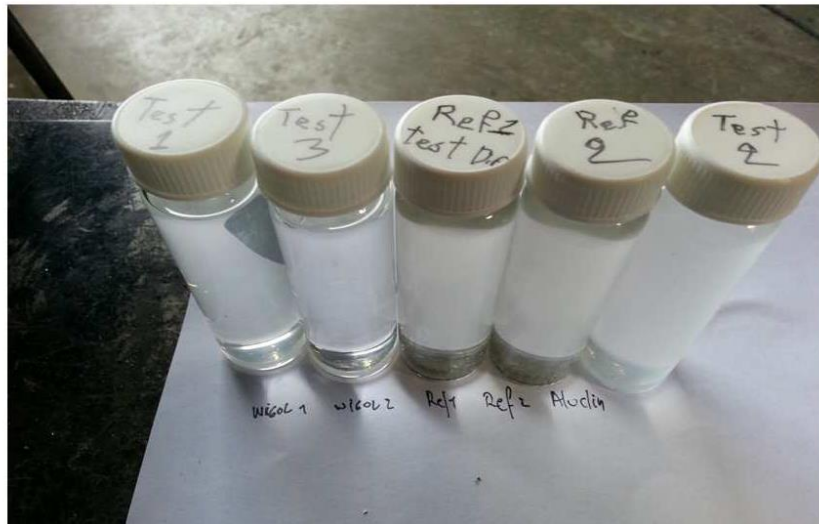
	Chips	Chips Weight (kg)	Cleaning agent	Process
Test 1		4,47	Wigol : VR X 74 S Mixture : 1-5 (10 L wigol - 50 L Water)	Cleaning water temp : started @ 70°C end 50°C Cleaning cycles : 1 Cleaning time : 10min Rinsing cycles : 1 Rinsing water temp : started @ 70°C end 50°C Rinsing time : 10min
Test 2		2,91	Aluclin : 12S Mixture : 40gr/L => 1350gr/30L	Cleaning water temp : started @ 70°C end 50°C Cleaning cycles : 1 Cleaning time : 10min Rinsing cycles : 1 Rinsing water temp : started @ 70°C end 50°C Rinsing time : 10min
Test 3		3,26	Wigol: VR X 74 S Mixture : 1-5 (5 L wigol - 25 L Water)	Cleaning water temp : started @ 70°C end 50°C Cleaning cycles : 1 Cleaning time : 10min Rinsing cycles : 1 Rinsing water temp : started @ 70°C end 50°C Rinsing time : 10min
Test 4		2,85	Wigol: VR X 74 S Mixture : 1-25 (1,2 L wigol - 30 L Water)	Cleaning water temp : started @ 70°C end 50°C Cleaning cycles : 1 Cleaning time : 10min Rinsing cycles : 1 Rinsing water temp : started @ 70°C end 50°C Rinsing time : 10min
<b>Total</b>		<b>13,49 kg cleaned chips</b>		



## References

	Chips	Oil	Cleaning
Reference 1		Reymus CBR Atomized	Acetone: x gr y ml Acetone
Reference 2		SOGELUB : EB 539	Acetone: x gr y ml Acetone

## Results



# Appendix D: substitutie met allocatie van kwaliteitsdegradatie

De substitutiemethode laat toe om primair aluminium te substitueren door secundair aluminium. Een impliciete assumptie om dat te kunnen verantwoorden is dat de functionaliteit van het secundair aluminium niet degradeert tegenover primair aluminium en dat je dit dus voor exact dezelfde doeleinden en met evenveel functionaliteit kan gebruiken. Volgens de substitutiemethode kan aluminium bijgevolg oneindig lang gerecycleerd worden, zonder kwaliteitsverliezen. In werkelijkheid is dat echter niet zo, voornamelijk door de accumulatie van ongewenste legeringselementen, de inefficiënte scheiding voor het smelten en de thermodynamische barrières om sommige elementen uit de smelt te halen (Paraskevas, 2013). In de praktijk doen smelters bijgevolg meestal aan cascade-recyclage tot legeringen met een hoog gehalte aan legeringselementen en niet al te strikte toleranties voor die elementen, ofwel voegen ze primair aluminium toe om tot een legering te komen met een laag genoeg gehalte aan legeringselementen.

Deze thesis en het ASSuRe project zorgen voor een recyclage zonder dergelijke kwaliteitsverliezen. De vergelijking van de ecologische impact met de impact van recyclage via hersmelten zou in werkelijkheid een nog groter verschil opleveren dan het verschil besproken in Hoofdstuk 5, moest er een mogelijkheid zijn om die kwaliteitsverliezen te kwantificeren. Paraskevas et al. ontwikkelden een materiaal-mengmodel voor smelters dat de kwaliteitsverliezen in rekening brengt en zoekt naar een ecologisch optimale menging van aluminium afval in de smelt (2015). Hoewel dit model rechtstreeks kan helpen bij het nemen van beslissingen over aluminium afval, is het te ingewikkeld om te gebruiken als een manier om de kwaliteitsverliezen in rekening te brengen bij een vergelijkende LCA studie.

Een andere methode om kwaliteitsverliezen in rekening te brengen is waarde gecorrigeerde substitutie (Koffler, Florin, 2013). De methode gebruikt het verschil in prijs tussen zuiver aluminium en verschillende soorten secundair aluminium dat sterker gelegeerd is. De achterliggende assumptie is dat de lagere prijs de mate waarin het aluminium functioneel is reflecteert. Aluminium afval met een hoge prijs kan nog gerecycleerd worden naar de meeste aluminium eindproducten, terwijl aluminium afval met een lage prijs slechts kan gebruikt worden in gietlegeringen. Een probleem met waarde gecorrigeerde substitutie is dat de correctiefactor afhankelijk is van de sterk fluctuerende aluminiumprijzen. McMillan stelt dat de

correctiefactor in 2009 10% hoger is dan in 2008, terwijl de ecologische kost van het kwaliteitsverlies hetzelfde blijft (2011). Waarde gecorrigeerde substitutie reflecteert de ecologische kost van kwaliteitsverlies dus niet éénduidig.

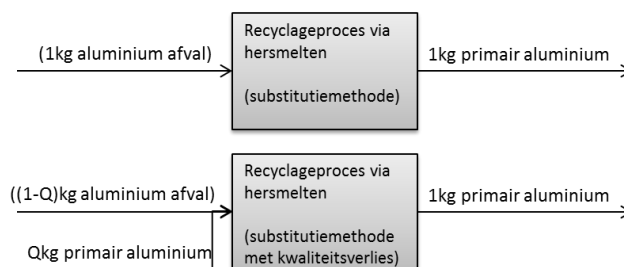
Deel 1 van deze appendix stelt een methode voor om de kwaliteitsverliezen te kwantificeren, onafhankelijk van de fluctuerende prijs van aluminium. Deel 2 werkt een schatting van deze methode uit. De appendix wil niet rigoureuus zijn maar eerder een conceptuele schets geven van een mogelijkheid om de kwaliteitsverliezen in rekening te brengen die éénvoudig in gebruik is.

## Deel 1: methode om kwaliteitsverliezen in rekening te brengen

Zoals besproken in Hoofdstuk 3 is de vraag naar aluminium onderverdeeld in enkele grote categorieën, waaronder transport en constructie. Binnen elke categorie bevinden er zich verschillende eindtoepassingen en elk van die eindtoepassingen heeft nood aan specifieke legeringen. Extrusieprofielen voor ramen uit constructie bestaan bijvoorbeeld meestal uit AA6060, terwijl motorblokken in auto's bestaan uit een AA356 legering. De hoeveelheden nodig van elke legering voor elke eindtoepassing bepaalt de vraag naar aluminium per legering.

Het aanbod aan verschillende aluminiumlegeringen moet deze vraag volgen. Indien secundair aluminium een perfect substituuut zou zijn voor primair aluminium, moet de hoeveelheid geproduceerd secundair aluminium die vraag ook volgen. In werkelijkheid is dat niet zo maar neigt de productie van secundair aluminium veel meer toe naar gietlegeringen met hoge toleranties (Paraskevas, 2013; EcoInvent, 2013). Dit is een degradatie naar minder zuiver aluminium, enkel tegen te gaan door te verdunnen met primair aluminium.

Deze methode brengt de kwaliteitsverliezen in rekening via de hoeveelheid primair aluminium die nodig is om secundair aluminium te verdunnen tot legeringen met een gehalte aan legeringselementen dat overeenkomt met het gemiddeld gehalte aan legeringselementen in de Europese vraag naar gelegeerd aluminium. Figuur 35 beschrijft de substitutiemethode en de nieuwe substitutiemethode met kwaliteitsverliezen schematisch.



**Figuur 36: schematische voorstelling van de nieuwe substitutiemethode**

Hierbij is :

$$Q = \frac{1 - \Sigma/\Sigma}{\Sigma/\Sigma} \quad \text{en} \quad \Sigma/\Sigma = \frac{\Sigma d_{li} * A_{li}}{\Sigma d_{li} * V_{li}}$$

$d_{li}$  = dilutie in legering i gelijk aan het percentage legeringselementen in legering i

$V_{li}$  = De hoeveelheid vraag naar legering i

$A_{li}$  = De hoeveelheid aanbod aan legering i

De teller van de breuk geeft het gemiddelde percentage aan legeringselementen, gevraagd door de markt, weer. De noemer geeft het gemiddelde percentage aan legeringselementen, als resultaat van de productie van secundair aluminium, weer. Indien vraag en aanbod perfect overeenkomen is  $Q=0$ . In de praktijk wordt er gemiddeld naar steeds hogere concentraties legeringselementen gerecycleerd, waardoor  $Q$  groter dan 0 is. Hieronder is een schatting voor  $Q$  uitgewerkt. Het voordeel van deze  $Q$  te berekenen via de totale vraag en aanbod is dat de waarde slechts éénmalig bepaald moet worden voor een gemiddeld Europees kwaliteitsverlies bij hersmelten en dat die daarna éénvoudig in elke LCA studie kan gebruikt worden.

Een nadeel is dat heel wat assumpties gemaakt moeten worden om  $Q$  te berekenen, terwijl de sensitiviteit van de waarde van  $Q$  op het uiteindelijke resultaat van een LCA vrij groot is. Ook zal het kwaliteitsverlies in specifieke situaties lager of net hoger zijn dan dit Europese gemiddelde. In dat geval kan een specifieke  $Q$  berekend worden via sommaties over de respectievelijke hoeveelheden van legeringen in het aluminium afval gebruikt voor de smelt en de werkelijke hoeveelheid legeringselementen in het geproduceerde secundair aluminium na hersmelten. Een laatste nadeel van deze methode is dat ze alle onzuiverheden als gelijk behandelt en niet in rekening brengt dat sommige legeringselementen wel gemakkelijk te verwijderen zijn uit de smelt. Daardoor zal ze steeds een overschatting opleveren van het werkelijke kwaliteitsverlies. Echter, van 45 voorkomende elementen in de aluminiumsmelt zijn er slechts 6 die éénvoudig te verwijderen zijn (Paraskevas, 2013). Van de 7 belangrijkste legeringselementen kunnen er slechts 2 verwijderd worden. Dit geeft een indicatie dat de overschatting beperkt is.

## Deel 2: Schatting voor $Q$ en toepassing op ASSuRe

De precieze hoeveelheden van elke legering die elk jaar gevraagd worden in Europa berekenen is een onbegonnen werk. In totaal zijn er meer dan 450 legeringen geregistreerd (Paraskevas, 2013). Echter, die legeringen zijn opgedeeld in 8 families met gelijkaardige legeringselementen. Paraskevas et al. lijsten de hoeveelheid legeringselementen voor enkele typische legeringen uit elk van die families op (2013). Gebaseerd daarop zijn de waarden voor  $d_{li}$  in deze schatting (Tabel 23):

I	legering	% legeringselementen = dli
1	AA1xxx	0,003
2	AA2xxx	0,06
3	AA3xxx	0,09
4	AA4xxx	0,075
5	AA5xxx	0,025
6	AA6xxx	0,03
7	AA7xxx	0,09
8	AA8xxx	0,035

**Tabel 23: karakteristieke hoeveelheid legeringselementen per legeringsfamilie**

Voor de berekening van  $V_{li}$  en  $A_{li}$  gebeurt een tussenstap via de gebruikscategorieën van aluminium. In Hoofdstuk 3 is de vraag naar aluminium voor elk van de categorieën transport, constructie, industriële goederen, verpakking en andere geschat. Aan de aanbodzijde geeft de EAA het aandeel in de geproduceerde hoeveelheid secundair aluminium in Europa op voor elk van de categorieën transport, constructie, engineering en andere (Ecoinvent, 2012). Mits de categorie engineering gelijk te stellen aan industriële goederen en de categorieën verpakking en andere samen te nemen, kunnen deze vergeleken worden (Tabel 24).

	Transport	Constructie	Engineering	Andere
Vraag naar aluminium	39%	22%	17%	21%
Aanbod gerecycleerd aluminium	74%	5%	13%	7%

**Tabel 24: vraag naar aluminium en aanbod gerecycleerd aluminium per categorie**

Binnen elk van die vier gebruikscategorieën is de gevraagde hoeveelheid van elke legering te schatten op basis van de meestgebruikte legeringen voor elke eindtoepassing uit het gecombineerde model van Hoofdstuk 3. Dit gebeurt door het gewogen gemiddelde te nemen van alle eindtoepassingen met dezelfde meest gebruikte legeringsfamilie binnen één gebruikscategorie (zie Tabel 2). Niet voor elke eindtoepassing is de meest gebruikte legering bekend. Die onbekenden worden in rekening gebracht volgens de gemiddelde legeringssamenstelling van de gebruikscategorie. Tabel 25 vat de gevraagde hoeveelheid van elke legering per gebruikscategorie samen.

schatting vraag per legering	Transport	Constructie	Engineering	Andere
AA1xxx	0	0	0,56	0,05
AA2xxx	0	0	0	0
AA3xxx	0,57	0,20	0,21	0,31
AA4xxx	0	0	0	0
AA5xxx	0,16	0,20	0,12	0,26
AA6xxx	0,15	0,60	0,12	0
AA7xxx	0,04	0	0	0
AA8xxx	0	0	0	0,29

**Tabel 25: Vraag naar aluminium per legeringsfamilie voor de 4 categorieën**

Deze benadering brengt nergens legering AA2xxx of AA4xxx in rekening omdat die in geen enkele van de meest gebruikte eindtoepassingen van aluminium de hoofdlegering zijn. Uiteraard zal, wanneer men Q werkelijk wil gebruiken voor andere LCA studies, de vraag per legering meer rigoureuus geschat worden zodat wel elke legering inbegrepen is. Vermenigvuldiging van Tabel 24 en Tabel 25 geeft een gewogen som van de gemiddelde hoeveelheid legeringselementen per eindcategorie (Tabel 26).

legeringselementen per categorie	Transport	Constructie	Engineering	Andere
AA1xxx	0,000	0,000	0,002	0,000
AA2xxx	0,000	0,000	0,000	0,000
AA3xxx	0,051	0,018	0,019	0,028
AA4xxx	0,000	0,000	0,000	0,000
AA5xxx	0,004	0,005	0,003	0,007
AA6xxx	0,005	0,018	0,004	0,000
AA7xxx	0,003	0,000	0,000	0,000
AA8xxx	0,000	0,000	0,000	0,010
Som	0,063	0,041	0,027	0,045

**Tabel 26: Gemiddelde hoeveelheid legeringselementen in aluminium per categorie**

Het somproduct van deze gewogen som met de eerste rij van Tabel 24 geeft de noemer van  $\Sigma/\Sigma$ , het somproduct met de tweede rij van Tabel 24 geeft de teller van  $\Sigma/\Sigma$ .

$$\text{noemer } \Sigma/\Sigma = 0,39 * 0,063 + 0,22 * 0,041 + 0,17 * 0,027 + 0,21 * 0,045 = 0,047$$

$$\text{teller } \Sigma/\Sigma = 0,74 * 0,063 + 0,05 * 0,041 + 0,13 * 0,027 + 0,07 * 0,045 = 0,055$$

Bijgevolg is, volgens deze schatting,  $Q=0,14$ .

Met de voorgestelde substitutiemethode om de kwaliteitsverliezen in rekening te brengen en de schatting voor Q kan de impact van hersmelten opnieuw berekend worden. Die bedraagt dan 478mPt voor 10,5% smeltverliezen, 509mPt voor 15% smeltverliezen en 666mPt voor 22,5% smeltverliezen. Dat is een stijging van 30-65% tegenover de substitutiemethode zonder kwaliteitsverliezen. Om hieruit te besluiten dat kwaliteitsverliezen een zeer grote rol spelen in de impact van recyclage via hersmelten moet de voorgestelde methode echter eerst geverifieerd en verfijnd worden.

# Appendix E: tabellen levenscyclus inventarisatie

## Reiniging

Het reinigingsproces is reeds in tabelvorm beschreven in Sectie 5.3.1. Enkel de modellering van het reinigingsmiddel is deel van deze appendix. De ingrediënten van het reinigingsmiddel, Wigol VR X 74 S, zijn verstrekt door de fabrikant, samen met richtwaarden voor de samenstelling (Tabel 27).

<b>Ingrediënt Wigol VR X 74 S</b>	<b>Hoeveelheid [%]</b>
disodium metasilicaat, pentahydraat	5-15
cumol sulfonaat	5-15
amine alkoxylaat	1-5
niet-ionische surfactanten	5-15
fosfaten / fosfonaten	0-5
Water	45-84

**Tabel 27: Richtwaarden voor de ingrediënten van het reinigingsmiddel**

Echter, de exacte producten waaruit Wigol VR X 74 S bestaat zijn niet allemaal opgenomen in de EcoInvent database. Tabel 28 toont de zo sterk mogelijk gelijkende vervangproducten, opgezocht in EcoInvent, om het reinigingsmiddel toch te kunnen modelleren. Een middenwaarde voor de samenstellingshoeveelheid is aangenomen. De niet-ionische surfactanten zijn voor de helft gemodelleerd als 'fatty alcohol' en voor de helft als 'ethylene glycol dimethyl ether'.

<b>Ingrediënt Wigol VR X 74 S</b>	<b>hoeveelheid [%]</b>
Sodium metasilicate pentahydrate, 58%, powder, at plant/RER U	10
Alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical, at plant/RER U	10
Diethanolamine, at plant/RER U	3
Fatty alcohol, petrochemical, at plant/RER U	5
Ethylene glycol dimethyl ether, at plant/RER U	5
phosphane, at plant/GLO U	2,5
Tap Water, at user/RER U	62,5

**Tabel 28: Inventarisatie van het reinigingsmiddel**

## Precompactie

Het enige verschil tussen de drie precompactiescenario's is de hoeveelheid energie nodig om de billet samen te persen (Tabel 29). Een vierde scenario, met een nodige energie precies in het midden tussen de ondergrens en bovengrens opgemeten tijdens het ASSuRe project, is gebruikt voor de sensitiviteitsanalyse.

<b>Aluminium precompaction ASSuRe UB</b>	<b>1 kg</b>
Electricity, medium voltage, production RER, at grid/RER S	1,13 kWh
<b>Aluminium precompaction ASSuRe LB</b>	<b>1 kg</b>
Electricity, medium voltage, production RER, at grid/RER S	0,35 kWh
<b>Aluminium precompaction Güley</b>	<b>1 kg</b>
Electricity, medium voltage, production RER, at grid/RER S	0,83 kWh
<b>Aluminium precompaction ASSuRe mid</b>	<b>1 kg</b>
Electricity, medium voltage, production RER, at grid/RER S	0,74 kWh

**Tabel 29: Inventarisatie van de precompactie**

## Extrusie

Tabel 30 toont hoe het extrusieproces gemodelleerd is op basis van gegevens van het EAA (2013).

<b>Aluminium section bar extrusion EAA2013</b>	<b>1 kg</b>
<i>Input</i>	
Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U	0,803 kWh
Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/RER U	0,066 MJ
Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER U	2,32 MJ
Sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant/RER U	0,012 kg
Heavy fuel oil, burned in refinery furnace {GLO}  market for   Alloc Def, U	0,016 MJ
Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U	0,0057 kg
<i>Output</i>	
Heat, waste	4,11 MJ

**Tabel 30: Inventarisatie van het extrusieproces**

## Transport

Tabel 31 beschrijft de verschillende transportsenario's. Het eerste is een basisscenario, beschreven in ecoinvent. Beide anderen zijn daarop gebaseerd maar brengen het juiste aantal tonkilometer in rekening. Het tweede voor de hoeveelheid transport werkelijk uitgevoerd in het ASSuRe project, het derde voor de hoeveelheid transport indien alle processtappen bij E-Max gebeuren en Wuyts de klant is.

<b>Aluminium scrap, new, at plant/RER U</b>	<b>1 kg</b>
Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	0,1 tkm
Transport, freight, rail/RER U	0,2 tkm



<b>Aluminium scrap, new, at plant/RER U ASSuRe transport real</b>	<b>1 kg</b>
Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	0,473 tkm
<b>Aluminium scrap, new, at plant/RER U ASSuRe transport ideal Wuyts</b>	<b>1 kg</b>
Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	0,169 tkm

**Tabel 31: Inventarisatie van het transport**

## Hersmelting

Tabel 32 geeft het volledige proces via hersmelten weer, gemodelleerd volgens de massabalans van het EAA. Het EAA stelt dat tijdens extrusie gemiddeld 0,008kg aluminiumverlies optreedt en dat gemiddeld 0,332kg procesafval optreedt per kg extrusieprofiel (2013). Dit procesafval kan dan opnieuw hersmolten worden, wat buiten de omvang van deze LCA ligt.

<b>Remelting extrusion route</b>	<b>1 kg</b>
<i>Input</i>	
Aluminium section bar extrusion EAA2013	1,008 kg
Secondary billet, X% oxidation losses	1,332 kg

**Tabel 32: overkoepelende inventarisatie van het hersmeltproces**

De hoeveelheid spanen nodig per billet hangt af van de hoeveelheid smeltverliezen, vandaar is die aangegeven met 'X% oxidation losses'. Tabel 33 geeft de inventarisatie van de billets met verschillende hoeveelheden smeltverliezen weer.

<b>Secondary billet, 10,5% oxidation losses</b>	<b>1 kg</b>
<i>Input</i>	
Aluminium, secondary, from new scrap, salt	1,117 kg
Aluminium, primary, 6061 Medium	0,117 kg
Aluminium scrap, new, at plant/RER U	1,117 kg
<b>Secondary billet, 15% oxidation losses</b>	<b>1 kg</b>
<i>Input</i>	
Aluminium, secondary, from new scrap, briketting	1,176 kg
Aluminium, primary, 6061 Medium	0,176 kg
Aluminium scrap, new, at plant/RER U	1,176 kg
<b>Secondary billet, 22,5% oxidation losses</b>	<b>1 kg</b>
<i>Input</i>	
Aluminium, secondary, from new scrap, basis	1,29 kg
Aluminium, primary, 6061 Medium	0,29 kg
Aluminium scrap, new, at plant/RER U	1,29 kg

**Tabel 33: inventarisatie hersmelten met substitutie en transport**

Transport is hierbij in rekening gebracht volgens het standaardscenario 'Aluminium scrap, new, at plant/RER U'. Zoals vermeld in 5.3.5 moeten de smeltverliezen uitbalanceerd worden met het toevoegen van primair aluminium van de AA6061 legering. Voor elke hoeveelheid smeltverliezen moet uiteraard de overeenkomende

hoeveelheid primair aluminium toegevoegd worden. Tabel 34 beschrijft de inventarisatie van deze legering. Deze inventarisatie is gebaseerd op het Ecoinventproces 'aluminium, primary, at plant/kg/RER'. Dit proces is aangepast met het toevoegen van de juiste legeringselementen voor aluminium AA6061. De hoeveelheid legeringselementen zijn genomen in het midden van het tolerantie-interval voor deze elementen, equivalent met het werk van Duflou et al. (2015).

<b>aluminium, primary, 6061 Medium</b>	<b>1 kg</b>
<i>Input</i>	
Aluminium casting, plant/RER/I U	1,54E-10 p
Aluminium, primary, liquid, at plant/RER U	0,98355 kg
Argon, liquid, at plant/RER U	0,0015 kg
Chlorine, liquid, production mix, at plant/RER U	0,0001 kg
Corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U	0,0018 kg
Palm oil, at oil mill/MY U	0,00008 kg
Cryolite, at plant/RER U	0,0004 kg
Electricity, medium voltage, aluminium industry, at grid/GLO U	0,016 kWh
Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/CH U	0,441 MJ
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/RER U	0,641 MJ
Nitrogen, liquid, at plant/RER U	0,0006 kg
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,0007 kg
Rock wool, at plant/CH U	0,00011 kg
Transport, freight, rail/RER U	0,00322 tkm
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,00161 tkm
MG-silicon, at plant/NO U	0,006 kg
Pig iron, at plant/GLO S	0,007 kg
Copper, at regional storage/RER S	0,00275 kg
Manganese, at regional storage/RER S	0,0015 kg
Magnesium, at plant/RER S	0,01 kg

**Tabel 34: inventarisatie primair aluminium voor substitutie**

Tot slot beschrijft het deelproces 'aluminium, secondary, from new scrap, xxx' de invoer van het proces nodig om aluminium afval te hersmelten tot een secundaire billet. Dit proces is gebaseerd op het Ecoinvent proces 'aluminium, secondary, from new scrap, at plant/RER U' maar is aangepast aan de specifieke noden van deze LCA. Het transport is uit deze inventarisatie gehaald, omdat dit transport apart wordt berekend in deze LCA studie. Ook is het toevoegen van de legeringselementen koper en silicium vervangen door magnesium, wat beter overeenkomt met de nood aan legeringselementen bij het hersmelten van de aluminium AA6061 legering (Duflou et al., 2015). Naast het basiscenario is er ook een scenario met dat de extra nodige energie voor het briketteren in rekening brengt en een scenario dat de extra nodige zoutflux voor spanen bijvoegt, beiden besproken in 5.3.5.

<b>Aluminium, secondary, from new scrap, xxx</b>	<b>1 Kg</b>
<i>Input</i>	
Water, cooling, unspecified natural origin/m3	0,078 m3
Aluminium casting, plant/RER/I U	1,54E-10 P
Argon, liquid, at plant/RER U	0,0025 Kg
Chlorine, liquid, production mix, at plant/RER U	0,0000386 Kg
Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U	0,174 kWh
Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U	0,07 MJ
Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/CH U	0,00332 MJ
Heat, natural gas, at boiler modulating >100kW/RER U	3,04 MJ
Nitrogen, liquid, at plant/RER U	0,00125 Kg
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,0014 Kg
Sodium chloride, powder, at plant/RER U	0,00089 Kg
Aluminium melting furnace/RER/I U	0,000000002 P
Magnesium, at plant/RER S	0,0041 Kg
<b>Briketting :</b>	
Electricity, medium voltage, production BE, at grid/BE U	0,07 kWh
<b>Salt flux:</b>	
Sodium chloride, powder, at plant/RER U	1 kg

**Tabel 35: inventarisatie hersmeltproces**

### Volledige smeltloze proces

Tot slot toont Tabel 35 het volledige smeltloze recyclageproces, zowel het theoretische als het proces zoals uitgevoerd in het ASSuRe project. Opnieuw is de massabalans van het EAA gevolgd, gecorrigeerd met een extra verlies aan vervuilingmassa na de reiniging. De deelprocessen die niet reeds eerder in deze appendix beschreven zijn, kunnen gevonden worden in de Ecoinvent database.

<b>Theoretical SSR route</b>	<b>1 kg</b>
<i>Input</i>	
Aluminium section bar extrusion EAA2013	1,008 kg
Aluminium precompaction Güley	1,332 kg
Degreasing, metal part in alkaline bath/RER U	1,362 kg
Aluminium scrap, new, at plant/RER U	1,362 kg
<b>ASSuRe extrusion route</b>	
<i>Input</i>	
Aluminium section bar extrusion EAA2013	1,008 kg
Aluminium precompaction ASSuRe UB	1,332 kg
Cleaning step ASSuRe	1,362 kg
Aluminium scrap, new, at plant/RER U ASSuRe transport real	1,362 kg

**Tabel 36: inventarisatie smeltloze recyclageproces**

# Appendix F: De reinheid testen

Het evaluatiecriterium voor elk van de efficiëntieverbeteringen is of ze even goede eindeigenschappen van het smeltloos gerecycleerd profiel kunnen bekomen. Dit is echter moeilijk experimenteel op te meten, aangezien het maken en vergelijken van een profiel met spanen met elk van de reinigingsmethodes al snel leidt tot zeer materiaalintensieve en tijdrovende experimenten. Om deze reden wordt een tweeledig testproces voorgesteld.

In eerste instantie worden spanen met elk van de verschillende methodes getest en wordt de 'reinheid' van de spanen op een kwantitatieve manier opgemeten. Deze test dient uitgezet te worden op een grafiek met de 'reinheid' op de abscis en de operationele kost op de ordinaat. Uit de alternatieve methodes met een 'reinheid' vergelijkbaar met de 'reinheid' van de ASSuRe reiniging kan de methode gekozen worden die de grootste verlaging in operationele kost bewerkstelligt. Indien dit reeds een voldoende lage operationele kost met zich meebrengt kan hier gestopt worden. Indien niet, moet het tweede deel van de test uitgevoerd worden. In dit tweede deel moet men effectief profielen maken op basis van spanen met een verschillende reinheid: een profiel voor elk van de uiterste reinheidswaarden, dit betekent de ASSuRe gereinigde spanen en ongereinigde spanen, en dan nog 2 tot 4 profielen met reinheidswaarden tussen deze uiterste waarden. Het minst 'reine' profiel dat nog steeds vergelijkbare of voldoende eigenschappen heeft bepaalt dan de ondergrens voor de nodige reinheid van de spanen. Opnieuw kan dan de reinigingsmethode gekozen worden die zich boven de ondergrens voor reinheid bevindt en een zo laag mogelijke operationele kost met zich meebrengt.

Tijdens het ASSuRe project is de reinheid op een visuele manier getest. Dit is uiteraard niet kwantitatief en dus niet voldoende om de reinheid kwantitatief uit te zetten op de abscis van een grafiek. Er bestaan verschillende methodes om dit te doen, die ruwweg uiteenvallen in methodes die éénvoudig kunnen uitgevoerd worden in een productieomgeving en methodes die een goed uitgerust laboratorium vereisen (Kuhn, 1993). Die laatste methodes kunnen vaak, naast de reinheid, ook informatie geven over de aard van de vervuiling. Die informatie is hier echter niet nodig, in de veronderstelling dat het bij spanen steeds gaat om vervuiling van smeer- of koelmiddelen.

Een ééenvoudige methode, relevant voor het verbeteren van het reinigingsproces voor smeltloze recyclage, wordt beschreven door Kuhn (2005). De theoretische basis voor het kwantificeren van de reinheid van een metaaloppervlak is gebaseerd op oppervlakte-energie en oppervlaktespanning. De oppervlakte-energie van een aluminium oppervlak en de oppervlaktespanning van water verschillen sterk, wat resulteert in een volledige bevochtiging van het aluminiumoppervlak wanneer men er water op laat stromen. Echter, wanneer het aluminiumoppervlak nog bedekt is met olie-achtige vloeistoffen, dan zullen er zich druppels water op het oppervlak vormen in plaats van de volledige bevochtiging (Kuhn, 2005). Door een druppel van een precies afgemeten volume, bijvoorbeeld  $5\mu\text{l}$ , te laten vallen op een horizontaal aluminiumoppervlak en de diameter te meten met een microscoop of een digitale camera, kan het verschil in reinheid tussen op verschillende wijze gereinigde aluminiumspanen bepaald worden. De Bikermann vergelijking geeft immers het verband tussen enerzijds diameter en volume en anderzijds de contacthoek tussen beide oppervlakken. Die contacthoek is afhankelijk van de hoeveelheid oliefilm die zich nog op het aluminiumoppervlak bevindt. Een volledige beschrijving van de meetmethode valt buiten het bestek van deze thesis, maar kan gevonden worden in de paper van Kuhn en de referenties die hij geeft (2005).

# Bibliografie

AAM a. The Automotive Aluminium Manual - Products – Extruded products. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 4 Apr. 2016. < <http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2012/01/AAM-Products-2-Extruded-products.pdf>>.

AAM b. The Automotive Aluminium Manual - Applications – Chassis&suspension – Suspension parts. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 21 Mar. 2016. < <http://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/11/AAM-Applications-Chassis-Suspension-2-Suspension-parts.pdf>>.

AAM c. The Automotive Aluminium Manual - Applications – Chassis&suspension – Steering system. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 28 Feb. 2016. < <http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/11/AAM-Applications-Chassis-Suspension-4-Steering-system.pdf>>.

AAM d. The Automotive Aluminium Manual - Applications - Power Train - Heat exchangers. rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 27 Feb. 2016. <<http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/11/AAM-Applications-Power-train-7-Heat-exchangers.pdf>>.

AAM e. The Automotive Aluminium Manual - Applications – Chassis&Suspension – Brake-system. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 28 Feb. 2016. < <http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/11/AAM-Applications-Chassis-Suspension-5-Brake-system.pdf> >.

AAM f. The Automotive Aluminium Manual - Applications – Car body – Hang-on parts. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 28 Feb. 2016. <[http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/3\\_AAM\\_Hang-on-parts.pdf](http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/3_AAM_Hang-on-parts.pdf)>.

AAM g. The Automotive Aluminium Manual - Applications – Car body – Roof and trim. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 28 Feb. 2016. < [http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/5\\_6\\_AAM\\_Roof-and-trim.pdf](http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/5_6_AAM_Roof-and-trim.pdf)>.

AAM h. The Automotive Aluminium Manual - Applications – Car body – Body structures. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 28 Feb. 2016.

<[http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/1\\_AAM\\_Body-structures.pdf](http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/1_AAM_Body-structures.pdf)>.

AAM i. The Automotive Aluminium Manual - Applications - Car body - Body components. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 28 Feb. 2016. <[http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/2\\_AAM\\_Body-Components.pdf](http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/2_AAM_Body-Components.pdf)>.

AAM j. The Automotive Aluminium Manual - Applications - Power Train - Heat Shields. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 27 Feb. 2016. <<http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/11/AAM-Applications-Power-train-6-Heat-shields.pdf>>.

AAM k. The Automotive Aluminium Manual - Applications - Car body - Interior and other applications. Rep. European Aluminium Association, 2011. Web. 28 Feb. 2016. <[http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/7\\_AAM\\_Interior-and-other-applications.pdf](http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/7_AAM_Interior-and-other-applications.pdf)>.

ACEA, Car. "Cars, Trucks & The Environment." European Automobile Manufacturers Association, 01 Dec. 2009. Web. 16 May 2016. <[https://www.acea.be/uploads/publications/20100309\\_Brochure\\_Cars\\_Trucks\\_and\\_the\\_Environment-1.pdf](https://www.acea.be/uploads/publications/20100309_Brochure_Cars_Trucks_and_the_Environment-1.pdf)>.

Aizawa, Tatsuhiko, Tachai Luangvaranunt, and Katsuyoshi Kondoh. "Environmentally Benign Manufacturing and Material Processing Toward Dematerialization. Solid State Recycling of Recyclable Aluminum Wastes with In-Process Microstructure Control." *Materials Transactions* 43.3 (2002): 315-21. Web.

Allwood, Julian M., Jonathan M. Cullen, and Mark A. Carruth. *Sustainable Materials: With Both Eyes Open*. Cambridge: UIT Cambridge, 2012. Print.

AluMATTER a | Aluminium | Automotive. University of Liverpool, European Aluminium Association, 2001. Web. 28 Feb. 2016. <<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=7&pageid=997132188>>.

AluMATTER a | Materials Science & Engineering | Physical properties | Property comparisons | Thermal and Electrical Conductivity - a Comparison. University of Liverpool, European Aluminium Association, 2001. Web. 23 Mar. 2016. <<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=162&pageid=2144416519>>.

AluMATTER b | Materials Science & Engineering | Case Studies | Overhead Cables. University of Liverpool, European Aluminium Association, 2001. Web. 23 Mar. 2016. <<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=164&pageid=2144416510>>.

Aluminium Centrum. "Verspanen Van Aluminium." *Aluminium Infoblad* (2002): n. pag. Print.

Anilchandra, A.r., and M.k. Surappa. "Influence of Tool Rake Angle on the Quality of Pure Magnesium Chip-consolidated Product." *Journal of Materials Processing Technology* 210.3 (2010): 423-28. Web.

Anilchandra, A.r., and M.k. Surappa. "Microstructure and Damping Behaviour of Consolidated Magnesium Chips." *Materials Science and Engineering: A* 542 (2012): 94-103. Web.

Anilchandra, A.r., and M.k. Surappa. "Microstructure and Tensile Properties of Consolidated Magnesium Chips." *Materials Science and Engineering: A* 560 (2013): 759-66. Web.

Anilchandra, Adamane R., Ritwik Basu, Indradev Samajdar, and Mirle K. Surappa. "Microstructure and Compression Behavior of Chip Consolidated Magnesium." *Journal of Materials Research J. Mater. Res.* 27.04 (2012): 709-19. Web.

Art. 32bis, 3.2 KB 15 maart 1968 houdende algemeen reglement op de technische eisen waaraan de auto's, hun aanhangwagens en hun veiligheidstoebereiden moeten voldoen, BS 28 maart 1968.

ASSuRe. Aanvraagdocument MIP-ICON Projectoproep 2014. Tech. Leuven: n.p., 2014. Print.

Behnagh, Reza Abdi, Ninggang Shen, Mohammad Ali Ansari, Morteza Narvan, Mohammad Kazem Besharati Givi, and Hongtao Ding. "Experimental Analysis and Microstructure Modeling of Friction Stir Extrusion of Magnesium Chips." *Journal of Manufacturing Science and Engineering J. Manuf. Sci. Eng* 138.4 (2015): 041008. Web.

Behnagh, Reza Abdi, Ramezanali Mahdavinnejad, Amin Yavari, Masoud Abdollahi, and Morteza Narvan. "Production of Wire From AA7277 Aluminum Chips via Friction-Stir Extrusion (FSE)." *Metall and Materi Trans B Metallurgical and Materials Transactions B* 45.4 (2014): 1484-489. Web.

Behrens, Bernd-Arno, Conrad Frischkorn, and Martin Bonhage. "Reprocessing of AW2007, AW6082 and AW7075 Aluminium Chips by Using Sintering and Forging Operations." *Prod. Eng. Res. Devel. Production Engineering* 8.4 (2014): 443-51. Web.

Bertram, Marlen, Kurt Buxmann, and Peter Furrer. "Analysis of Greenhouse Gas Emissions Related to Aluminium Transport Applications." *Int J Life Cycle Assess The International Journal of Life Cycle Assessment* 14.S1 (2009): 62-69. Web.

Bertram, Marlen. "European Mass Flow Model." International Aluminium Institute, 2014. Web. 09 Dec. 2015. <<http://www.world-aluminium.org/publications/>>.

Bogaert, Geert, Anthony Callens, Bert Gielen, Dirk Le Roy, and Karl Van Biervliet. *Evaluatie Van Het Reductiepotentieel Voor VOS-emissies Naar Het Compartment Lucht En De Problematiek Van De Implementatie Van De Europese Richtlijn 99/13/EG in De Sector Van De Metaalontvetting En De*



Oppervlaktereiniging in Vlaanderen. Rep. no. AMINAL/MNB/TWOL2000/mjp2000-a10-opp. AMINAL, 13 Dec. 2002. Web. 16 May 2016. <<http://www.lne.be/themas/luchtverontreiniging/informatie-studies/Eindrapport%20Metaalontvetting.pdf>>.

Boin, U.M.J.; Bertram, M. Melting standardized aluminium scrap: A mass balance model for Europe. *J. Met. Mater. Soc.* 2005, 57, 26–33.

Bonnyns, Niko. Telefoongesprek. +32 (0)497434082. 25 mei 2016.

C.S. Sharma, T. Nakagawa, N. Takenaka." Recent Development in the Recycling of Machining Swarfs by Sintering and Powder Forging." *CIRP Annals Manufacturing Technology* 26.1 (1977): 121–125.

Canakci, Aykut, and Temel Varol. "Microstructure and Properties of AA7075/Al–SiC Composites Fabricated Using Powder Metallurgy and Hot Pressing." *Powder Technology* 268 (2014): 72-79. Web.

Chiba, Ryoichi, and Morihiro Yoshimura. "Solid-state Recycling of Aluminium Alloy Swarf into C-channel by Hot Extrusion." *Journal of Manufacturing Processes* 17 (2015): 1-8. Web.

Chiba, Ryoichi, Tamon Nakamura, and Mitsutoshi Kuroda. "Solid-state Recycling of Aluminium Alloy Swarf through Cold Profile Extrusion and Cold Rolling." *Journal of Materials Processing Technology* 211.11 (2011): 1878-887. Web.

Chino, Yasumasa, Mamoru Mabuchi, Hajime Iwasaki, Atsushi Yamamoto, and Harushige Tsubakino. "Tensile Properties and Blow Forming of 5083 Aluminum Alloy Recycled by Solid-State Recycling." *Materials Transactions* 45.8 (2004): 2509-515. Web.

Chino, Yasumasa, Mamoru Mabuchi, Satoshi Otsuka, Koji Shimojima, Hiroyuki Hosokawa, Yasuo Yamada, Cui'E Wen, and Hajime Iwasaki. "Corrosion and Mechanical Properties of Recycled 5083 Aluminum Alloy by Solid State Recycling." *Materials Transactions* 44.7 (2003): 1284-289. Web.

Chino, Yasumasa, T. Furuta, M. Hakamada, and M. Mabuchi. "Fatigue Behavior of AZ31 Magnesium Alloy Produced by Solid-state Recycling." *J Mater Sci Journal of Materials Science* 41.11 (2006): 3229-232. Web.

Chino, Yasumasa, Tetsuji Hoshika, and Mamoru Mabuchi. "Mechanical and Corrosion Properties of AZ31 Magnesium Alloy Repeatedly Recycled by Hot Extrusion." *Materials Transactions* 47.4 (2006): 1040-046. Web.

Chino, Yasumasa, Tetsuji Hoshika, Jae-Seol Lee, and Mamoru Mabuchi. "Mechanical Properties of AZ31 Mg Alloy Recycled by Severe Deformation." *Journal of Materials Research J. Mater. Res.* 21.03 (2006): 754-60. Web.

Chmura, W., and Z. Gronostajski. "Bearing Composites Made from Aluminium and Aluminium Bronze Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 178.1-3 (2006): 188-93. Web.

Cooper, Daniel R., and Julian M. Allwood. "Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life." *Environmental Science & Technology Environ. Sci. Technol.* (2012): 120827111245009. Web.

Cui, Jirang, Anne Kvithyld, and Hans Roven. "Degreasing of Aluminium Turnings and Implications for Solid-State Recycling." *Minerals, Metals and Materials Society/AIME*, 420 Commonwealth Dr., P. O. Box 430 Warrendale PA 15086 USA.[np]. 14-18 Feb (2010).

De Roovere, Helmut. E-mail. [helmut@robojob.be](mailto:helmut@robojob.be). 23 mei 2016.

De Vlieger, I., L. Schrooter, L. Pelckmans, and L. Int Panis. 80 Km/h Maatregel Voor Vrachtwagens Wetenschappelijke Screening Van Het Effect Op De Uitstoot Van CO<sub>2</sub> En Schadelijke Emissies. Rep. no. 051662. VITO, Oct. 2005. Web. 30 Apr. 2016. <<http://www.mobielvlaanderen.be/pdf/persberichten/80-studie03.pdf>>.

Dhokia, V., A. Shokrani, D. Correa Paulino, and S. T. Newman. "Effect of Cryogenic Cooling on the Surface Quality and Tool Wear in End Milling 6061-T6 Aluminium." 22nd International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (2012): n. pag. University of Bath. Web.

Dow. "Chemical Leasing." CHEMAWARE™ Sharing Knowledge. The Dow Chemical Company, 2016. Web. 29 May 2016. <<http://www.dow.com/safechem/eu/en/chemaware/sustain/chemleasing.htm>>.

Ducker Research. EAA Aluminium Penetration in Cars Final Report. Michigan: Ducker Worldwide LLC, 2012.

Duflou, Joost R., A. Erman Tekkaya, Matthias Haase, Torgeir Welo, Kim Vanmeensel, Karel Kellens, Wim Dewulf, and Dimos Paraskevas. "Environmental Assessment of Solid State Recycling Routes for Aluminium Alloys: Can Solid State Processes Significantly Reduce the Environmental Impact of Aluminium Recycling?" *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64.1 (2015): 37-40. Web.

EAA. "Duurzaamheid Van Aluminium in Gebouwen." European Aluminium Association, n.d. Web. 5 Apr. 2016. <<http://www.european-aluminium.eu/publications-building/>>.

EAA. Aluminium in commercial vehicles. European Aluminium Association, 2011. Web. 9 March 2016. <[http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/10/Aluminium-in-Commercial-Vehicles\\_Rev2\\_Bookmarks1.pdf](http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/10/Aluminium-in-Commercial-Vehicles_Rev2_Bookmarks1.pdf)>.

EAA. Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry. European Aluminium Association, 2008.

EAA. Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry. European Aluminium Association, 2008.

EAA. Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry. European Aluminium Association, 2013.

EAA. Sustainability of The European Aluminium Industry 2010 (2010): European Aluminium Association. Web. 30 Mar. 2016. <[http://european-aluminium.eu/pdf/2010\\_Sustainability\\_of\\_the\\_European\\_aluminium\\_industry.pdf](http://european-aluminium.eu/pdf/2010_Sustainability_of_the_European_aluminium_industry.pdf)>.

Ecoinvent (2013) Ecoinvent Database v3, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, Switzerland. Available at: <http://www.ecoinvent.ch/>.

Edalati, Kaveh, Yoshihiko Yokoyama, and Zenji Horita. "High-Pressure Torsion of Machining Chips and Bulk Discs of Amorphous Zr50Cu30Al10Ni10." *Materials Transactions* 51.1 (2010): 23-26. Web.

El Aal, Mohamed Ibrahim Abd, Eun Yoo Yoon, and Hyoung Seop Kim. "Recycling of AlSi8Cu3 Alloy Chips via High Pressure Torsion." *Materials Science and Engineering: A* 560 (2013): 121-28. Web.

European Commission. "Reducing CO2 Emissions from Passenger Cars." *Climate Action*. 13 May 2016. Web. 16 May 2016. <[http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm)>.

Eurostat. "Estimated Hourly Labour Costs, 2014." *Statistics Explained*. 15 Apr. 2015. Web. 14 Apr. 2016. <[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Estimated\\_hourly\\_labour\\_costs,\\_2014\\_\(%C2%B9\)\\_\(EUR\)\\_YB15.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Estimated_hourly_labour_costs,_2014_(%C2%B9)_(EUR)_YB15.png)>.

Fogagnolo, J.b, E.m Ruiz-Navas, M.a Simón, and M.a Martinez. "Recycling of Aluminium Alloy and Aluminium Matrix Composite Chips by Pressing and Hot Extrusion." *Journal of Materials Processing Technology* 143-144 (2003): 792-95. Web.

Frees, Niels. "Crediting Aluminium Recycling in LCA by Demand or by Disposal." *Int J Life Cycle Assess The International Journal of Life Cycle Assessment* 13.3 (2007): 212-18. Web.

Goedkoop M.J., Heijungs R, Huijbregts M., De Schryver A.; Struijs J., Van Zelm R, "ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level"; First edition Report I: Characterisation; 6 January 2009. Web. 2 Apr. 2016 <<http://www.lcia-recipe.net>>.

Google. Google Maps. N.p., 2016. Web. 30 Apr. 2016. <<https://www.google.be/maps>>.

Graff, LLOYD. "Shop Doc - Chips." *Today's Machining World*. N.p., Oct. 2005. Web. 24 May 2016. <<http://todaysmachiningworld.com/magazine/shop-doc-chips/>>.

Graham, Don, Dave Huddle, and Dennis McNamara. "Machining Dry Is Worth A Try." *Modern Machine Shop*. N.p., 10 Jan. 2003. Web. 5 May 2016. <<http://www.mmsonline.com/articles/machining-dry-is-worth-a-try>>.

Gronostajski, J., and A. Matuszak. "The Recycling of Metals by Plastic Deformation: An Example of Recycling of Aluminium and Its Alloys Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 92-93 (1999): 35-41. Web.

Gronostajski, J., H. Marciniak, and A. Matuszak. "New Methods of Aluminium and Aluminium-alloy Chips Recycling." *Journal of Materials Processing Technology* 106.1-3 (2000): 34-39. Web.

Gronostajski, J., W. Chmura, and Z. Gronostajski. "Bearing Materials Obtained by Recycling of Aluminium and Aluminium Bronze Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 125-126 (2002): 483-90. Web.

Gronostajski, J.z., H. Marciniak, A. Matuszak, and M. Samuel. "Aluminium-ferrochromium Composites Produced by Recycling of Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 119.1-3 (2001): 251-56. Web.

Gronostajski, J.z., H. Marciniak, and A. Matuszak. "Production of Composites on the Base of AlCu4 Alloy Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 60.1-4 (1996): 719-22. Web.

Gronostajski, J.z., J.w. Kaczmar, H. Marciniak, and A. Matuszak. "Direct Recycling of Aluminium Chips into Extruded Products." *Journal of Materials Processing Technology* 64.1-3 (1997): 149-56. Web.

Güley, V. *Recycling of Aluminium by Hot Extrusion*. Thesis. TU Dortmund, 2014. Aachen: Shaker Verlag, 2014. Print.

Güley, V., A. Güzel, A. Jäger, N. Ben Khalifa, A.e. Tekkaya, and W.z. Misiolek. "Effect of Die Design on the Welding Quality during Solid State Recycling of AA6060 Chips by Hot Extrusion." *Materials Science and Engineering: A* 574 (2013): 163-75. Web.

Güley, V., N. Ben Khalifa, and A. E. Tekkaya. "Direct Recycling of 1050 Aluminum Alloy Scrap Material Mixed with 6060 Aluminum Alloy Chips by Hot Extrusion." *International Journal of Material Forming Int J Mater Form* 3.S1 (2010): 853-56. Web.

Haase, M., N. Ben Khalifa, A.e. Tekkaya, and W.z. Misiolek. "Improving Mechanical Properties of Chip-based Aluminum Extrudates by Integrated Extrusion and Equal Channel Angular Pressing (iECAP)." *Materials Science and Engineering: A* 539 (2012): 194-204. Web.

Haase, Matthias, and A. Erman Tekkaya. "Cold Extrusion of Hot Extruded Aluminum Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 217 (2015): 356-67. Web.

Haase, Matthias, and Nooman Ben Khalifa. "Chip Extrusion with Integrated Equal Channel Angular Pressing." 60 Excellent Inventions in Metal Forming(2015): 261-66. Web.

Hatayama, Hiroki, Ichiro Daigo, Yasunari Matsuno, and Yoshihiro Adachi. "Evolution of Aluminum Recycling Initiated by the Introduction of Next-generation Vehicles and Scrap Sorting Technology." Resources, Conservation and Recycling 66 (2012): 8-14. Web.

Henly, Anna. "Conform - Continuous Extrusion of Powder Products." Metal Powder Report 46.4 (1991): 44-47. Web.

Hosseini, A., E. Azarsa, B. Davoodi, and Y. Ardahani. "Effect of Process Parameters on the Physical Properties of Wires Produced by Friction Extrusion Method." International Journal of Advances in Engineering & Technology 3.1 (2012): 592-97. Web.

Hu, Mao-Liang, Ze-Sheng Ji, and Xiao-Yu Chen. "Effect of Extrusion Ratio on Microstructure and Mechanical Properties of AZ91D Magnesium Alloy Recycled from Scraps by Hot Extrusion." Transactions of Nonferrous Metals Society of China 20.6 (2010): 987-91. Web.

Hu, Maoliang, Zesheng Ji, Xiaoyu Chen, and Zhenkao Zhang. "Effect of Chip Size on Mechanical Property and Microstructure of AZ91D Magnesium Alloy Prepared by Solid State Recycling." Materials Characterization 59.4 (2008): 385-89. Web.

Impens, Yves. "Berekening Kostprijs Wegverkeer." Studiedienst Van De Vlaamse Regering, 25 Sept. 2004. Web. 26 Apr. 2016. <<http://www4dar.vlaanderen.be/sites/svr/Pages/2004-09-25-kostprijswegverkeer.aspx>>.

Index Mundi. "Aluminum Monthly Price - Euro per Metric Ton." 12 Apr. 2016. Web. 12 Apr. 2015. <<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=aluminum&months=60&cy=eur>>.

ISO 14040: 2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework 17 Dec. 2015. Web. 2 Apr. 2016 <[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37456)>.

ISO 14044: 2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework 17 Dec. 2015. Web. 2 Apr. 2016 <[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=38498](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38498)>.

Ji, Z.s., L.h. Wen, and X.l. Li. "Mechanical Properties and Fracture Behavior of Mg-2.4Nd-0.6Zn-0.6Zr Alloys Fabricated by Solid Recycling Process." Journal of Materials Processing Technology 209.4 (2009): 2128-134. Web.

- Kačmarčík, Igor, Tomaž Pepelnjak, and Miroslav Plančak. "Solid state recycling by cold compression of Al-alloy chips." *Journal for Technology of Plasticity* 37.1 (2012).
- Kanegsberg, Barbara. "Washing, Rinsing, and Drying." *Metal Finishing* 103.9 (2005): 8-14. Web.
- Katsas, Stavros, Richard Dashwood, Graham Todd, Martin Jackson, and Roger Grimes. "Characterisation of Conform™ and Conventionally Extruded Al-4Mg-1Zr. Effect of Extrusion Route on Superplasticity." *J Mater Sci Journal of Materials Science* 45.15 (2010): 4188-195. Web.
- Kočiško, Róbert, Róbert Bidulský, Lukáš Dragošek, and Milan Škrobian. "Various Possibilities Of The Hot Extrusion In Aluminum Chips Processing." *Acta Metallurgica Slovaca Acta Metall. Slovaca* 20.3 (2014): n. pag. Web.
- Koffler, Christoph, and Julia Florin. "Tackling the Downcycling Issue—A Revised Approach to Value-Corrected Substitution in Life Cycle Assessment of Aluminum (VCS 2.0)." *Sustainability* 5.11 (2013): 4546-560. Web.
- Kouam, J., V. Songmene, M. Balazinski and P. Hendrick. Dry, Semi-Dry and Wet Machining of 6061-T6 Aluminium Alloy, *Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications*, Prof. Zaki Ahmad (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/51351 (2012). <<http://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/dry-semi-dry-and-wet-machining-of-6061-t6-aluminium-alloy>>
- Kuhn, Anselm T. "Is It Clean? Testing for Cleanliness of Metal Surfaces." *Metal Finishing* 91.9 (1993): 25-31. Web.
- Kuhn, Anselm. "Determining Whether a Metal Surface Is Really Clean." *Metal Finishing* 103.9 (2005): 16-21. Web.
- Lee, J. S., Y. Chino, H. Hosokawa, K. Shimojima, Y. Yamada, and M. Mabuchi. "Deformation Characteristics at Elevated Temperature in Recycled 5083 Aluminum Alloy by Solid State Recycling." *Materials Transactions* 46.12 (2005): 2637-640. Web.
- Letsrecycle. "Non-ferrous metal prices 2016." Environment Media Group, 2016. Web. 12 Apr. 2016. < <http://www.letsrecycle.com/prices/metals/non-ferrous-metal-prices/non-ferrous-metal-prices-2016/>>.
- Li, Dong-Hua, Mao-Liang Hu, Hai-Bo Wang, and Wang-An Zhao. "Low Temperature Mechanical Property of AZ91D Magnesium Alloy Fabricated by Solid Recycling Process from Recycled Scraps." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 21.6 (2011): 1234-240. Web.
- Li, X., W. Tang, A.p. Reynolds, W.a. Tayon, and C.a. Brice. "Strain and Texture in Friction Extrusion of Aluminum Wire." *Journal of Materials Processing Technology* 229 (2016): 191-98. Web.

Limère, Veronique. "Work Measurement." Master of Science in Engineering. Ghent University, Ghent. 2013. Lecture.

Luangvaranunt, Tachai, Katsuyoshi Kondoh, and Tatsuhiko Aizawa. "A Novel Process to Form Al-12 Mass%Si Bulk Material from Machined Chips Using Bulk Mechanical Alloying." *Materials Transactions* 43.5 (2002): 1178-182. Web.

Lubriserv. "Briquetting Presses." N.p., 2016. Web. 13 May 2016. <<http://www.lubriserv.com/swarf-processing/briquetting-presses/>>.

Luo, P., D.t. Mcdonald, S. Palanisamy, M.s. Dargusch, and K. Xia. "Ultrafine-grained Pure Ti Recycled by Equal Channel Angular Pressing with High Strength and Good Ductility." *Journal of Materials Processing Technology* 213.3 (2013): 469-76. Web.

Luo, P., D.t. Mcdonald, S.m. Zhu, S. Palanisamy, M.s. Dargusch, and K. Xia. "Analysis of Microstructure and Strengthening in Pure Titanium Recycled from Machining Chips by Equal Channel Angular Pressing Using Electron Backscatter Diffraction." *Materials Science and Engineering: A* 538 (2012): 252-58. Web.

Luo, P., D.t. Mcdonald, W. Xu, S. Palanisamy, M.s. Dargusch, and K. Xia. "A Modified Hall-Petch Relationship in Ultrafine-grained Titanium Recycled from Chips by Equal Channel Angular Pressing." *Scripta Materialia* 66.10 (2012): 785-88. Web.

Luo, P., H. Xie, M. Paladugu, S. Palanisamy, M. S. Dargusch, and K. Xia. "Recycling of Titanium Machining Chips by Severe Plastic Deformation Consolidation." *J Mater Sci Journal of Materials Science* 45.17 (2010): 4606-612. Web.

Mabuchi, Mamoru, Kohei Kubota, and Kenji Higashi. "New Recycling Process by Extrusion for Machined Chips of AZ91 Magnesium and Mechanical Properties of Extruded Bars." *Materials Transactions, JIM* 36.10 (1995): 1249-254. Web.

Madanchi, Nadine, Denis Kurlle, Marius Winter, Sebastian Thiede, and Christoph Herrmann. "Energy Efficient Process Chain: The Impact of Cutting Fluid Strategies." *Procedia CIRP* 29 (2015): 360-65. Web.

Mcdonald, D. T., E. W. Lui, S. Palanisamy, M. S. Dargusch, and K. Xia. "Achieving Superior Strength and Ductility in Ti-6Al-4V Recycled from Machining Chips by Equal Channel Angular Pressing." *Metall and Mat Trans A Metallurgical and Materials Transactions A* 45.9 (2014): 4089-102. Web.

Mcdonald, D.t., Peng Luo, Suresh Palanisamy, Matthew S. Dargusch, and K. Xia. "Ti-6Al-4V Recycled from Machining Chips by Equal Channel Angular Pressing." *KEM Key Engineering Materials* 520 (2012): 295-300. Web.

McMillan, Colin Alexander. "Modeling Temporal Aluminium Material Flows and Greenhouse Gas Emissions to Evaluate Metals Recycling Allocation in Life Cycle Assessment." Diss. U of Michigan, 2011. Print.

MCRMA. "Metal Wall Systems Design Guide." MCRMA Technical Paper No. 5 (2004): The Metal Cladding & Roofing Manufacturers Association Ltd. Web. 17 Mar. 2016. <<http://mcrma.co.uk/wp-content/uploads/2015/08/MCRMA-TP5.pdf>>.

MetalBulletin. "MB non-ferrous scrap and foundry ingot price changes." 2016. Web. 12 Apr. 2016. <<http://www.metalbulletin.com/Article/3501379/Non-Ferrous/MB-NON-FERROUS-UK-SCRAP-AND-FOUNDRY-INGOT-PRICE-CHANGES.html#axzz3rZf1NJgl>>.

Miao, Jiao, Bing Ye, Qudong Wang, and Tao Peng. "Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Mg-10Gd-2Y-0.5Zr Alloy by Hot Extrusion Solid-state Recycling." *Journal of Alloys and Compounds* 561 (2013): 184-92. Web.

Milford, Rachel L., Julian M. Allwood, and Jonathan M. Cullen. "Assessing the Potential of Yield Improvements, through Process Scrap Reduction, for Energy and CO2 Abatement in the Steel and Aluminium Sectors." *Resources, Conservation and Recycling* 55.12 (2011): 1185-195. Web.

Misiolek, Wojciech Z., Matthias Haase, Nooman Ben Khalifa, A. Erman Tekkaya, and Matthias Kleiner. "High Quality Extrudates from Aluminum Chips by New Billet Compaction and Deformation Routes." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61.1 (2012): 239-42. Web.

Modaresi, Roja, and Daniel B. Müller. "The Role of Automobiles for the Future of Aluminum Recycling." *Environmental Science & Technology Environ. Sci. Technol.* 46.16 (2012): 8587-594. Web.

Murugappan, Shanmugam, Sanjivi Arul, and Surendran K. Narayanan. "An Experimental Study on Turning of AL6063 under Cryogenic Pre Cooled Condition." *Procedia CIRP* 35 (2015): 61-66. Web.

Nakanishi, M., et al. "Tensile properties of the ZK60 magnesium alloy produced by hot extrusion of machined chip." *Journal of materials science letters* 17.23 (1998): 2003-2005.

National Conveyors Company. "Briquetting of metal chips" N.p., 2015. Web. 13 May 2016. <<http://www.nationalconveyors.com/Metal-Chip-Briquetters>>.

National Conveyors Company. "National Conveyors Vari Screen® Adjustable Bowl Metal Chip Wringer/Centrifuge." N.p., 2015. Web. 13 May 2016. <<http://www.nationalconveyors.com/Vari-Screen-Adjustable-Bowl>>.

Nederman. Horizontal Swarf Centrifuges Type HD. Tech. no. 15000 4. N.p., 16 Feb. 2012. Web. 13 May 2016. <[http://www.nederman.com/products/material-handling-and-separation/chip-centrifuges/~media/ExtranetDocuments/PublishedTechnicalLeaflet/Horizontal\\_swarf\\_centrifuges\\_type\\_HD.ashx](http://www.nederman.com/products/material-handling-and-separation/chip-centrifuges/~media/ExtranetDocuments/PublishedTechnicalLeaflet/Horizontal_swarf_centrifuges_type_HD.ashx)>.



Oudijzer Prijs. "Prijs Oud Ijzer En Dagprijzen Oude Metalen | Oudijzer-prijs.com." 12 Apr. 2016. Web. 12 Apr. 2016. <<http://oudijzer-prijs.com/dag-prijs/>>.

OVAM. "Materialenscan." Vlaams Materialenprogramma. Agentschap Ondernemen En Innoveren, 2015. Web. 29 May 2016. <<http://www.materialenscan.be/>>.

Pantke, K., V. Güley, D. Biermann, and A. E. Tekkaya. "Aluminum Scrap Recycling Without Melting." *Future Trends in Production Engineering*(2012): 373-77. Web.

Paraskevas, Dimos, Karel Kellens, Renaldi, Wim Dewulf, and Joost R. Duflou. "Sustainable Metal Management and Recycling Loops: Life Cycle Assessment for Aluminium Recycling Strategies." *Re-engineering Manufacturing for Sustainability* (2013): 403-08. Web.

Paraskevas, Dimos, Karel Kellens, Wim Dewulf, and Joost R. Duflou. "Environmental Modelling of Aluminium Recycling: A Life Cycle Assessment Tool for Sustainable Metal Management." *Journal of Cleaner Production*105 (2015): 357-70. Web.

Paraskevas, Dimos, Karel Kellens, Wim Dewulf, and Joost R. Duflou. "Environmental Modelling of Aluminium Recycling: A Life Cycle Assessment Tool for Sustainable Metal Management." *Journal of Cleaner Production*105 (2015): 357-70. Web.

Paraskevas, Dimos, Kim Vanmeensel, Jef Vleugels, Wim Dewulf, and Joost R. Duflou. "Solid State Recycling of Aluminium Sheet Scrap by Means of Spark Plasma Sintering." *KEM Key Engineering Materials* 639 (2015): 493-98. Web.

Paraskevas, Dimos, Kim Vanmeensel, Jef Vleugels, Wim Dewulf, and Joost R. Duflou. "The Use of Spark Plasma Sintering to Fabricate a Two-phase Material from Blended Aluminium Alloy Scrap and Gas Atomized Powder." *Procedia CIRP* 26 (2015): 455-60. Web.

Paraskevas, Dimos, Kim Vanmeensel, Jef Vleugels, Wim Dewulf, Yelin Deng, and Joost Duflou. "Spark Plasma Sintering As a Solid-State Recycling Technique: The Case of Aluminum Alloy Scrap Consolidation." *Materials* 7.8 (2014): 5664-687. Web.

Peng, T., Q.d. Wang, and J.b. Lin. "Microstructure and Mechanical Properties of Mg-10Gd-2Y-0.5Zr Alloy Recycled by Cyclic Extrusion Compression." *Materials Science and Engineering: A* 516.1-2 (2009): 23-30. Web.

Peng, T., Q.d. Wang, M.p. Liu, J. Zheng, and J.b. Lin. "An Optimization Approach for Hot Compaction Technology of Mg-10Gd-2Y-0.5Zr Alloy during Solid-state Recycling." *Powder Technology* 194.1-2 (2009): 142-48. Web.

Peng, Tao, Qudong Wang, Jinbao Lin, Manping Liu, and Hans J. Roven. "Microstructure and Enhanced Mechanical Properties of an Mg-10Gd-2Y-0.5Zr Alloy Processed by Cyclic Extrusion and Compression." *Materials Science and Engineering: A* 528.3 (2011): 1143-148. Web.

Peng, Tao, Qudong Wang, York Han, Jiang Zheng, and Wei Guo. "Microstructure and High Tensile Strength of Mg-10Gd-2Y-0.5Zr Alloy by Solid-state Recycling." *Materials Science and Engineering: A* 528.2 (2010): 715-20. Web.

Plan C. "Take Back Chemicals." Plan C Cases in België. 13 Jan. 2016. Web. 29 May 2016. <<http://www.plan-c.eu/nl/cases-in-belgie/case-detail/take-back-chemicals>>.

Plessers, Frank. "Economic & Environmental Assessment and Optimization of Recycling Scenarios for IT Equipment in Developing Countries." Thesis. KU Leuven, 2013. Print.

Raman, Vincent. Telefoongesprek. +32 (0)475 232854. 13 mei 2016.

RUF. Briquetting. Melting. Adding Value. Publication. RUF Briquetting Systems, n.d. Web. 13 May 2016. <[http://www.brikettieren.de/fileadmin/Downloads/Produktflyer/Giesserei/RUF\\_Foundry\\_Projects\\_EN.pdf](http://www.brikettieren.de/fileadmin/Downloads/Produktflyer/Giesserei/RUF_Foundry_Projects_EN.pdf)>.

Samuel, M. "A New Technique for Recycling Aluminium Scrap." *Journal of Materials Processing Technology* 135.1 (2003): 117-24. Web.

Scrap Monster. "Europe Scrap Metal Prices." 12 Apr. 2016. Web. 12 Apr. 2016. <<http://www.scrapmonster.com/european-scrap-prices>>.

Shahrom, Mohamad Syahmi, Ahmad Razlan Yusoff, and Mohd Amri Lajis. "Taguchi Method Approach for Recycling Chip Waste from Machining Aluminum (AA6061) Using Hot Press Forging Process." *AMR Advanced Materials Research* 845 (2013): 637-41. Web.

Sharifzadeh, Mohammad, Mohammad Ali Ansari, Morteza Narvan, Reza Abdi Behnagh, Alireza Araee, and Mohammad Kazem Besharati Givi. "Evaluation of Wear and Corrosion Resistance of Pure Mg Wire Produced by Friction Stir Extrusion." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 25.6 (2015): 1847-855. Web.

Sherafat, Z., M.h. Paydar, and R. Ebrahimi. "Fabrication of Al7075/Al, Two Phase Material, by Recycling Al7075 Alloy Chips Using Powder Metallurgy Route." *Journal of Alloys and Compounds* 487.1-2 (2009): 395-99. Web.

Sherafat, Z., M.h. Paydar, R. Ebrahimi, and S. Sohrabi. "Mechanical Properties and Deformation Behavior of Al/Al7075, Two-phase Material." *Journal of Alloys and Compounds* 502.1 (2010): 123-26. Web.

Shigematsu, Ichinori, Kazutaka Suzuki, Tsunemichi Imai, Yong-Jai Kwon, and Naobumi Saito. "Friction Stir Welding of Recycled A6061 Aluminum Plates Fabricated by Hot-extrusion of Machined Chips." *J Mater Sci Journal of Materials Science* 40.11 (2005): 2971-974. Web.

Sijpersma, Wietse. Telefoongesprek. +31 (0) 512 820 026. 23 mei 2016.

Skillingberg, Michael. "Aluminum Applications in the Rail Industry." *Light Metal Age* (2007): The Aluminium Association. Web. 15 Mar. 2016.

Sreejith, P.s. "Machining of 6061 Aluminium Alloy with MQL, Dry and Flooded Lubricant Conditions." *Materials Letters* 62.2 (2008): 276-78. Web.

Stadelmann, Claudia. "Extrusion von Metallpulven durch kontinuierliches Pulverstrangpressen." Ph.d. thesis. Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen - Nurnberg, 2009. Web.

Stanz BV. "Briketteerpersen." Stanz Environment Systems, 2015. Web. 26 Apr. 2016. <<http://www.stanz.nl/nl/producten/briketteerpersen>>.

Starke, E.a., and J.t. Staley. "Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft." *Progress in Aerospace Sciences* 32.2-3 (1996): 131-72. Web.

Stern, M., 1945. U.S. Patent 2,391,752.

Suzuki, Kazutaka, Xin Sheng Huang, Akira Watazu, Ichinori Shigematsu, and Naobumi Saito. "Recycling of 6061 Aluminum Alloy Cutting Chips Using Hot Extrusion and Hot Rolling." *Materials Science Forum Eco-Materials Processing and Design VIII* (2007): 443-46. Web.

Takahashi, Toshiro, Toshihiro Nagano, Katsuhiko Nagamura, and Masaru Kikuchi. Method of Manufacturing Extruded Structural Profiles from Aluminium Based Metal Scraps. Riken Keikinzoku Kogyo Kabushiki Kaishi, assignee. Patent 4028795. 14 June 1977. Print.

Tang, W., and A.p. Reynolds. "Production of Wire via Friction Extrusion of Aluminum Alloy Machining Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 210.15 (2010): 2231-237. Web.

Tekkaya, A.e., M. Schikorra, D. Becker, D. Biermann, N. Hammer, and K. Pantke. "Hot Profile Extrusion of AA-6060 Aluminum Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 209.7 (2009): 3343-350. Web.

Thamban, Issac, Biju Cherian Abraham, and Sabu Kurian. "Machining Characteristics Analysis of 6061-T6 Aluminium Alloy with Diamond Coated and Uncoated Tungsten Carbide Tool." *International Journal of Latest Research in Science and Technology* 2.1 (2013): 553-57. Web.

Thomas, Ben, Fatos Derguti, and Martin Jackson. "Continuous Extrusion of Titanium Particulates." *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium TMS/Proceedings* (2016): 107-15. Web.

Thomas, Ben. E-mail. B.thomas@sheffield.ac.uk. 23 mei 2016.

Trends Knack. "België Telt Op één Na Hoogste Loonkosten Van Europa." 17 Nov. 2014. Web. 14 Apr. 2016. <<http://trends.knack.be/economie/finance/belgie-telt-op-een-na-hoogste-loonkosten-van-europa/article-normal-511647.html>>.

Tsangaraki-Kaplanoglou, I., S. Theohari, Th. Dimogerontakis, Yar-Ming Wang, Hong-Hsiang (Harry) Kuo, and Sheila Kia. "Effect of Alloy Types on the Anodizing Process of Aluminum." *Surface and Coatings Technology* 200.8 (2006): 2634-641. Web.

Unist. "What Is Minimum Quantity Lubrication? (The Basics)." *Minimum Quantity Lubrication*. N.p., 25 Feb. 2013. Web. 22 May 2016. <[http://minimumquantitylubrication.com/?page\\_id=2](http://minimumquantitylubrication.com/?page_id=2)>.

Valey, Xavier. "Analysis of the Conform process: a specific form of aluminium extrusion." Ph.D. thesis. Bournemouth University, 2004. Web.

Van De Voorde, Alexander. "Environmental Impact Assessment of the Global Primary Aluminium Industry on a Regional and Country Level: The Situation in 2012 and in the Future." Diss. KU Leuven, 2015. Print.

Vatansever, Recep, Harun Mindivan, and Eyup Sabri Kayali. "Fly Ash Particle Reinforced AA6061 Composites Produced by Recycling of Aluminum Chips and Fly Ash Particles." *AMR Advanced Materials Research* 324 (2011): 38-41. Web.

Vernooij, Dolf. E-mail. [oplossing@adbulco.com](mailto:oplossing@adbulco.com). 18 april 2016.

VITO. "Ontvetten in Organisch Milieu." EMIS IBBT. Vlaams Gewest, 2012. Web. 19 May 2016. <<https://ibbt.emis.vito.be/content/ontvetten-organisch-milieu-1>>.

Vlaamse Milieumaatschappij "Gemiddelde Waterprijs 2016." 2016. Web. 14 Apr. 2016. <<https://www.vmm.be/data/gemiddelde-waterprijs/gemiddelde-waterprijs>>.

VOM. *Kwaliteit Is Geen Toeval. Praktische Gids Voor Een Kwalitatieve Poedercoating Op Aluminium*. Leuven: VOM, 2013. Print.

VREG. "Evolutie Van De Energieprijzen Van Gezinnen En Bedrijven." Vlaamse Regulator van de Electriciteits- en gasmarkt, 2016. Web. 14 Apr. 2016. <<http://www.vreg.be/nl/evolutie-van-de-energieprijzen-van-gezinnen-en-bedrijven>>.

Wang, Jian-Yih, Ying-Nan Lin, Tien-Chan Chang, and Shyong Lee. "Recycling the Magnesium Alloy AZ91D in Solid State." *Materials Transactions* 47.4 (2006): 1047-051. Web.

Watanabe, Hiroyuki, et al. "Consolidation of machined magnesium alloy chips by hot extrusion utilizing superplastic flow." *Journal of materials science* 36.20 (2001): 5007-5011.

Wen, Lihua, Zesheng Ji, and Xiaoliang Li. "Effect of Extrusion Ratio on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Nd-Zn-Zr Alloys Prepared by a Solid Recycling Process." *Materials Characterization* 59.11 (2008): 1655-660. Web.

Widerøe, F., and T. Welo. "Using Contrast Material Techniques to Determine Metal Flow in Screw Extrusion of Aluminium." *Journal of Materials Processing Technology* 213.7 (2013): 1007-018. Web.

Widerøe, Fredrik, and Torgeir Welo. "An Investigation of the Material Flow in a Screw Extruder of Aluminium Using Contrast Material." *KEM Key Engineering Materials* 504-506 (2012): 475-80. Web.

Widerøe, Fredrik, Torgeir Welo, and Harald Vestøl. "A New Testing Machine to Determine the Behaviour of Aluminium Granulate under Combined Pressure and Shear." *International Journal of Material Forming Int J Mater Form* 6.1 (2011): 199-208. Web.

Wigol. Product Properties - Technical Sheet Degreaser VR X 74 S. Tech. no. 001307. Wigol W. Stache GmbH, 28 Feb. 2012. Web. 13 Apr. 2016. <<http://www.wigol.de/sites/default/files/download/datasheets/en/001307.PDF>>.

Wu, Shuyan, Zesheng Ji, and Tielei Zhang. "Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Alloy Recycled by Solid-state Process from Different Size Chips." *Journal of Materials Processing Technology* 209.12-13 (2009): 5319-324. Web.

Xiao, Y., and M.a Reuter. "Recycling of Distributed Aluminium Turning Scrap." *Minerals Engineering* 15.11 (2002): 963-70. Web.

Yusuf, N.k., Mohd Amri Lajis, M.i. Daud, and M.z. Noh. "Effect of Operating Temperature on Direct Recycling Aluminium Chips (AA6061) in Hot Press Forging Process." *AMM Applied Mechanics and Materials* 315 (2013): 728-32. Web.

Zhang, Tielei, Zesheng Ji, and Shuyan Wu. "Effect of Extrusion Ratio on Mechanical and Corrosion Properties of AZ31B Alloys Prepared by a Solid Recycling Process." *Materials & Design* 32.5 (2011): 2742-748. Web.

Zhilyaev, A.p., A.a. Gimazov, G.i. Raab, and T.g. Langdon. "Using High-pressure Torsion for the Cold-consolidation of Copper Chips Produced by Machining." *Materials Science and Engineering: A* 486.1-2 (2008): 123-26. Web.

## Master's Thesis file

*Student:* Matthias Floru

*Titel:* Onderzoek naar het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclageprocessen: Een economische en ecologische analyse van aluminiumrecyclage via warmextrusie en vonkplasma-sinteren.

*English title:* Investigation of the valorization potential of solid state recycling processes: Economic and ecological analysis of aluminium recycling by means of hot extrusion and spark plasma sintering.

*UDC:*621

*Samenvatting:* Deze thesis bestudeert het valorisatiepotentieel van smeltloze recyclage van aluminium verspaningsafval via warmextrusie en vonkplasma-sinteren door het antwoord te zoeken op de vragen naar marktvraag en aanbod, kostcompetitiviteit, ecologische impact en nood aan businessmodelinnovatie. Smeltloos gerecycleerd aluminium is het meest waarschijnlijk toepasbaar in de bouwsector en niet veiligheidskritieke toepassingen in de transportsector. De totale maximale vraag naar smeltloos gerecycleerd aluminium in Europa bedraagt 3 miljoen ton per jaar, veel hoger dan het aanbod van 330kton geschikt verspaningsafval. De ecologische impact van smeltloze recyclage via warmextrusie is 2 tot 4 keer lager dan de impact van recyclage via hersmelten. Om dit te bereiken moet echter het reinigingsproces veel efficiënter dan in de experimentele testopstelling. Europa kan een totale jaarlijkse impact van 75miljoen ecopunten en 1 miljoen ton CO<sub>2</sub> equivalenten vermijden bij volledige valorisatie van smeltloze recyclage. Met een geschatte operationele kost van 0,30€/kg is smeltloze recyclage tot biliet competitief met recyclage via hersmelten, rekening houdend met de vermeden smeltverliezen. Om deze kost te bereiken moet het proces in een volautomatische productielijn plaatsvinden. Partners zijn voorgesteld om deze productielijn te ontwikkelen. Een circulair businessmodel kan het risico bij opstart en opschalen van smeltloze recyclage beperken en de winst voor de betrokken partners maximaliseren.

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde

*Promotor:* Prof. dr. ir. Joost Duflou

*Assessoren:* Prof. dr. ir. Farid Al-Bender, dr. ing. Karel Kellens

*Begeleider:* dr. ir. Dimos Paraskevas