



## Duurzaam gebruik van schaarse grondstoffen haalbaar



Sommige grondstoffen beginnen behoorlijk schaars te worden, tenminste als je de jaarlijkse hoeveelheid, die uit de grond wordt gehaald, vergelijkt met de daar aanwezige voorraad. De vraag rijst of het wel doenlijk is om de winning van schaarse grondstoffen terug te brengen tot een zodanig niveau dat er voldoende over blijft voor toekomstige generaties. Uit ons onderzoek blijkt dat het antwoord op deze vraag positief is, althans voor antimoon, zink, molybdeen en borium.

*Theo Henckens, Peter Driessen en Ernst Worrell*

*Ir. M. (Theo) Henckens (theo.henckens@gmail.com) is gepensioneerd. Zijn functie was projectdirecteur milieu- en waterstudies bij het adviesbureau DHV\*. Prof. Dr. P. (Peter) Driessen en Prof. Dr. E. (Ernst) Worrell zijn resp. hoogleraar environmental governance en hoogleraar op het gebied van de relaties tussen energie- en materiaalgebruik en milieu, beiden aan de Universiteit van Utrecht.*

*\* Theo Henckens promoveert op 17 oktober 2016 aan de Universiteit van Utrecht op een onderzoek naar de technische en beleidsmatige aanpak van het probleem van schaarse grondstoffen*

We gebruiken de volgende definitie voor de duurzame winning van grondstoffen: de winning van een grondstof is duurzaam als een wereldbevolking van 9 miljard mensen kan worden voorzien van die grondstof gedurende een periode van minstens 1000 jaar, ervan uitgaande dat het gemiddeld gebruik per hoofd van de bevolking gelijk is verdeeld over de landen van de wereld. Wij hebben deze definitie onderbouwd in een eerder artikel in Milieu (februari 2015). Wanneer we het huidige gebruik van minerale grondstoffen bezien in het licht van de definitie, dan blijkt dat de winning van negen minerale grondstoffen met minstens 40% moet worden verminderd om duurzaam te heten. Zie tabel 1 waarin de noodzakelijke reductie voor borium met circa 40% het minst is<sup>1</sup>.

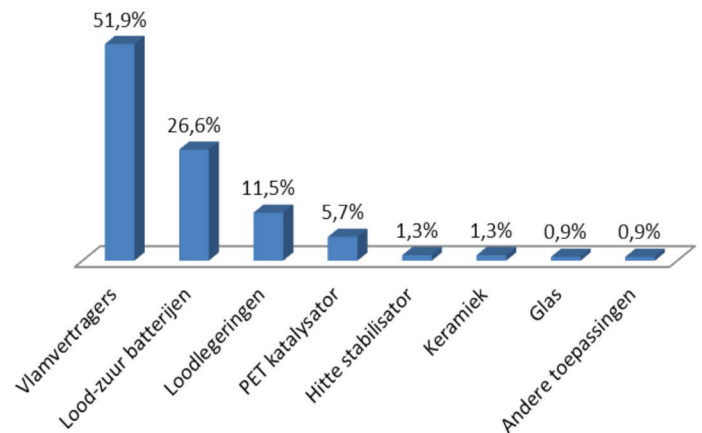
In dit artikel gaan we voor vier mineralen na of, en zo ja hoe de gewenste reductie van de winning kan worden bereikt. We doen dit voor antimoon, zink, molybdeen en borium. We hebben deze vier grondstoffen niet alleen gekozen vanwege hun relatieve geologische schaarste, maar ook vanwege hun verschillende chemische eigenschappen die het mogelijk maken om een spectrum van mogelijke aanpakken te onderzoeken.

Bij het onderzoek naar de mogelijkheden om de winning van deze grondstoffen te verminderen zullen we de 3R benadering volgen: *Reduce, Reuse, Recycle*. Vervanging van de grondstof door een andere grondstof valt onder het kopje 'Reduce' en materiaalefficiëntie onder het kopje 'Reuse'. Uit een oogpunt van consistentie zullen we dat ook in die volgorde doen. Per toepassing onderzoeken we eerst of de grondstof kan worden vervangen. Daarna kijken we of het resterende deel efficiënter kan worden gebruikt. Vervolgens kijken we naar de mogelijkheden van recycling. Het hoeft niet zo te zijn dat de mix van maatregelen, die hieruit volgt, optimaal is uit een oogpunt van kosten. Het doel van de exercitie is in de

Tabel 1. Noodzakelijke reductie voor een duurzame winning

Mineraal	Noodzakelijke vermindering van de winning ten opzichte van 2010 om een duurzame situatie te bereiken
Antimoon	96%
Goud	92%
Zink	82%
Molybdeen	81%
Rhenium	74%
Koper	63%
Chroom	57%
Bismut	55%
Borium	44%

Figuur 1. Antimoontoepassingen in 2010<sup>2</sup>



eerste plaats om te onderzoeken of reductie van de winning van de schaarse grondstof tot een duurzaam niveau haalbaar is.

### Antimoon

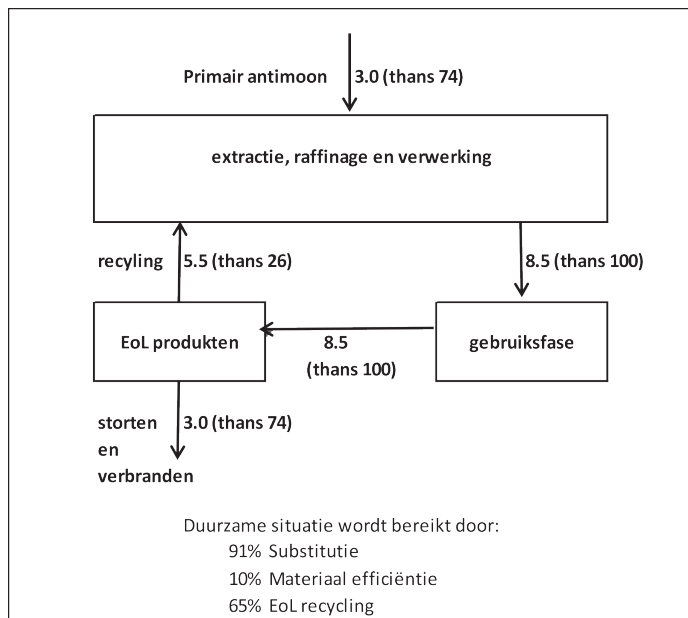
Uit het oogpunt van duurzaamheid moet de winning van antimoon met 96% worden verminderd. De belangrijkste toepassingsgebieden van antimoon zijn aangegeven in Figuur 1.

### Huidige situatie en autonome ontwikkelingen

Hoewel de toepassing van antimoon in zonnecellen stijgt, wordt verwacht dat het totaalgebruik zal afnemen in de toekomst. Dit komt omdat de belangrijkste antimoontoepassingen, namelijk die in vlamvertragers en accu's, altijd in combinatie zijn met respectievelijk gehalogeneerde koolwaterstoffen en met lood. Uit een oogpunt van bescherming van milieu en volksgezondheid wordt geprobeerd om de toepassing van gehalogeneerde koolwaterstoffen en lood te beperken. De WEEE-richtlijn van de EU schrijft de lidstaten voor om elektrische en elektronische apparatuur zoveel mogelijk apart in te zamelen. Uit deze apart ingezamelde apparaten moeten de producten, die gebromeerde vlamvertragers bevatten, worden verwijderd en apart behandeld. Ook de toepassing van antimoon als katalysator voor de bereiding van PET ligt onder vuur vanwege de vastgestelde (langzame) migratie van antimoon naar de vloeistoffen die worden bewaard in PET-flessen. De mate van recycling van accu's is hoog. Hieruit wordt antimoon afgescheiden en opnieuw gebruikt. Dit geldt ook voor antimoon in lood(legeringen), die worden gebruikt in de bouw. Ook vindt er enige antimoonrecycling plaats door hergebruik van PET uit PET-flessen.

Geschat wordt dat op dit moment ongeveer 25% van het gebruikte antimoon wordt gerecycled op één van de aangegeven manieren en dat dus 75% van het gebruikte antimoon in het milieu 'verdwijnt'.

**Figuur 2. Antimoon stroomschema met 96% reductie van de winning van primair antimoon vergeleken met de situatie in 2010. Het eindgebruik in 2010 is genormaliseerd op 100 eenheden. Het gebruik van antimoon neemt met ca. 91% af. (EoL = end of life)**



### Reductiepotentieel op basis van 3R

Voor wat betreft de vervangbaarheid van antimoon in brandvertragers hebben we een aantal experts op dit gebied geraadpleegd<sup>3</sup>. Zij geven als hun mening dat het mogelijk is om binnen een periode van tien jaar het antimoon gebruik in vlamvertragers met 95% te verminderen door vervanging van de antimoon-bevatende vlamvertragers door andere vlamvertragers.

In algemene zin gelden voor vervangbaarheid van een grondstof door een andere grondstof of door een andere technologie de volgende voorwaarden:

- De prestatie moet voldoende blijven;
- De effecten op het gebied van gezondheid, milieu en veiligheid mogen niet negatief zijn;
- De nieuwe middelen moeten financieel haalbaar zijn;
- Een vervangende grondstof mag niet schaarser of even schaars zijn dan het origineel.

Ook als katalysator bij de PET-productie en als hitte-stabilisator kan antimoon voor 100% worden vervangen door andere producten zoals blijkt uit een literatuuronderzoek<sup>3</sup>. Antimoonvrije PET is al op de markt verkrijgbaar. In glastoepassingen is vervanging van antimoon moeilijker. Niettemin verwachten onder-vraagde experts dat binnen een periode van tien jaar 80% van antimoon in glas vervangbaar is<sup>3</sup>. Voor wat betreft de toepassing van antimoon in kleurstoffen in keramiek denken we dat

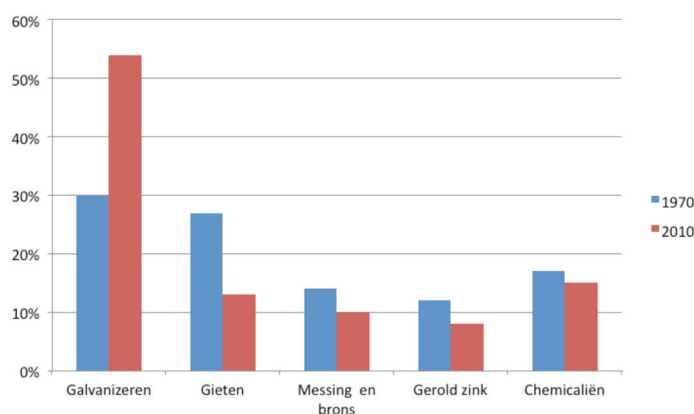
antimoon voor 100% vervangbaar is, hoewel misschien niet altijd precies hetzelfde kleureffect kan worden bereikt. Er zijn immers vele (soorten) kleurstoffen voor keramiek in de handel. Antimoon bevattende accu's kunnen helemaal worden vervangen door antimoonvrije calcium-calcium loodzuur accu's<sup>3</sup>. Voor wat betreft de toepassing van antimoon in loodlegeringen is het lastiger om een uitspraak te doen over de vervangbaarheid. Niettemin schatten we deze in op minstens de helft van het toegepaste antimoon. We concluderen dat antimoon in totaal voor ca. 90% kan worden vervangen door andere stoffen.

Voor wat betreft de resterende 10% denken we dat het mogelijk is om de efficiency van het gebruik van antimoon met ongeveer 10% te verhogen. Dat wil zeggen dat de levering van dezelfde diensten mogelijk is met ca. 10% minder antimoon. De belangrijkste manieren om dit te bereiken zijn lagere verliezen bij de productie van antimoon, lagere concentratie in producten en een economischer en/of langer gebruik van producten met antimoon. Voor de onderbouwing van deze aanname wordt verwezen naar Henckens et al.<sup>10</sup>. Een verbetering van 10% van de efficiency van het gebruik van antimoon bovenop de 90% vervanging is nog steeds niet voldoende om de gewenste uiteindelijke reductie van 96% te bereiken. We denken dat het doel kan worden gehaald door terugwinning van antimoon uit de resterende toepassingen in vlamvertragers in combinatie met een verhoging van de recycling van antimoon uit loodlegeringen van 10% nu naar 75% in de toekomst. De verandering van de respectievelijke massastromen is geschetst in figuur 2.

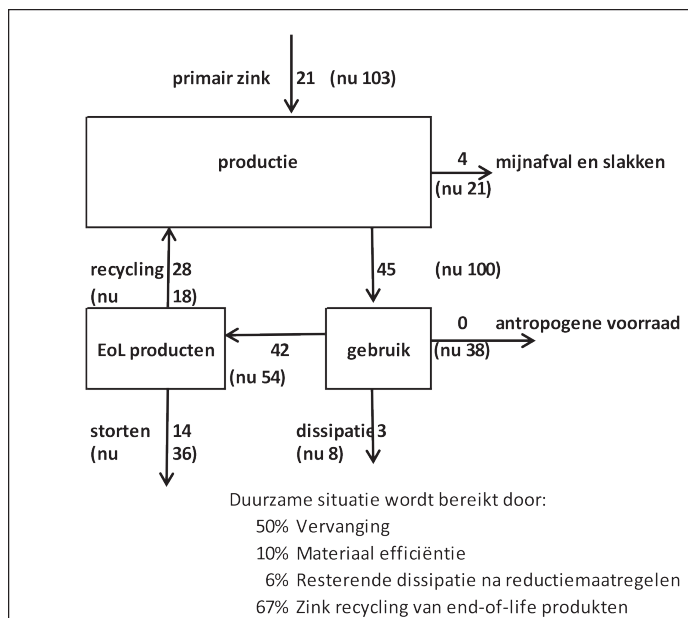
### Zink

De winning van zink uit maagdelijke ertsen moet worden vermindert met 82% om deze duurzaam te kunnen noemen. De belangrijkste toepassingen van zink zijn aangegeven in Figuur 3. De belangrijkste toepassing van zink is voor de bescherming van ijzer en staal tegen corrosie (galvaniseren). Door de aard van deze toepassing is het weglekken van zink naar het milieu (dissipatie) relatief hoog: in de orde van 1% van het gewicht aan zink op het

**Figuur 3. Belangrijkste eindtoepassingen van zink<sup>4</sup>**



**Figuur 4. Stroomschema van toekomstige zinkstromen in een scenario van medium vervanging–veel recycling met een totale reductie van de winning van primair zink van 80% vergeleken met 2010. Er is aangenomen dat er geen verdere opbouw van antropogene voorraad van zink plaatsvindt. Het eindgebruik in 2010 is genormaliseerd op 100 eenheden. Het gebruik van zink neemt met 55% af.**



gegalvaniseerde product per jaar<sup>5</sup>. Per saldo resulteert dit in 8% dissipatie van het zink dat wordt gebruikt voor galvaniseren. Ook de dissipatie vanwege het gebruik van zink in chemicaliën is relatief hoog en wordt geschat op 25%. De belangrijkste bron van dissipatie in het milieu van zink in chemicaliën is zink in varkensvoer<sup>5</sup>. De totale dissipatie van zink in het milieu als gevolg van gebruik wordt eveneens geraamd op ca. 8%<sup>5</sup>. Een aanzienlijk deel van zinkhoudende producten wordt gebruikt in bouwwerken. Volgens Japanse onderzoekers is de gemiddelde 'leeftijd' van deze producten, voordat ze in het afvalstadium terecht komen, ca. dertig jaar<sup>5</sup>. Voor machines en voertuigen is dat gemiddeld tien jaar. In geïndustrialiseerde landen is er min of meer een evenwicht bereikt: de hoeveelheid zink in de gebruiksfase blijft constant<sup>5</sup>. In ontwikkelingslanden en vooral in groei landen, zoals China en India, neemt de hoeveelheid zink in de gebruiksfase nog flink toe. Naar gelang de hoeveelheid zink in de gebruiksfase stabiliseert, neemt de recycling van zink naar verhouding toe. Op dit moment wordt naar schatting slechts ongeveer 1/3 van het zink uit producten in het afvalstadium gerecycled<sup>5</sup>. Dit komt vooral doordat zink uit recycled staal nog slechts voor ca. 30% wordt teruggewonnen. Zink in brons en messing wordt nog niet teruggewonnen omdat de primaire zink productie heel gevoelig is voor de aanwezigheid van halogenen in zink afkomstig van de koperindustrie. Zink in gietstukken en in gerold zink wordt wel voor 90% gerecycled<sup>5</sup>.

In principe is zink in de meeste van zijn toepassingen gedeeltelijk vervangbaar door andere producten, hoewel dit kosten met zich meebrengt en soms verlies van prestatie. Gegalvaniseerd staal kan worden vervangen door aluminium, roestvrij staal of kunststof. Uiteraard gelden bij vervanging de voorwaarden, zoals al genoemd bij antimoon. Zinken gietstukken kunnen voor een deel worden vervangen door aluminium en kunststof. Brons en messing kunnen eveneens voor een deel van de toepassingen worden vervangen door aluminium of kunststof. Dit geldt ook voor gerold zink, bijvoorbeeld in de toepassing als dakgoot. In sommige producten kan zink echter niet worden vervangen, zoals in de toepassing als additief in varkensvoer. Over de vervangbaarheid van zink zijn weinig cijfers beschikbaar. We hebben daarom drie substitutiescenarios verondersteld op de volgende niveaus: 20%, 50% en 70%.

Evenals voor antimoon hebben we aangenomen dat de gebruiksefficiëntie van zink met 10% kan worden verhoogd.

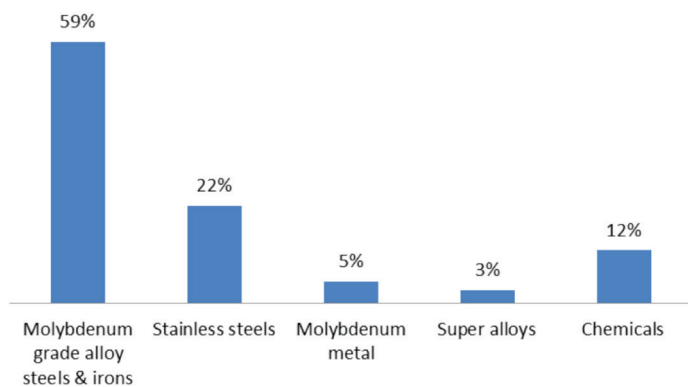
De dissipatie van zink uit gegalvaniseerde producten kan met meer dan 90% worden verminderd door gegalvaniseerde oppervlakken te bedekken met een impermeabele kunststof coating<sup>5</sup>. De dissipatie van zink vanuit gegalvaniseerde producten kan daardoor worden verminderd van 8% naar 1%<sup>5</sup>.

De recycling van zink uit gegalvaniseerd staal kan sterk worden opgevoerd door het zink in de vliegassen van Electric Arc Furnace (EAF) staalovens terug te winnen. Dat gebeurt nu om economische redenen nog niet veel. Primair zink is lager in prijs dan secundair zink dat op deze wijze wordt teruggewonnen. Ook zink uit brons en messing kan worden teruggewonnen met behulp van een aparte behandeling van de vliegassen van de smeltovens voor brons en messing. Per saldo is een hoog recycling percentage van zink technisch goed mogelijk. De vereiste 82% reductie van de winning van zink kan nagenoeg worden bereikt met een combinatie van:

- 80% terugwinning van zink uit gegalvaniseerd staal en brons & messing, in plaats van respectievelijk 30% en 0% op dit moment, resulterend in een 67% overall recycling percentage uit end-of-life producten in plaats van 37% nu;
- 50% vervanging van zink;
- 90% vermindering van de zinkdissipatie vanaf gegalvaniseerd staal, resulterend in een overall zinkdissipatie van 6% in plaats van 8% op dit moment;
- 10% verbetering van de gebruiksefficiëntie van zink.

Daarbij wordt ervan uitgegaan dat de opbouw van zink in de gebruiksfase is gestabiliseerd. De verandering van de respectievelijke massastromen is geschetst in Figuur 4.

**Figuur 5. Molybdeen toepassingen in 2012. Ontleend aan de website van de International Molybdenum Association<sup>6</sup>**



### Molybdeen

De winning van primair molybdeen moet worden vermindert met 81% om duurzaam te worden genoemd. De toepassingen van molybdeen staan in Figuur 5.

De conclusie is dat bijna 90% van het molybdeen wordt toegepast in staal, legeringen en metallisch molybdeen. Op basis van gegevens van Nakajima et al.<sup>7</sup> kan worden geschat dat ongeveer 10% van het molybdeen in de gebruiksfase weglekt naar het milieu, vooral uit de toepassingen in chemicaliën.

Er zijn geen gegevens te vinden in de literatuur met betrekking tot accumulatie van molybdeen in de gebruiksfase. Omdat molybdeen voor méér dan 80% wordt toegepast in staal, nemen we aan dat de accumulatie in de gebruiksfase minstens van dezelfde orde van grootte zal zijn dan die van zink. Deze aanname wordt gesteund door gegevens van Blossom<sup>8</sup>, volgens wie de levensduur van molybdeen houdende producten tussen de tien en zestig jaar is met een gemiddelde van twintig jaar. Dit is vergelijkbaar met de levensduur van zink<sup>5</sup>. Op basis van gegevens van Meylan en Reck<sup>9</sup> voor zink schatten we daarom dat op dit moment nog ongeveer 40% van het totale molybdeenconsumptie accumuleert in de gebruiksfase. Verdere accumulatie zal naar verwachting geleidelijk afnemen en stabiliseren, naarmate de welvaart van ontwikkelingslanden verder groeit.

Op basis van de ervaringen in de Verenigde Staten, schatten we de mondiale recycling van molybdeen in op slechts 20%<sup>5</sup>. Dit komt omdat molybdeen bevattende producten veelal niet worden gerecycled om molybdeen maar om ijzer terug te winnen. Het molybdeen komt op die manier voor het grootste deel terecht in laagwaardiger staal producten (*down cycling*).

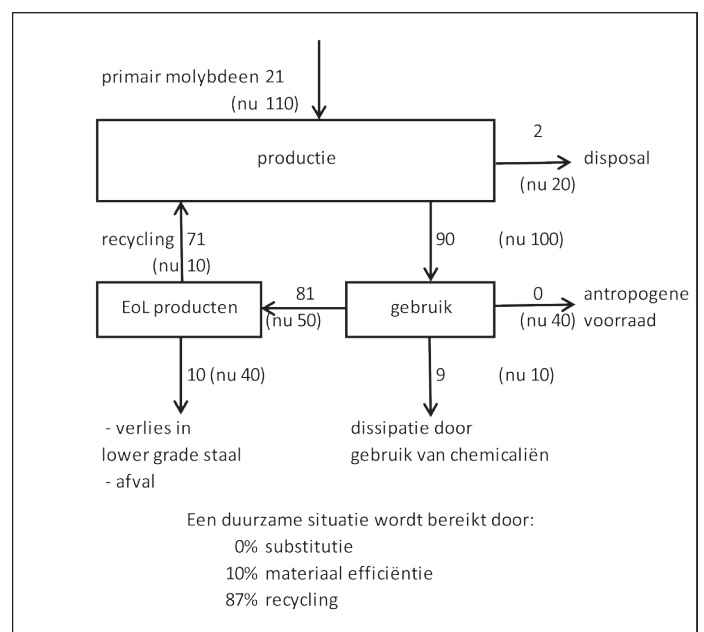
De toepassingen van molybdeen zijn zo specifiek dat de mogelijkheden van vervanging van door andere producten vooralsnog beperkt lijken. Daarom zal de gewenste reductie van de winning

van primair molybdeen in zijn geheel moeten worden gerealiseerd door verbetering van de materiaalefficiëntie en door recycling. Dus de gewenste reductie met 81% ten opzichte van het huidige gebruik zal vrijwel geheel moeten worden gerealiseerd door middel van een verhoging van de mate van recycling uit end-of-life molybdeenhoudende producten van ca. 20% op dit moment naar in de orde van 90% in de toekomst. Dit is een grote sprong, die vraagt om vergaande maatregelen. Deze maatregelen kunnen als volgt worden onderverdeeld:

- Selectieve ontmanteling;
- Betere sortering van metaal scrap;
- Aangepast ontwerp.

Bij selectieve ontmanteling worden delen met een relatief hoog gehalte van het relevante materiaal apart gehouden. Sortering in de afvalfase kan worden verbeterd door informatieverbetering in de richting van recyclingbedrijven, ontwikkeling van betere classificatietechnologieën en (vooral) een betere prijs voor de gesorteerde materialen. Een ontwerp dat rekening houdt met de recycleerbaarheid moet voldoen aan de volgende voorwaarden: (1) kies een materiaal met een zo laag mogelijk gehalte van de schaarse grondstof, (2) kies materialen met een zo groot mogelijk verschil in geleidbaarheid, (3) kies onderdelen met een geometrie en een grootte, die scheiding niet nodeloos bemoeilijkt. Dit is allemaal niet onmogelijk voor wat betreft molybdeen, maar zal toch wel een aanzienlijke inspanning en focus vragen.

**Figuur 6. Stroomschema dat de massastromen weergeeft in een situatie van 81% vermindering van de winning van primaire molybdeen ten opzichte van 2010. Aangenomen is dat er geen verdere opbouw van de antropogene voorraad plaatsvindt. Het eindgebruik in 2010 is genormaliseerd op 100 eenheden. Het gebruik van molybdeen neemt slechts met 10% af ten opzichte van 2010.**



Uiteindelijk zal de verbeterde materiaal efficiëntie en recycling moeten leiden tot het massastroomschema, dat is afgebeeld in Figuur 6.

### Borium

De winning van borium per wereldburger moet worden vermindert met 44% ten opzichte van de winning in 2010.

De huidige toepassingen van borium zijn vermeld in Tabel 4.

De conclusie is dat ongeveer 60% van het borium wordt toegepast in glasproducten, waarvan tweederde in glaswol. Dit feit maakt de vermindering van het gebruik van borium relatief gemakkelijk, omdat glaswol kan worden vervangen door steenwol of kunststofisolatieproducten. Voor wat betreft de toepassing van borium in wasmiddelen, schatten we de vervangbaarheid op ca. 50%<sup>o</sup>. Verbetering van materiaal efficiëntie en recycling zorgen voor een totaal reductiepotentieel voor borium van 55% ten opzichte van de huidige winning.

**Tabel 4. Overzicht van boriumtoepassingen (ontleend aan gegevens van de United States Geological Survey over 2012)**

Glas (totaal)	60%
Glaswol	39% <sup>a</sup>
Glasvezel	16% <sup>a</sup>
Boriumsilicaat glas	5% <sup>a</sup>
Keramiek	10%
Wasmiddelen	4%
Kunstmest	4% <sup>b</sup>
Vlamvertragers	3% <sup>b</sup>
Andere toepassingen (totaal)	19% <sup>c</sup>
Chemicaliën	8% <sup>d</sup>
Cosmetica en farmaceutica	2,5% <sup>d</sup>
Industriële vloeistoffen	2,5% <sup>d</sup>
Metallurgische toepassingen	6% <sup>d</sup>
Totaal	100%

<sup>a</sup> De verdeling van borium in verschillende glastoepassingen over de wereld is verondersteld gelijk te zijn aan de verdeling in de Verenigde Staten zoals geleverd door de United States Geological Survey (USGS)

<sup>b</sup> Het wereldverbruik van borium in kunstmest en vlamvertragers wordt niet gegeven door USGS. Het relatieve wereldgebruik is verondersteld gelijk te zijn aan het relatieve gebruik in de Verenigde Staten zoals gegeven door USGS.

<sup>c</sup> Het wereldgebruik van borium in andere toepassingen is verondersteld het overblijvende deel te zijn van het totale boriumgebruik

<sup>d</sup> De verdeling van het wereldgebruik van borium in andere toepassingen is verondersteld gelijk te zijn aan de relatieve verdeling in Europa zoals gegeven door de Europese Commissie in haar onderzoek over 'Critical Raw Materials for the EU'

### Samenvatting en conclusies

Het blijkt mogelijk om de winning van vier schaarse delfstoffen antimoon, zink, molybdeen en borium in te dammen tot een duurzame niveau. Dit kan met toepassing van huidige technologie. Voor wat betreft antimoon en borium ligt daarbij het accent op vervanging, bij molybdeen op recycling en bij zink op een mix van vervanging en recycling.

De vraag rijst nu welk beleid moet worden gevoerd om de gewenste en technisch mogelijke reductie van de winning van antimoon, zink, molybdeen en borium (en andere schaarse grondstoffen) ook feitelijk te bereiken. Daarop zal in een volgende publicatie worden ingegaan.

#### Referenties

1. Henckens MLCM, Driessen P, Worrell E, 2014, *Metal scarcity and sustainability, Analyzing the necessity to reduce the extraction of scarce metals. Resour. Conserv. Recycl.* 2014; 93:1-8
2. Roskill Consulting Group Limited, *Study of the antimony market (October), 2011*
3. Henckens MLCM, Driessen P, Worrell E., 2016a, *How can we adapt to geological scarcity of antimony? Investigation of antimony's substitutability and of other measures to achieve a sustainable use, Resources, Conservation and Recycling*, 2016; 108, 54-62
4. International Zinc Association, 2014, ([http://www.zinc.org/basics/zinc\\_statistics](http://www.zinc.org/basics/zinc_statistics)), 9-02-2014
5. Henckens MLCM, 2016 *The sustainable use of zinc and molybdenum. Investigation of measures to reduce primary zinc and molybdenum use to a sustainable level, Proefschrift 'Managing Raw Materials Scarcity'*
6. International Molybdenum Association (IMO), 2015, [www.imoa.info](http://www.imoa.info), *Molybdenum uses, Molybdenum metal & alloys*
7. Nakajima K, Yokoyama K, Matsuno Y, Nagasaka T, *Substance flow analysis of molybdenum associated with iron and steel flow in Japanese economy. ISIJ International*, 2007, 47(3) 510-515
8. Blossom JW, 2002, *Molybdenum recycling in the United States in 1998, USGS, Open file report 02-165*
9. Meylan G, Reck BK, *The anthropogenic cycle of zinc: status quo and perspectives. Resour. Conserv. Recycl.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.006>
10. Henckens MLCM, Driessen P, Worrell E, 2015, *Towards a sustainable use of primary boron, Approach to a sustainable use of primary resources, Resources, Conservation and Recycling*, 2015; 103,9-18