

Materiaal Schaarste en ECN

Eindrapport van het Ideation Challenge project Re-Supply

Ton Veltkamp

Januari 2018

ECN-E--18-008



Verantwoording

Dit is het rapport van het ideation challenge project *Re-supply*, uitgevoerd tussen mei-december 2013. Re-supply werd gefinancierd door de EZS 2013. Projectnummer was 52497. Projectleider was A.C. Veltkamp en voor de inhoud van dit rapport is alleen de projectleider verantwoordelijk.

Abstract

This report summarizes the results of the ECN ideation challenge project Re-supply. It provides an overview of the literature on resource scarcity in relation to renewable energy technologies, highlighting rare earth elements and tellurium as instructive examples for wind energy and photovoltaic, respectively. Finally, possible implication for ECN's R&D program are given, and some more fundamental issues related to material scarcity and renewable energy are presented.

“Hoewel de informatie in dit rapport afkomstig is van betrouwbare bronnen en de nodige zorgvuldigheid is betracht bij de totstandkoming daarvan kan ECN geen aansprakelijkheid aanvaarden jegens de gebruiker voor fouten, onnauwkeurigheden en/of omissies, ongeacht de oorzaak daarvan, en voor schade als gevolg daarvan. Gebruik van de informatie in het rapport en beslissingen van de gebruiker gebaseerd daarop zijn voor rekening en risico van de gebruiker. In geen enkel geval zijn ECN, zijn bestuurders, directeuren en/of medewerkers aansprakelijk ten aanzien van indirecte, immateriële of gevolgschade met inbegrip van gederfde winst of inkomsten en verlies van contracten of orders.”

Inhoudsopgave

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Achtergrondinformatie materiaal schaarste	8
2.1	Wakker-worden	8
2.2	Historische trends in gebruik en prijzen van metalen	9
2.3	Schaarste: een relatief begrip	14
2.4	Depletie van mineralen	17
2.5	Rol van a-biotische grondstoffen in de Nederlandse economie	21
3	Oplossingsrichtingen materiaal schaarste	22
3.1	Voorraadvorming	22
3.2	Uitbreiding van de primaire productie van de basis materialen	23
3.3	Uitbreiding van de primaire productie in geval van bijproducten	27
3.4	Recycling	29
3.5	Vermindering materiaalverbruik	32
3.6	Substitutie	34
3.7	Beleidsmatige aspecten materiaal schaarste	35
4	Materiaal schaarste en hernieuwbare energie	37
5	Case studie zeldzame aardmetalen en wind turbines	40
5.1	Stand van zaken	40
5.2	Verhoging van primaire productie	43
5.3	Recycling	44
5.4	Substitutie	44
6	Case studie Tellurium en CdTe PV	46
6.1	Stand van zaken tellurium	46
6.2	Groeipotentie CdTe PV	47
6.3	Resterende vragen tellurium	50

7	Materiaal schaarste en relevantie voor ECN	51
7.1	Positie van ECN; naar een soft program?	51
7.2	Unit-trekkers & denktank	52
7.3	Aandachtspunten per unit	53
7.4	Nieuwe onderwerpen en expertises	54
7.5	Fundamentele vragen voor ECN	55
	Referenties	57



Samenvatting

In dit rapport worden de resultaten samengevat van het ideation challenge project *Re-supply*. Er wordt een overzicht gegeven van literatuur over materiaal schaarste in relatie tot de ontwikkeling van duurzame energie. Twee voorbeelden worden in meer detail behandeld: de rol van zeldzame aardmetalen in windturbine technologie, en tellurium (Te) als essentieel onderdeel voor grootschalige CdTe dunne-film film PV. Tenslotte worden mogelijke gevolgen voor de onderzoeksprogramma's van de ECN units gegeven, en worden enkele meer fundamentele stellingen gepresenteerd.

1

Inleiding

Van ECN mag deskundigheid worden verwacht op gebied van materiaal schaarste en duurzame energie technologieën. Om de kennis binnen ECN te vergroten is daarom in 2013 voorgesteld om het IEA projectvoorstel *Re-supply*, na aanpassing, uit te voeren als een inter-unit ideation challenge project [1].

Doel van *Re-Supply* is om voor ECN een samenvatting te geven van de inmiddels zeer omvangrijke literatuur op gebied van grondstoffen schaarste. Een nevendoel is om aan te geven welke mogelijke consequenties de grondstoffen problematiek kan hebben voor het ECN onderzoeksprogramma. We beperken ons hierbij tot de zogenaamde abiotische elementen, dat wil zeggen de metalen inclusief fosfor. Water, schone lucht, biomassa, grafiet, land, energie, voedsel en menselijk kapitaal e.d. worden, hoewel ook essentieel voor een duurzame energievoorziening niet behandeld. Deze laatste “grondstoffen” worden uitvoerig behandeld in een rapport van *Chatham House* [2].

2



Achtergrondinformatie materiaal schaarste

2.1 Wakker-worden

Het ECN colloquium van 2 december over grondstoffen schaarste had als enigszins provocerende titel *Materials depletion, another inconvenient truth* [3]. De subtitel geeft een gevoel van bedreiging en ongemak aan; we kunnen ons maar moeilijk voorstellen dat binnen voor menselijke begrippen afzienbare tijd elementen opraken.

Met de titel werd verder geprobeerd uit te drukken dat materiaal uitputting een maatschappelijk probleem is in dezelfde orde grootte en in een zelfde tijdspad als klimaatverandering. Je kunt je daarom afvragen waarom we, ook bij ECN, van dit onderwerp nog betrekkelijk weinig weten.

Een reden hiervoor is wellicht dat dit onderwerp nog maar kort op de internationale agenda staat. Afgezien van het rapport *The Limits to Growth* [4], dat overigens weinig inging op schaarste van minerale grondstoffen, zijn pas sinds ongeveer 2010 de eerste omvangrijke publicaties over schaarste van mineralen verschenen. Voorbeelden zijn het Chatham House, US Department of Energy, het Joint Research Centre, het Resnick Institute en, in Nederland, the Hague Centre for Strategic Studies en Clingendael [2, 5-9]. De plotselinge exportbeperking van zeldzame aardmetalen door China in 2008 en de daarop volgende prijsexplosie werkte hiervoor ongetwijfeld als een belangrijke *wake-up call*.

Misschien is er ook een cultuur van “eerst zien en dan geloven, het zal zo’n vaart niet lopen, de markt reguleert dit wel”. Van de scenario’s van *The Limits to Growth* is toch immers niets terecht gekomen? Een recente analyse van de *Limits to Growth* parameters (zoals uitputting van niet-hernieuwbare grondstoffen en de omvang van de industriële productie) toont echter aan dat het *business-as-usual* scenario over de jaren 1970-2000 in grote lijnen zeer goed is gevolgd [10].

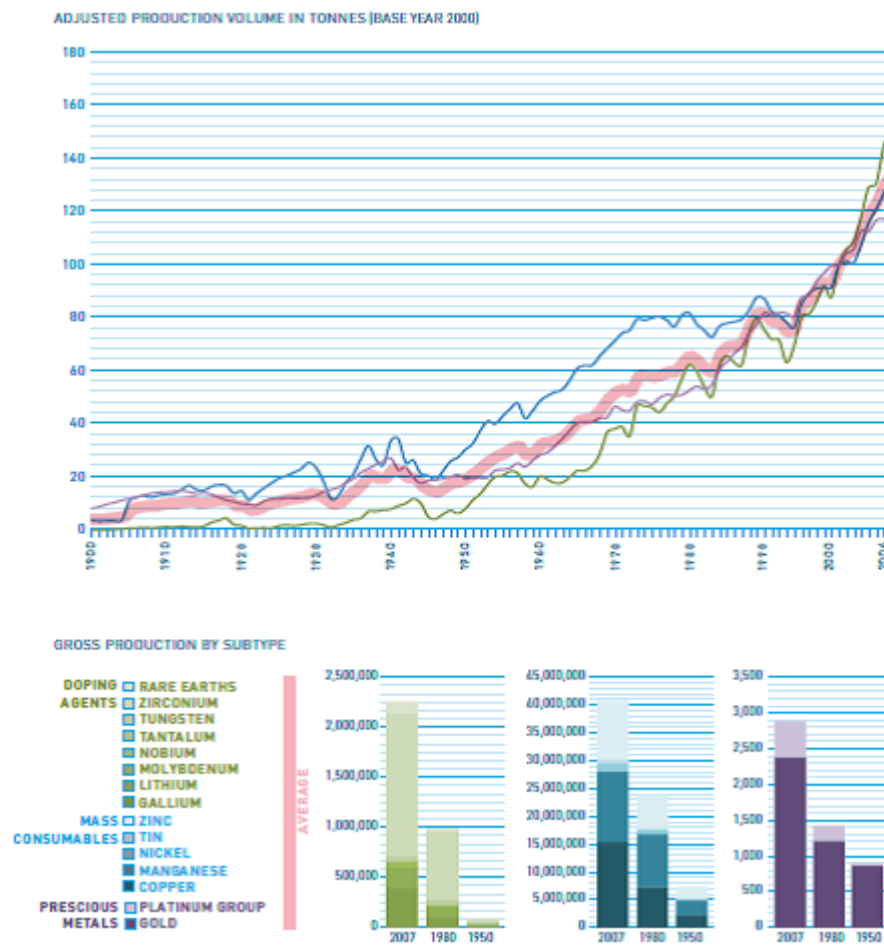
Materiaal schaarste lijkt in veel gevallen geen acuut probleem. Voor het nucleair afvalprobleem moet ver vooruit worden gedacht, in termijnen van honderden tot duizenden jaren veilige opslag. Misschien moeten we voor de duurzame energie voorziening, vanuit het oogpunt van materiaal schaarste, ook meer nadenken in termijnen van honderden jaren.

Hoe dan ook, het onderwerp lijkt ons te overvallen. In dit hoofdstuk meer achtergrondinformatie over materiaal schaarste.

2.2 Historische trends in gebruik en prijzen van metalen

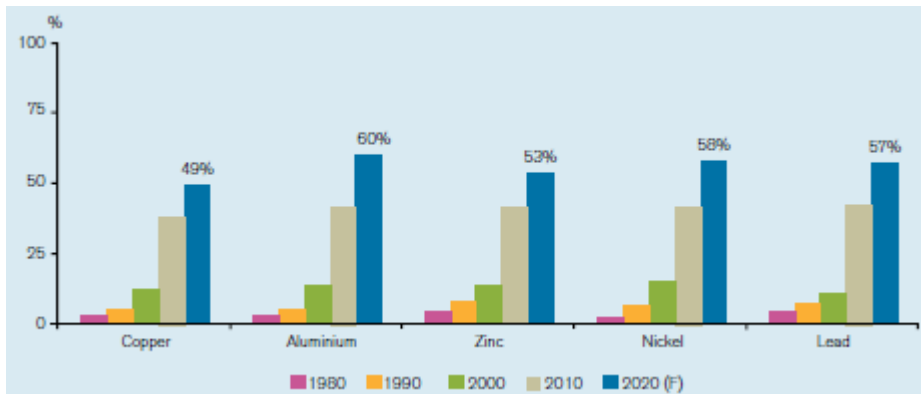
Figuur 1 toont de snelle toename in de wereldproductie van metalen [11]. Drie gangbare categorieën metalen worden getoond: *mass consumables* (Cu, Mn, Ni, Sn en Zn), *doping metals* (Ga, Li, Mo, Nb, Ta, W, Zr en de REE) en *precious metals* (de platinum group en Au). In andere rapporten worden de *mass consumables* en *doping metals* ook wel aangeduid als respectievelijk *base metals* en *technology-driven of rare metals*.

Figuur 1: Productie van basis, technologie- en precious metalen 1900-2006 (copyright The Hague Centre for Strategic Studies [11])



Het is niet erg waarschijnlijk dat de groeisput, zoals in figuur 1 is te zien snel zal afnemen. Daarvoor is o.a. het consumptie niveau van snel opkomende economieën zoals China, India en Brazilië nog in een te pril stadium. De OECD bijvoorbeeld schat dat de wereldvraag naar metalen tot 2030 zal blijven groeien met 5.1%/jaar, dus een toename tussen 2005-2030 met in totaal 250% [12]. Vooral China neemt sinds ongeveer 2000 het leeuwendeel van de toegenomen vraag voor haar rekening, en dit deel neemt nog steeds toe. Een treffende illustratie hiervan is gegeven in Figuur 2 voor enkele basis metalen. Voor deze metalen zal China in 2020 naar verwachting meer dan 50% van de wereldconsumptie voor haar rekening nemen.

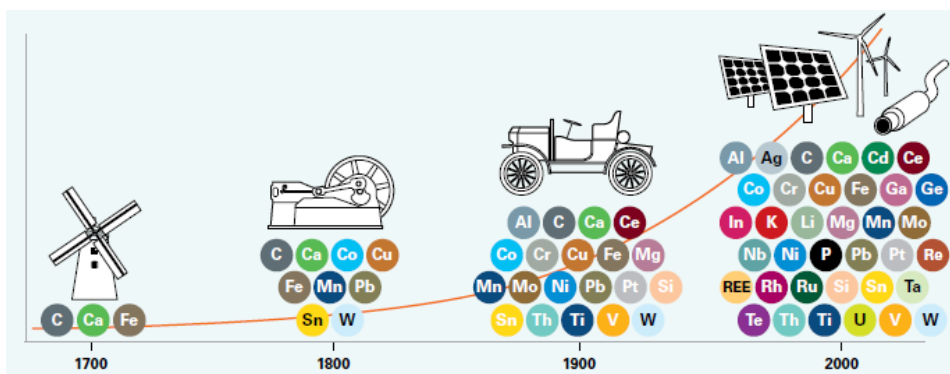
Figuur 2: Bijdrage van China in de wereldconsumptie van basis metalen Cu, Al, Zn, Ni en Pb, 1980-2020 (Copyright Chatham House)



Het valt verder op dat de mondiale groei van basis metalen in de periode 2000-2007 circa 33% was, maar voor de technologie metalen 46%. Daarbij komt dat veel technologie metalen slechts kunnen worden verkregen als bijproduct van de basis metalen. Voorbeelden zijn molybdeen (een bijproduct van koperproductie) en Ta en Nb (bijproducten van tinproductie). Onder andere door deze scheefgroei in de vraag naar basis- en technologie metalen, in combinatie met een sterk toenemende vraag van metalen ontstaat er schaarste op de grondstoffen markt en in het bijzonder voor de technologie metalen. Dit interessante mechanisme van vraag en aanbod van hoofd- en bijproducten wordt in hoofdstuk 6 verder toegelicht aan de hand van een specifiek voorbeeld, tellurium (Te).

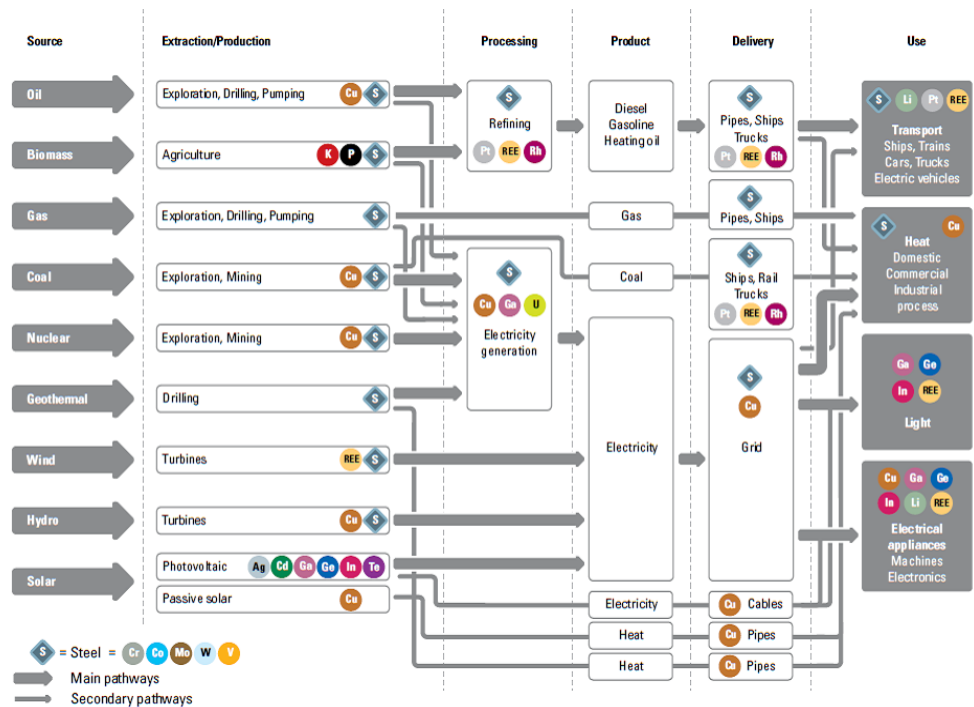
Figuur 3 is een aardige illustratie van de toename in soorten metalen die nodig zijn voor energie technologieën vanaf de industriële revolutie [13]. De toename in soorten metalen die nodig zijn voor energie opwekking en transport is fors, van ~10 soorten rond 1900 tot ~35 in 2000. Merk ook op dat de elementen P en K in figuur 3 zijn toegevoegd vanwege het belang voor bio-energie (als kunstmest).

Figuur 3: Toename in soorten metalen die nodig zijn voor energieopwekking (1700-2000) (copyright University of Augsburg).



Deze “nieuwe” technologie metalen worden toegepast in photovoltaïcs (Ag, Cd, Ga, Ge, In, Te), permanente magneten voor transport en windenergie (zeldzame aardmetalen zoals Nd, Dy, Sm en Tb), batterijen (Cd, Li, Ta), nucleair energie (U, In, Ta) en katalysatoren (Rh, Ru). Figuur 4 geeft hiervan een globaal overzicht.

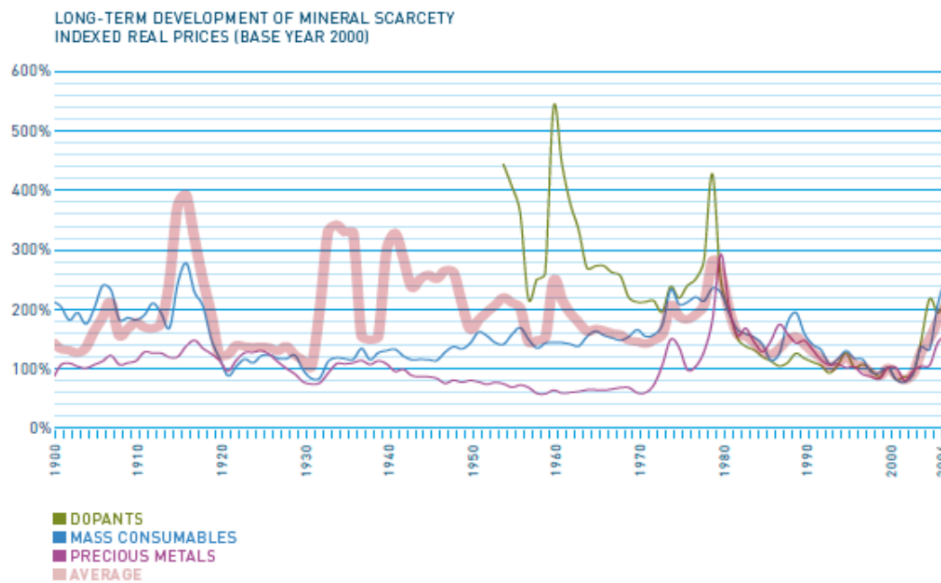
Figuur 4: Metaalgebruik in schone technologieën (copyright University of Augsburg [13])



Qua productie volume spelen deze metalen een rol sinds de jaren 1960-1970. Binnen een tijdsbestek van 30-40 jaar na eerste toepassingen spreken we nu dus al over op handen zijnde schaarste of zelfs uitputting van deze reserves.

Schaarste is echter van alle tijden en een economisch gegeven. Schaarste is een van de belangrijkste drijfveren voor gezonde economische ontwikkeling en innovatie. Schaarste gaat hand in hand met prijsfluctuaties en speculatie. Bekende historische voorbeelden van sterke prijsschommelingen op de metaalmarkt waren kobalt (gevoed door grootschalige politieke onrust in Congo in de 70-er jaren, een van de weinige landen waar kobalt wordt gewonnen), koper (speculatie door een enkele opkoper) en zilver en goud. Figuur 5 geeft de globale prijsontwikkeling van de 3 categorieën metalen tussen 1900-2006, gecorrigeerd voor inflatie *etc.*

Figuur 5: Lange termijn prijsfluctuaties metalen 1900-2006 (copyright The Hague Centre for Strategic Studies [11])

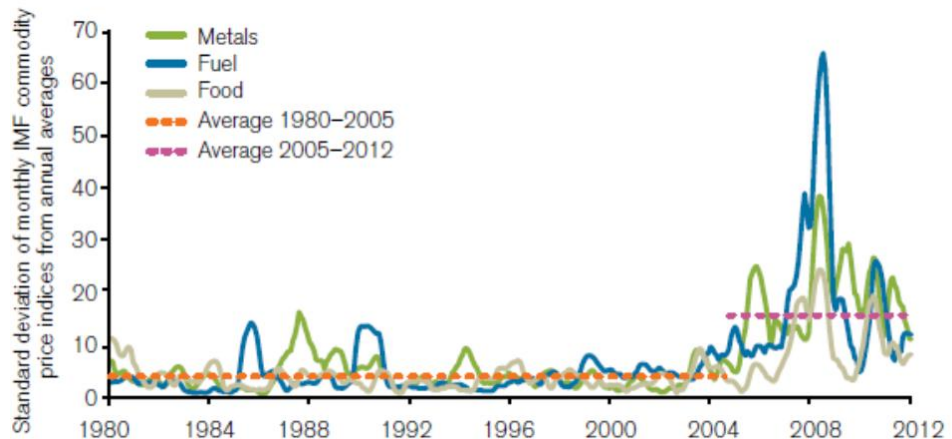


Grote prijsschommelingen hebben dus altijd plaatsgevonden, met relatief hoge prijzen vooral tijdens de 2 wereldoorlogen, en de oliecrisis in de jaren '70-'80. Sinds ongeveer de jaren '80 is echter een hele generatie gewend geraakt aan relatief lage en stabiele grondstof prijzen. Dit werd mede veroorzaakt door het einde van de koude oorlog, globalisering van de grondstofmarkten en optimisme over technologische vooruitgang. We baseerden ons meer en meer op goedkope grondstoffen uit andere werelddelen. Deze optimistische situatie betekende dan ook vaak het definitieve einde van kleinschalige, inefficiënte mijnbouw activiteiten, vooral in de USA en Europa. Mijnbouw deskundigen en metallurgen zijn in de USA en Europa schaars geworden. Dit impliceert o.a. dat we niet snel en eenvoudig zelfvoorzienend zullen kunnen worden op dit terrein, mocht dit nodig zijn.

Een trendbreuk in prijsontwikkeling van metalen treedt op sinds 2000; in slechts 4 jaar tijd stijgt het gemiddelde prijspeil met 200%. Maar ook dit is in het verdere verleden vaker vertoont. Door de mondiale financiële crisis daalt het gemiddelde prijsniveau inmiddels tot een redelijk stabiel, zij het nog steeds een relatief hoog niveau.

Deze trends worden bevestigd voor de jaren 1980-2012 (IMF); relatief stabiele prijsniveaus tot 2002; alle prijzen, ook van voedsel en brandstof vertonen ongeveer dezelfde trends (en lijken dus niet in eerste instantie gerelateerd aan schaarste maar zelfs experts hebben geen eensluidende verklaring voor de zeer grote schommelingen in de afgelopen 10 jaar).

Figuur 6: Relatieve prijsniveaus van commodities inclusief metalen, 1980-2012 (copyright Chatham House [2])



Een meer recent voorbeeld, en van directe relevantie voor het programma van ECN-Zon, was de prijsexplosie rond 2008 van *electronic grade polysilicon*, met prijzen van 25 \$/kg in 2003 tot meer dan 500 \$/kg op de *spot prices* markt. Deze situatie ontstond door de onverwacht grote groei van PV t.o.v. een redelijk constante vraag naar het materiaal vanuit de halfgeleider industrie. Pas door de zeer acute schaarste en de daarbij gepaard gaande prijsexplosie werd het financieel aantrekkelijker om de *polysilicon* productie grootschalig uit te bouwen als basis voor een zeer snel groeiende PV markt. Duidelijk is dat er geen intrinsieke silicium schaarste bestaat; zuiver kwarts is als grondstof voor de siliciumproductie zeer ruim en goedkoop voorradig op vele plekken wereldwijd. De *polysilicon* prijs is inmiddels weer terug rondom het oude prijspeil van 25 \$/kg. Tegelijk was de hoge *polysilicon* prijs een belangrijke drijfveer voor innovaties van de kristallijn silicium PV technologie en voor de opkomst van alternatieve dunne-film PV technologieën zoals CuInGaSS (CIGS).

2.3 Schaarste: een relatief begrip

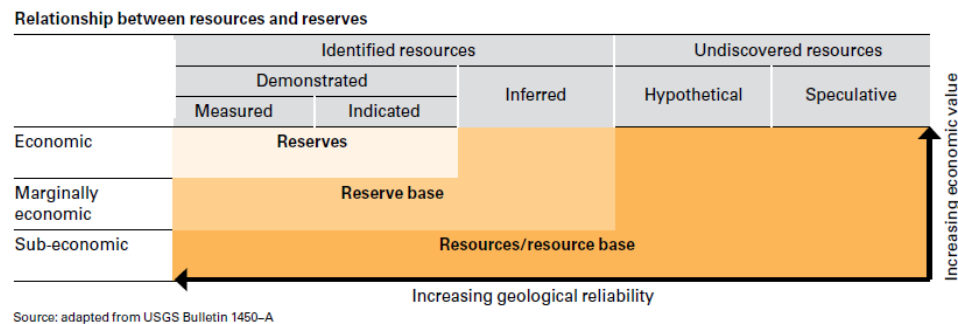
Er zijn vele aspecten aan het onderzoek naar materiaal schaarste. Het Clingendael rapport geeft een zeer lezenswaardige kritische beschouwing op basis van de resultaten van het EU-Polinares project [9]. De belangrijkste factoren die bij de beschikbaarheid van mineralen voor de wereldmarkt een rol spelen zijn:

- A. de intrinsieke geologische beschikbaarheid van mineralen (als reserves en als resources)
- B. geografische verdeling van mineralen en de invloed van politieke factoren op beschikbaarheid
- C. technologische, milieutechnische en economische winbaarheid van mineralen

Veruit de meest geciteerde bron voor schattingen van reserves van metalen is de USGS [14]. Reserves worden door de USGS gedefinieerd als aangetoonde hoeveelheden die

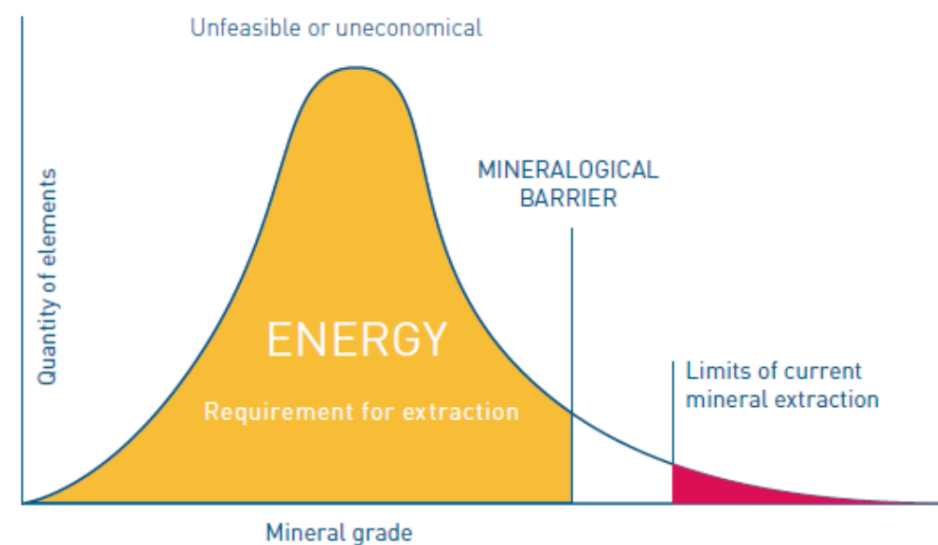
met de huidige stand der techniek economisch rendabel kan worden gewonnen. De “resource base” is vele malen groter dan de reserves, (figuur 7). In de bijlage staat een overzicht van de belangrijkste, algemeen geaccepteerde definities van reserves, resources e.d.

Figuur 7: Schema geologische reserves en resources (naar USGS)



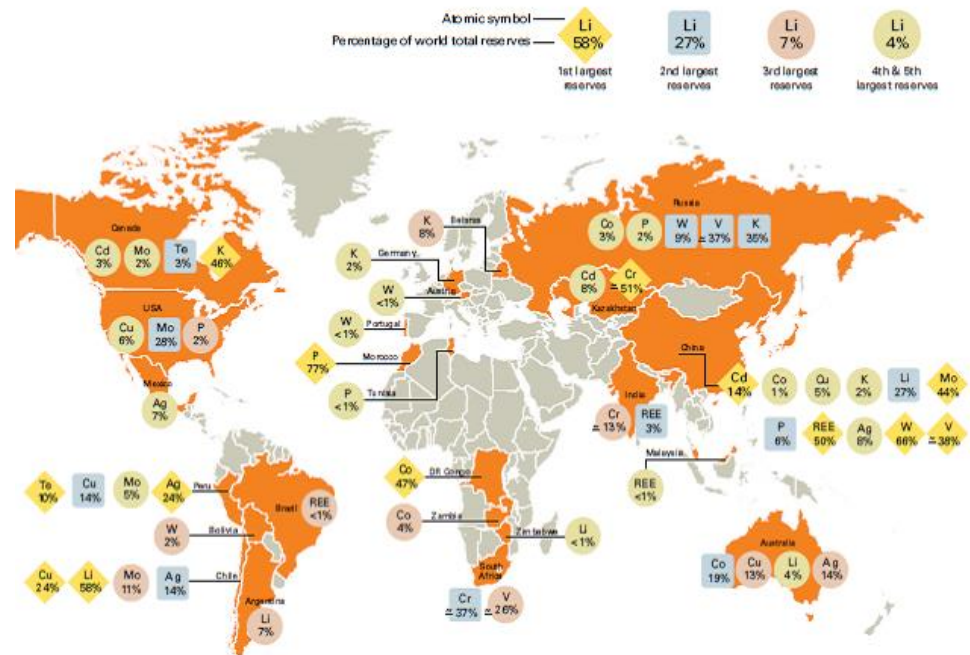
Voor de meeste metalen geldt helaas dat veruit de grootste metaalfractie onder de zogenaamde mineralogische barrière aanwezig is. Dit is een praktisch gesproken ontoegankelijk reservoir van zeer lage concentraties [15]. Dit geldt voor de meeste gesteentes, zand, klei en zeewater (figuur 8). Voor de winning van technologische metalen uit deze reservoirs, voor zover dit al technisch mogelijk zou zijn, zouden excessieve hoeveelheden energie, water en chemicaliën nodig zijn, en extreem grote afvalbergen doen ontstaan. Diepzeewinning van b.v. mangaanknollen staat qua onderzoeksinspanning sterk in de belangstelling maar wordt praktisch gesproken vrijwel nog niet toegepast [16].

Figuur 8: Typische verdeling van metalen in de aardkorst (copyright The Hague Centre for Strategic Studies [11] naar Skinner et al., [15]).

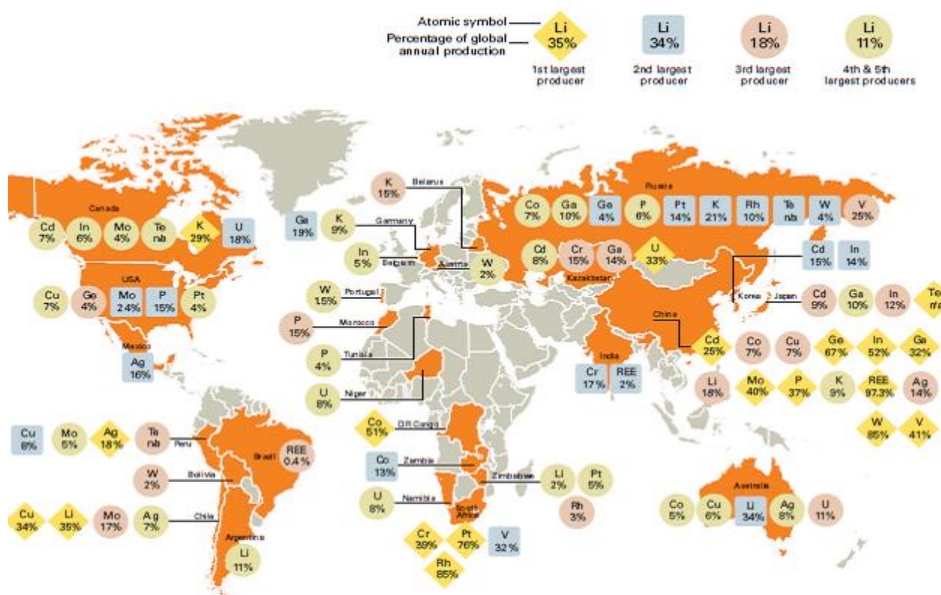


De reserves en ook de productie van mineralen zijn voor veel metalen sterk geografisch geconcentreerd (figuren 9 en 10). Zo beschikt China over 50% van de wereldreserves zeldzame aardmetalen, en 66% voor Wolfram, 44% voor Molybdeen en 38% voor Vanadium. Congo beschikt over 47% van de wereldreserves Cobalt, Chili over 50% voor lithium en Canada over 56% van de kalium reserves (als Potash).

Figuur 9: Globale verdeling van mineraalreserves (copyright University of Augsburg [13])



Figuur 10: Globale verdeling metaalproductie (copyright University of Augsburg [13])



Sommige metalen komen voornamelijk uit conflict gebieden, vandaar de generieke bijnaam *conflict minerals*. (Co, Ta, Sn). De mijnbouw in deze gebieden is vaak onderdeel van regionale politieke instabiele situaties en burgeroorlogen. Daarom zijn er veel initiatieven die het gebruik van mineralen uit dergelijke gebieden probeert te reguleren via certificaten en dergelijke. Vooral de westerse landen en industrie proberen op deze wijze bij te dragen aan oplossing van de problemen, wat uiteraard zeer lastig is, zeker wanneer een regio over zeer grote reserves beschikt. Het meest bekende voorbeeld van regulering is de Dodd-Frank Act (section 1502 conflict minerals). Daarnaast bestaan voor het Great Lake gebied in Afrika veel andere initiatieven met fraaie namen: Public-Private Alliance for Responsible Minerals Trade, Conflict-Free Tin Initiative, Conflict-Free Smelter Program, Solutions of Hope enz. [17]. Het hoort meer en meer bij het CSR beleid van grote bedrijven om in de volledige *supply chain* van grondstoffen rekening te houden met deze aspecten.

2.4 Depletie van mineralen

Een ding is duidelijk: minerale voorraden op aarde zijn intrinsiek beperkt en zullen in principe geologisch en economisch gezien op enige termijn “op” raken. Daarna zijn kunnen we misschien onze economie grotendeels baseren op *recycled* materiaal (secundaire productie, circulaire economie).

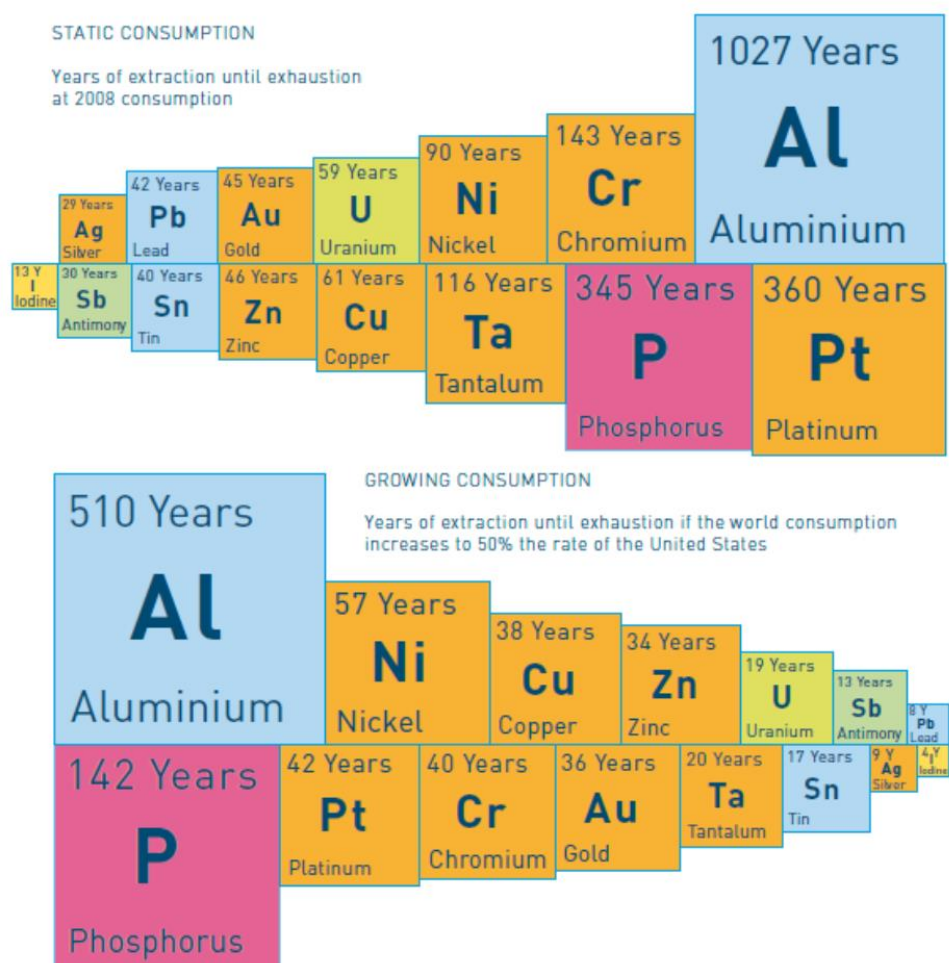
Door diverse instanties worden zogenaamde metaal depletie indices berekend. Dit gebeurt uiteraard onder een zeer groot aantal aannames en rekenmethodes, en de uitkomsten kunnen daarom niet veel meer geven dan een globaal beeld, een indicatie

van waar mogelijk problemen ontstaan. De 2 grootste onzekerheden betreffen de reserves en de groei van consumptie. Reserves bijvoorbeeld kunnen wijzigen door de ontdekking van nieuwe winbare mineraalvoorraden, meer efficiënte mijnbouw of betere opwerkingstechnologie (*refining*).

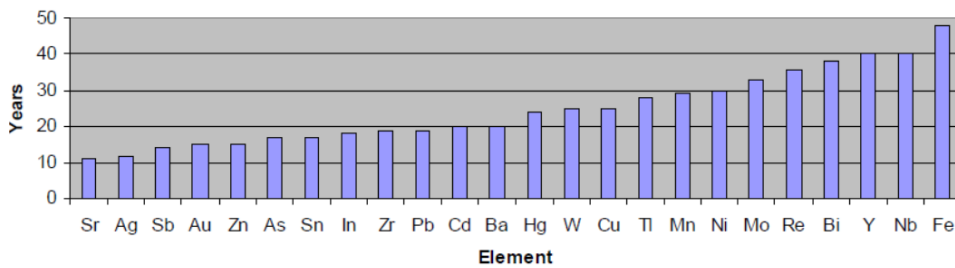
Men berekent statische of dynamische depletie. In het eerste geval wordt de geschatte metaal reserve (meestal op basis van USGS data) vergeleken met de jaarproductie in een jaar. In geval van dynamische depletie wordt de jaarproductie en/of de reserves geïndiceerd.

Figuur 11 geeft voor een groot aantal elementen representatieve uitkomsten van statische en dynamische depletie indices. Voor de berekening is hierbij uitgegaan van een groei van de wereldvraag tot 50% van de vraag van de USA. In Figuur 12 is een vergelijkbare soort berekening getoond, maar voor meer elementen en met als basis een jaarlijkse groei van 2% van de primaire metaalproductie. De groei is overigens de laatste jaren voor elementen significant groter dan 2% (figuur 12 in ref. [2]).

Figuur 11: Statische en dynamische depletie indices van metalen, gebaseerd op 2008 consumptiegegevens, of een groei in consumptie (copyright The Hague Centre for Strategic Studies [11])



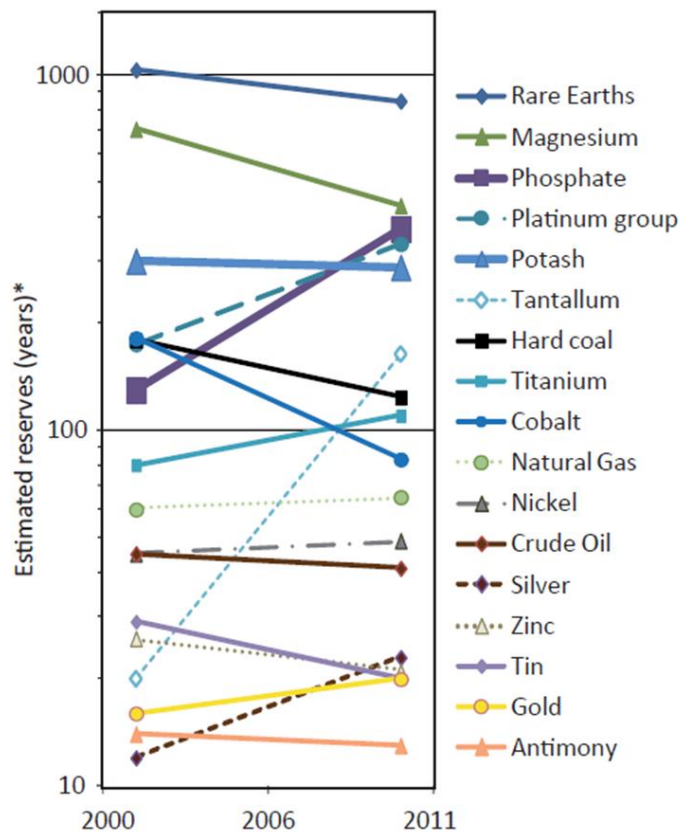
Figuur 12: Resterend aantal jaren bij een 2% jaarlijkse groei van de primaire productie, gebaseerd op de bekende reserves van mineralen [18]



Uit de figuren 11 en 12 wordt duidelijk dat veel elementen binnen een termijn van ~50 jaar “op” lijken te raken. Misschien nog eerder wanneer nieuwe technologieën op de markt komen die een extra vraag creëren.

De vraag die bij deze analyses moet worden gesteld is hoe de schattingen van reserves over de afgelopen jaren zijn gewijzigd. Hoeveel gaat eraf, hoeveel komt erbij? Een afname van de geschatte reserves over de jaren zou een indicatie kunnen zijn voor werkelijke omvang van het probleem, of voor het aanpassingsvermogen van de mens om nieuwe bronnen te vinden. Helaas zijn hierover voor vrijwel alle elementen feitelijk geen betrouwbare gegevens. Een uitzondering vormt koper, waarvoor een lichte trend zichtbaar lijkt; de statische depletie index voor koper neemt af van 60-40 jaar (volgens schattingen in de jaren 1940-1980) tot 30-35 jaar (voor schattingen uit de jaren 1990-2010) [19]. Dit is misschien een voorzichtige eerste en enigszins betrouwbare indicatie dat mineraal reserves inderdaad aan het afnemen zijn. Ook figuur 13 suggereert voor veel elementen een verkleining van de depletie index voor 2010 in vergelijking tot de schattingen uit 2000 [20].

Figuur 13: Verandering in de schattingen van depletie indices tussen 2000 en 2010 (Scholz en Wellmer, USGS 2013) [20]



Tabel 1 geeft verder aan dat, ondanks forse groei in de geschatte reserves voor bijvoorbeeld Fe, K, Al, Cu, Zn, Ni en zeldzame aarden de depletie index voor de meeste metalen tussen 2000 en 2010 ongeveer gelijk blijft of zelfs afneemt door de zeer sterke groei van de wereldvraag.

Tabel 1: Mijnbouw en metaalreserves 2000-2010 (USGS; copyright Chatham House, [2])

	Mine production			Reserves			Reserve ranges	
	2000	2010	Growth (%)	2000	2010	Growth (%)	2000	2010
Iron ore	1,060,000	2,590,000	144	140,000,000	170,000,000	21	132	66
Potash	25,300	33,700	33	8,400,000	9,500,000	13	332	281
Bauxite	135,000	209,000	55	24,000,000	29,000,000	21	178	139
Copper	13,200	15,900	20	340,000	690,000	103	26	43
Zinc	8,730	12,000	37	190,000	250,000	32	22	21
Nickel	1,250	1,590	27	58,000	80,000	38	46	50
REEs	84	133	59	100000	110000	10	1198	827

Bij de interpretatie van depletie indices speelt echter nog een ander aspect een belangrijke rol: Veelal wordt namelijk aangenomen dat een depletie index van tenminste ~30 jaar voldoende is voor een gezonde vraag- en aanbod markt. Voor mineralen met een depletie index > ~30 jaar geldt dat het zoeken naar nieuwe bronnen feitelijk een onnodige, overbodige en financieel risicovolle onderneming is. Voor depletie indices < ~30 jaar wordt de vraag/aanbod situatie meer kritisch en zal men de primaire productie moeten zien te vergroten, wat dan waarschijnlijk ook economisch

meer interessant en verantwoord zal zijn. Een recent voorbeeld hiervan zijn Nd en Dy (de zeldzame aardmetalen, zie hoofdstuk 5). Met andere woorden, de bewezen reserves en depletie indices zijn maar vrij matige parameters om toekomstige uitputting van metalen te begrijpen of zelfs maar te voorspellen.

2.5 Rol van a-biotische grondstoffen in de Nederlandse economie

Nederland verwerkt zeer weinig a-biotische grondstoffen. Na sluiting in 2013 van de Thermphos fabriek in Vlissingen, waar fosfor producten uit erts werden gemaakt is alleen Tata Steel IJmuiden als grote erts verwerkende industrie nog over.

Halffabricaten spelen natuurlijk wel een belangrijke rol in de Nederlandse economie. Een gedetailleerd overzicht over de rol van a-biotische materialen in de Nederlandse economie wordt gegeven door HCSS, waarin specifiek wordt ingegaan op de elementen Nd, In, Cu en P [21]. Hier kan nog worden toegevoegd dat Nederland erg sterk is in instrumentontwikkeling, bijvoorbeeld voor de productie van innovatieve dunne film zonnecellen en coatings (CdTe, GaAs, CIGS). Door schaarste van de grondstoffen kan er, via deze eindproducten natuurlijk een behoorlijke impact zijn voor de Nederlandse instrumentbouwers. Nederland heeft ook veel kennis op gebied van afvalverwerking. Deze kennis zou kunnen worden ingezet om afval meer als grondstof voor schaarse metalen te zien.

3

Oplossingsrichtingen materiaal schaarste

Ondanks de grote onzekerheden rondom materiaal schaarste is het nu al dringend nodig om oplossingen te ontwikkelen. Nationale overheden, de EU-27 en industriële brancheorganisaties zijn op dit gebied sinds enkele jaren daarom zeer actief geworden. Oplossingsrichtingen voor materiaal schaarste zijn te vinden aan de aanbodzijde en aan de vraagzijde. Daarbij zijn er vele beleidsmatige aspecten voor nationale overheden en de EU.

3.1 Voorraadvorming

Voorraadvorming en lange-termijn leveringscontracten worden in het algemeen niet beschouwd als een oplossing voor materiaal schaarste. Er kleven zeer grote financiële risico's aan de opslag van grote voorraden metalen of mineralen, afgezien van het feit dat deze materialen ook in voldoende mate verkrijgbaar moeten voor opslag. Voorraadvorming verstoort een vrije handelsmarkt. Om deze redenen vindt voorraadvorming slecht op beperkte schaal plaats, en meestal onder regie van centrale overheden om strategische/militaire redenen. Een bekend voorbeeld is helium waarvan de Amerikaanse regering in het verleden grote hoeveelheden heeft opgeslagen, maar nu gecontroleerd op de vrije markt brengt.

3.2 Uitbreiding van de primaire productie van de basis materialen

Met primaire productie wordt bedoeld productie van metalen uit de ertsen. Duidelijk wordt dat primaire productie van de meeste metalen, ook de technologische metalen, niet eenvoudig kan worden uitgebreid zonder enorme investeringen, energie- en waterconsumptie en vaak met grote milieu effecten.

Voor de meeste metalen zijn de wereldvoorraden vrijwel onuitputtelijk aanwezig in de aardkorst. Hierbij moet direct worden opgemerkt dat in vrijwel alle gevallen de grootste metaalfractie helaas beneden de zogenaamde mineralogische barrière aanwezig is, en praktisch gesproken hieruit niet kan worden geïsoleerd (figuur 9). Hiervoor zouden excessieve hoeveelheden energie, water en chemicaliën noodzakelijk zijn, nog afgezien van enorme volumina aan afval dat zou worden geproduceerd. Ook de concentraties in zeewater zijn voor veruit de meeste elementen veel te laag (< 10 ppb) om economisch rendabel te isoleren, voor zover dit technologisch al mogelijk zou zijn (Tabel 2).

Tabel 2: Gemiddelde zeewater samenstelling in mg/kg (Parts Per Million, PPM) bij 3.5% saliniteit

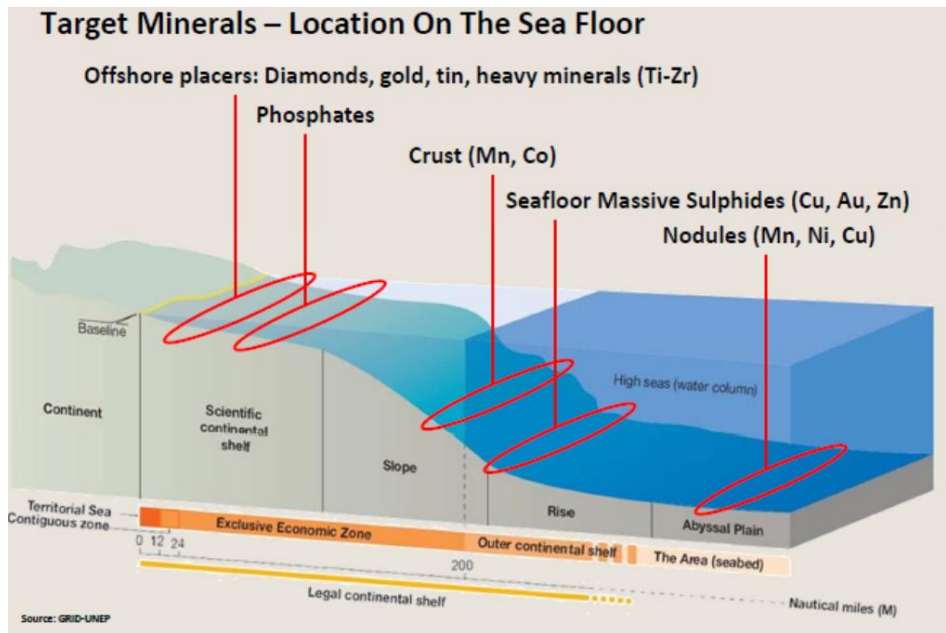
Element	At.Weight	PPM	Element	At.Weight	PPM
Hydrogen H ₂ O	1.00797	110,000	Molybdenum Mo	0.09594	0.01
Oxygen H ₂ O	15.9994	883,000	Ruthenium Ru	101.07	0.0000007
Sodium NaCl	22.9898	10,800	Rhodium Rh	102.905	.
Chlorine NaCl	35.453	19,400	Palladium Pd	106.4	.
Magnesium Mg	24.312	1,290	Argentum (silver) Ag	107.870	0.00028
Sulfur S	32.064	904	Cadmium Cd	112.4	0.00011
Potassium K	39.102	392	Indium In	114.82	.
Calcium Ca	40.08	411	Stannum (tin) Sn	118.69	0.00081
Bromine Br	79.909	67.3	Antimony Sb	121.75	0.00033
Helium He	4.0026	0.0000072	Tellurium Te	127.6	.
Lithium Li	6.939	0.170	Iodine I	166.904	0.064
Beryllium Be	9.0133	0.0000006	Xenon Xe	131.30	0.000047
Boron B	10.811	4.450	Cesium Cs	132.905	0.0003
Carbon C	12.011	28.0	Barium Ba	137.34	0.021
Nitrogen ion	14.007	15.5	Lanthanum La	138.91	0.0000029
Fluorine F	18.998	13	Cerium Ce	140.12	0.0000012
Neon Ne	20.183	0.00012	Praesodymium Pr	140.907	0.00000064
Aluminium Al	26.982	0.001	Neodymium Nd	144.24	0.0000028
Silicon Si	28.086	2.9	Samarium Sm	150.35	0.00000045
Phosphorus P	30.974	0.088	Europium Eu	151.96	0.0000013
Argon Ar	39.948	0.450	Gadolinium Gd	157.25	0.0000007
Scandium Sc	44.956	<0.000004	Terbium Tb	158.924	0.00000014
Titanium Ti	47.90	0.001	Dysprosium Dy	162.50	0.00000091
Vanadium V	50.942	0.0019	Holmium Ho	164.930	0.00000022
Chromium Cr	51.996	0.0002	Erbium Er	167.26	0.00000087
Manganese Mn	54.938	0.0004	Thulium Tm	168.934	0.00000017
Ferrum (Iron) Fe	55.847	0.0034	Ytterbium Yb	173.04	0.00000082
Cobalt Co	58.933	0.00039	Lutetium Lu	174.97	0.00000015
Nickel Ni	58.71	0.0066	Hafnium Hf	178.49	<0.000008

Copper Cu	63.54	0.0009	Tantalum Ta	180.948	<0.0000025
Zinc Zn	65.37	0.005	Tungsten W	183.85	<0.000001
Gallium Ga	69.72	0.00003	Rhenium Re	186.2	0.0000084
Germanium Ge	72.59	0.00006	Osmium Os	190.2	.
Arsenic As	74.922	0.0026	Iridium Ir	192.2	.
Selenium Se	78.96	0.0009	Platinum Pt	195.09	.
Krypton Kr	83.80	0.00021	Aurum (gold) Au	196.967	0.000011
Rubidium Rb	85.47	0.120	Mercury Hg	200.59	0.00015
Strontium Sr	87.62	8.1	Thallium Tl	204.37	.
Yttrium Y	88.905	0.000013	Lead Pb	207.19	0.00003
Zirconium Zr	91.22	0.000026	Bismuth Bi	208.980	0.00002
Niobium Nb	92.906	0.000015	Thorium Th	232.04	0.0000004
			Uranium U	238.03	0.0033
			Plutonimu Pu	(244)	.

Voor diepe mijnbouw en extra-terrestrische winning zijn onvoldoende kapitaal, energie en zeer waarschijnlijk ook onvoldoende technologie metalen beschikbaar om dit praktisch mogelijk te maken (dit is in wezen dus een kip-ei probleem).

We zijn voor uitbreiding van primaire productie dus volledig afhankelijk van de beschikbaarheid aan ("opschepbare") mineralen en ertsen, waar de metalen in verhoogde concentraties aanwezig zijn. Sommige ertsen kunnen wellicht ook op de diepzeebodem worden gevonden, maar zee-winning is nog in een zeer exploratief stadium. Kansen zijn er in kustgebieden door landerosie voor o.a. Ti, zeldzame aarden, Cr, Ba, Zr, Sn, Au, Pt, diamant en fosfor. Van de diepzeebodem kunnen *ferromanganese* en *manganese nodules* worden gewonnen van de zeebodem voor ondermeer Cu, Ni, Co, Mn, Zn, Pb en Ag. Dit bevindt zich nog in een zeer experimenteel stadium. Interessant is dat dit in feite een continue bron van metalen zou kunnen vormen, anders dan reguliere mijnbouw, ware het niet dat de aangroei-snelheden van deze diepzee-nodules slechts op geologische tijdschaal plaatsvindt. Tot nog toe werd aangenomen dat winning van de diepzee-nodules economisch niet rendabel zou kunnen zijn. Maar dat werd ook lang beweerd voor *offshore* oliewinning, en dit laatste vindt nu routinematig plaats op dieptes > 1 km. Zorgen zijn er wel over de mogelijk schadelijke gevolgen voor het diepzeemilieu; deze gevolgen moeten eerlijkheidshalve worden afgewogen tegen de milieugevolgen bij dag-mijnbouw. Dan zou diepzee winning misschien gunstiger uitpakken.

Figuur 14: Seafloor & Ocean mining [22]

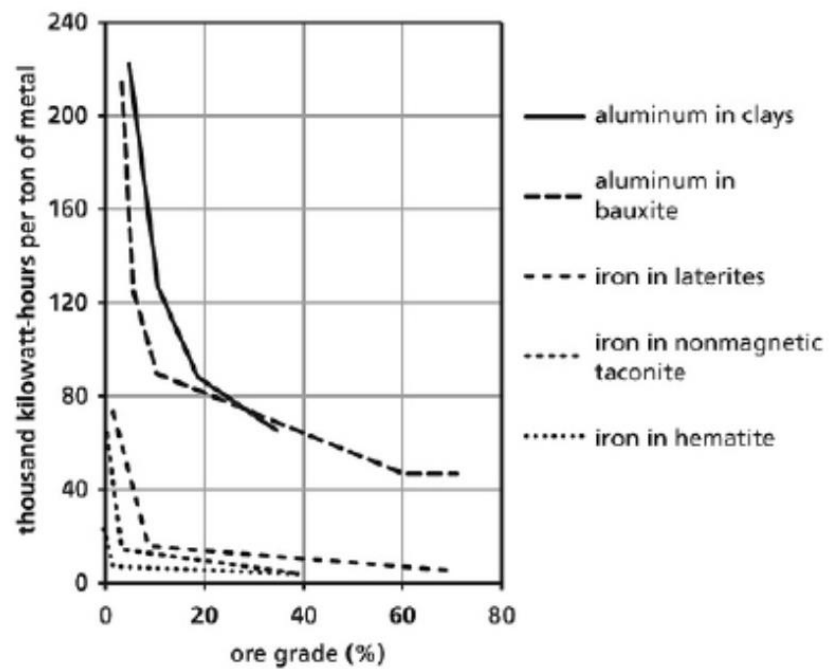


Waarschijnlijk is koper (Cu) het best bestudeerde element v.w.b. wereldreserves en toekomstig verbruik. Om een en ander in een, overigens behoorlijk verontrustend, perspectief te plaatsen de volgende gegevens: Cu-wereldreserves werden door de USGS in 2001 geschat op 340 Mt. In 1995 bedroeg de vraag 10.5 Mt, dus de Cu-reserves zijn dan voldoende voor ~34 jaren op basis van de 1995 vraag. Een realistische schatting voor de Cu-vraag in 2020 is 24 Mt. Als nu de Cu-reserves in 2020 voldoende moeten zijn voor opnieuw 30 jaren vraag (en de 30 jaren termijn wordt zoals eerder gezegd algemeen aangenomen als voldoende lang voor een ontspannen vraag/aanbod marktwerking), dan betekent dit dat de bewezen en economisch winbare Cu-reserves wereldwijd moeten worden uitgebreid tot ~1100 Mt in 2020. Momenteel komt veruit het meeste koper uit slechts 5 zeer grote Cu-mijnen wereldwijd. Deze 5 mijnen zijn gevonden en in exploratie genomen gedurende een zoekperiode van ~100 jaren. Deskundigen verwachten daarom niet dat dergelijke hoogkwalitatieve Cu-mijnen in de toekomst nog zullen worden “ontdekt”, die zouden namelijk met de huidige technische middelen en economische noodzaak al lang gevonden moeten zijn. Vergelijk deze situatie met de ontdekkingen van grootschalige oliereserves of de gasvelden in Nederland; de ontdekking van de zeer grote olievelden en gasvelden is verleden tijd, en men voorspelt daarom al lage tijd uitputting van de olie voorraden (en gas in Nederland).

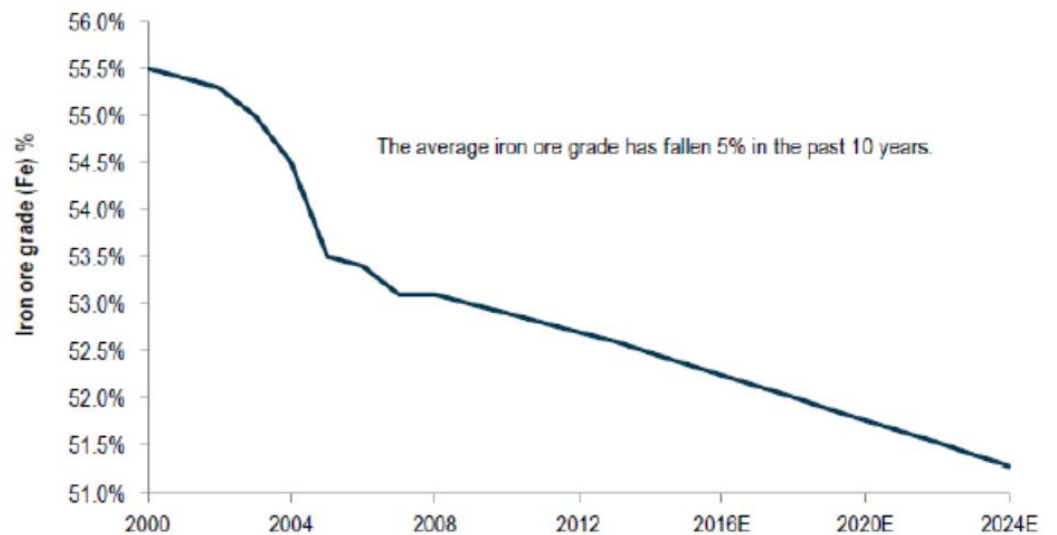
Mijnbouw is een zeer kapitaal-, energie en water intensief proces. Geschat wordt dat 7% van de huidige wereldenergievraag nodig is voor mijnbouw en *refining* van ertsen. Deze energievraag zal in de toekomst toenemen. De metaalgehalten in ertsen nemen over de jaren geleidelijk af, zodat meer volume erts moet worden opgegraven en verwerkt. Bovendien liggen de nieuwe mijnbouw gebieden op zeer afgelegen locaties (zoals Groenland) en liggen de ertslagen dieper in de bodem. Het *low hanging fruit* begint op te raken. Figuur 15 toont de snelle toename in energieverbruik als functie van verminderde Al- en Fe-concentraties in de ertsen. De staalindustrie houdt rekening met

significante vermindering van het Fe-gehalte in de ertsen in de komende 10 jaar (figuur 16 en 17).

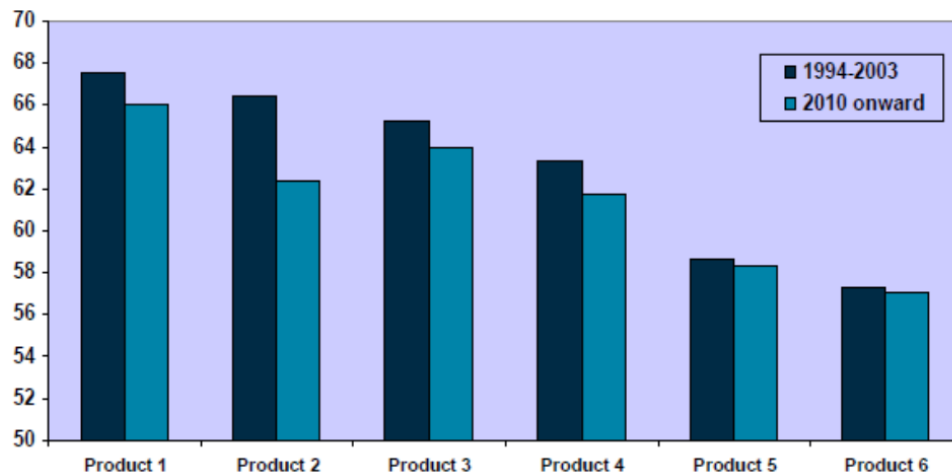
Figuur 15: Energieverbruik voor de winning van Fe en Al als functie van het gehalte in de ertsen [18]



Figuur 16: Gemiddelde Fe-gehalte in ijzererts 2000-2024 (bron: Tata Steel 2013)



Figuur 17: Afname van gemiddelde Fe gehalte in zes representatieve Fe-ertsen. De afname is groter voor de hogere gehalte ertsen (bron: Tata Steel 2013)



1% drop in Fe content leads to:

200mt additional seaborne freight between 2012-20

Additional metallurgical coal

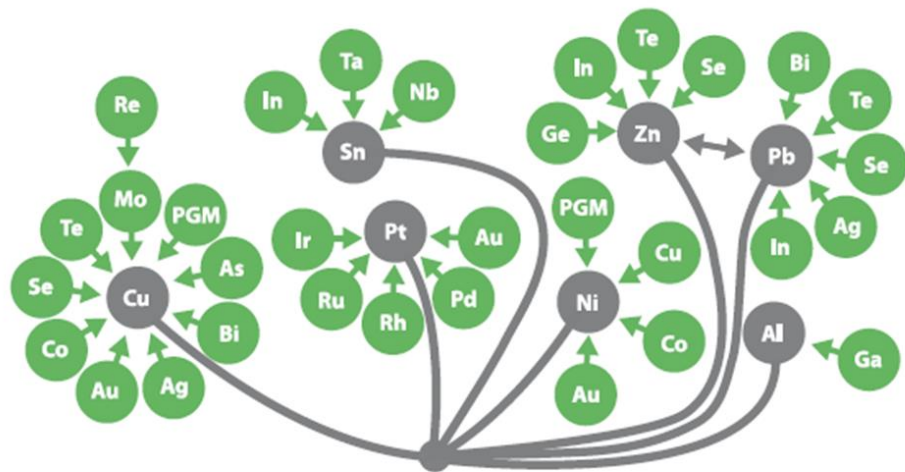
Higher CO₂ emission.

3.3 Uitbreiding van de primaire productie in geval van bijproducten

Een ander fundamenteel aspect is gelegen in het feit dat veel technologische metalen vooral worden verkregen als bijproduct van de basis metalen. Bekende voorbeelden zijn Te, Ga en In als bijproduct van respectievelijk Cu, Al en Zn (figuur 18). In de praktijk betekent dit dat productie van de bijproducten niet sneller kan groeien dan de primaire productie van de basis metalen, tenzij er grote hoeveelheden historische restproducten beschikbaar zouden zijn uit de *refining* van de hoofdproducten (*tailings, dust, slags* etc). De jaarlijkse groeipercentages van de hoofdproducten zijn in het algemeen 2-5%. Een zeer leerzaam en relevant voorbeeld is tellurium (uitgewerkt in hoofdstuk 6).

Figuur 18: Overzicht bijproducten bij de winning van Cu, Sn, Pt, Ni, Zn, Pb en Al [23]

Figure 3: Technology Metals Produced as Byproducts of Base Metals



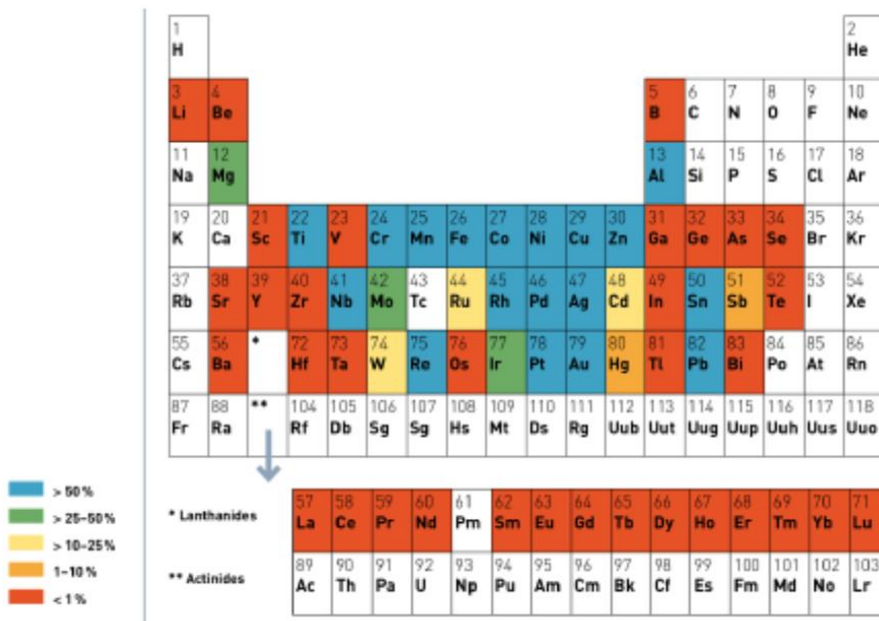
Source: Hageluken and Meskers, 2010 (21)

Zeldzame aarden worden vaak gewonnen uit uraan-houdende erts. Dit geldt bijvoorbeeld voor de voorraden in Groenland. Dit houdt in dat mijnbouw hiervan gepaard gaat met uraan winning, wat op haar beurt afhankelijk zal zijn van ontwikkelingen in de nucleaire energie sector. Zo zijn toepassingen, zoals in dit geval wind- en kernenergie, via de mijnbouw soms met elkaar verbonden. Het is een uitdaging om de radionucliden problematiek die ontstaat bij deze uranium winning goed te beheersen. Het zal daarom ook niet eenvoudig zijn om de benodigde vergunning voor winning van zeldzame aardmetalen in Groenland op korte termijn te verkrijgen.

3.4 Recycling

Met de sterke groei in de primaire productie van metalen en de opgeslagen voorraden metalen in de *urban mine* nemen de mogelijkheden voor secundaire productie (recycling) van metalen ook sterk toe. Een gezaghebbende publicatie op dit gebied is van UNEP [24]. Er zijn veel mogelijke definities van recycling. Belangrijk is het onderscheid tussen old-scrap recycling (tijdens of direct na het productie), en de *end-of-life (EoL) functional recycling*. In het laatste geval worden metalen teruggewonnen voor gebruik in hun originele functie. Veel recycling is feitelijk niet-functionele recycling. Hierbij wordt een metaal teruggewonnen als verontreiniging in een ander hoofdmetaal. In feite vindt zo een soort van vergiftiging plaats van legeringen, en dus een geleidelijke aantasting van de gewenste eigenschappen van deze legeringen (voornamelijk staal, aluminium-, tin- en koper-legeringen). Dit proces wordt ook wel downcycling genoemd.

Figuur 19: Expert opinion van de End-of-Life recycle rates (als percentage) van metalen [24]



Figuur 19 geeft het recente resultaat van een expert opinion inschatting van de EoL-recycle percentages van een groot aantal metalen. Er zijn tussen metalen grote verschillen zichtbaar. Veel basis metalen worden al voor >50% teruggewonnen. Voor deze metalen is in b.v. de USA de recycling bijdrage in dezelfde orde grote, of al groter dan de bijdrage vanuit primaire productie. Het gaat daarbij vooral om metalen in high-volume en simpel te verzamelen toepassingen zoals staalconstructies, aluminium producten en koperdraad, of metalen die een zeer hoge waarde vertegenwoordigen zoals goud, zilver, rhenium en platina.

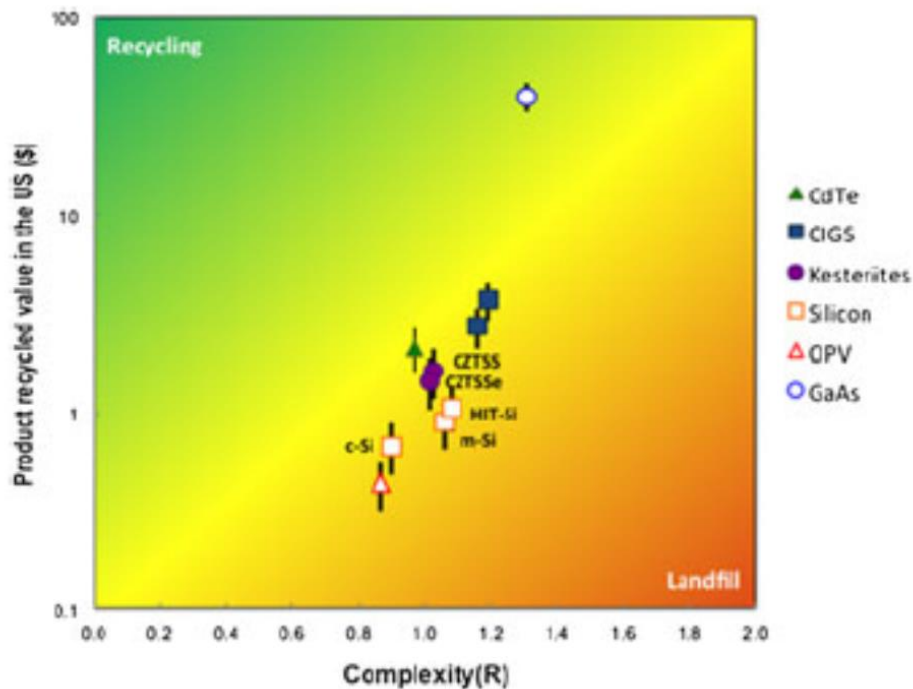
Voor een nog veel groter aantal metalen geldt echter dat de terugwin percentages worden ingeschat op < 1%. Hieronder zijn veel metalen die relevant zijn voor duurzame energie technologieën zoals Li, Ga, Ge, In, Te en de zeldzame aardmetalen. Dat zijn in

het algemeen de technologie-metalen die in kleine hoeveelheden in complexe high-tech producten zijn verwerkt. Recycling van dergelijk producten is nog oneconomisch door te lage volumina en te complexe recyclingprocessen (collectie, ontmanteling, chemisch/fysische isolatie en opwerking, kwalificering voor hergebruik).

Chancerel en Hageluenk onderzocht de typische terugwinningspercentages van Ag, Au en Pd in een recente praktijksituatie bij een ervaren professionele recycler van elektronisch afval (het zogenaamde WEEE). De recyclepercentages waren, ondanks de hoge marktprijs van deze metalen, nog betrekkelijk laag, 11% en 25% voor respectievelijk Ag en Au/Pd [25]. Deze percentages zouden kunnen worden verhoogd door een veel meer selectieve *shredding* procedure van o.a. de *printed circuit boards* of zelfs het geheel weglaten van vergruizing en een veel betere manuele uitsortering van de Ag- en Au metaalrijke delen van WEEE. Dit laatste vereist echter een grondige kennis van de recycleplant operators over een zeer groot scala apparaten. Het vereist ook aanpassing van de producten met veel meer aandacht voor de *design-for-recycling* en verregaande productstandaardisatie. De operators weten i.h.a. wel gemakkelijk de permanente magneten te lokaliseren in PC's en laptops. Hierin zijn het waardevolle Nd en Dy verwerkt. Operators zijn ook vaak alleen gefocust op het isoleren van de grote bulk van metalen, bijvoorbeeld Fe- en Cu-legeringen. Merk op dat veel innovaties juist het tegendeel proberen te bereiken van standaardisatie en *design-for-recycling*.

Anctil *et al.* geven een meer fundamentele benadering voor de terugwinbaarheid van metalen als functie van product complexiteit en de economische waarde van de metalen [26]. De product complexiteit wordt door hen gekwantificeerd via de Renyi-entropie van het product. Interessant is hun toepassing van deze analyse op een aantal verschillende soorten PV panelen (figuur 20). Dunne film GaAs PV komt op basis van de criteria zonder meer in aanmerking voor recycling. Voor CdTe en CIGS is dit twijfelachtig terwijl kristallijn silicium momenteel, beter naar de stortplaats kan worden gebracht. De praktijk lijkt hiermee wat betreft kristallijn silicium en CIGS in overeenstemming. Deze markt is sowieso nog niet volwassen vanwege de zeer kleine volumina (economisch is er nog geen sluitende business case voor de recycling van PV panelen).

Figuur 20: End-of-Life opties voor verschillende type PV modules als functie van de recycled product waarde en de product complexiteit (uitgedrukt in Renyi entropie) [26]



Een senior onderzoeker, werkzaam bij een grote aluminium firma, vertelde mij dat zijn firma al zeer ver was in de ontwikkeling van LiAl legeringen voor toepassing in o.a. vliegtuigindustrie. Dit materiaal heeft het (nog) niet tot de markt gebracht omdat bij pogingen tot recycling er geen oventechnologie was die bestand was tegen het agressieve lithium. Verder merkt hij op dat bij de ontwikkeling van het LiAl materiaal men merkwaardigerwijs nog niet een mogelijke schaarste van lithium in beschouwing nam, en dat dit tegenwoordig wel heel anders zou gaan. Functionele recycling van metalen is, ook technisch beschouwd, geen sinecure!

Veel high-tech producten verdwijnen tenslotte massaal naar derde wereld landen voor 2^e gebruik en worden daardoor praktisch gesproken als verloren beschouwd voor recycling.

Dit alles neemt niet weg dat voor specifieke high-volume producten zeer hoge recycle percentages kunnen worden behaald. First Solar heeft dit bijvoorbeeld bereikt voor de dunne film CdTe PV technologie. De drijfveer voor First Solar was zeer waarschijnlijk vooral een milieutechnische; zonder kwantitatieve recycling zou grootschalige toepassing van Cd-houdende PV panelen in veel landen (EU, Japan, USA) op ernstige milieubezwaren stuiten. Misschien speelde ook de verwachte Te-schaarste hierbij een rol. First Solar garandeert al sinds lange tijd bij aankoop de functionele recycling van CdTe panelen (inclusief inzameling).

Voor Japan is op gebied van recycling zeer actief. Natuurlijk speelt hierbij een rol dat Japan nauwelijks over eigen grondstoffen beschikt, en wel een belangrijke ontwikkelaar en producent is van high-tech producten. Het zit echter ook sterk in de Japanse cultuur

verweven om materialen te hergebruiken en verspilling tegen te gaan, ook al is zo iets economisch nog “onverantwoord”. Dat is in de westerse wereld helaas nog ongekend.

Voor verhoging van terugwinpercentages van technische metalen zijn daarom een aantal drastische aanpassingen nodig:

- 1 Grootschalige toepassing van *design-for-recycling* en product standaardisatie. In een gedachtenexperiment kun je je bijvoorbeeld voorstellen dat in plaats van zeer dunne silicium wafers gebruik wordt gemaakt van zeer dikke silicium wafers (de kosten van silicium *feedstock* nemen wellicht in de toekomst nog verder af). Op deze wijze is de *survival-rate* van de wafers bij productie, toepassing en (vooral) ontmanteling van PV panelen voor recycling wellicht sterk te verbeteren. Misschien kunnen de technische prestaties van dikke silicium zonnecellen ook positief worden beïnvloed. Ook de ECN Metallisation Wrap-Trough (MWT) cell- en module concept is waarschijnlijk bij uitstek geschikt voor recycling, wat een pré kan betekenen voor de MWT business case.
- 2 Sterke verhoging van inzameling efficiëntie (bijvoorbeeld door lease i.p.v. eigendom zoals inmiddels wel wordt gedaan voor b.v. kantoorinrichting en auto's, statiegeldsystemen). In een gedachtenexperiment kun je je bijvoorbeeld voorstellen dat zonnepanelen een dergelijk hoge restwaarde vertegenwoordigen dat ze niet naar de stortplaats gaan. Dit kan door b.v. het zilveragehalte van de zonnecellen te verhogen (misschien worden hierdoor ook de prestaties en betrouwbaarheid positief beïnvloed).
- 3 Exportverbod voor afgedankte producten naar derde wereld landen
- 4 Technologie ontwikkeling voor functionele recycling van producten die grootschalig worden toegepast (magneten, zonnepanelen, elektronica, coatings), inclusief certificeringmethoden voor hergebruik.

3.5 Vermindering materiaalverbruik

Vermindering van materiaalverbruik is een zeer voor de hand liggende en *no regrets* optie. Materiaal vermindering is geen fundamentele oplossing maar kan wel belangrijke tijdswinst opleveren om alternatieven materialen te vinden. Kansen zijn er vooral waar een technologie nog niet volledig is uitontwikkeld, en waar de productie efficiëntie nog kan worden verbeterd.

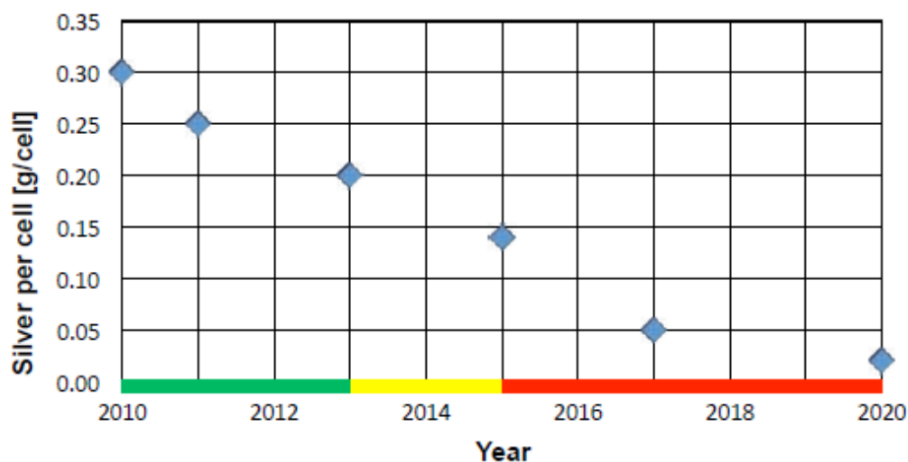
Allereerst moet verspilling van grondstoffen worden voorkomen. Zo vindt de productie van magneten nog te vaak plaats door de gewenste magneetvorm simpel uit een blok te snijden. Hierbij gaat veel waardevol en schaars materiaal verloren (schattingen geven aan 20%). Dit terwijl alternatieve methoden al lang voorhanden zijn (b.v. sintering). Vergelijk deze situatie met het zagen van Si-wafers uit grote blokken (ingots) kristallijn silicium, hierbij is het verlies zelfs circa 40%. Alternatieven voor het zagen van silicium wafers zijn in ontwikkeling maar worden commercieel nog niet (of niet meer!) toegepast uit kosten en/of prestatie overwegingen.

Verspilling treedt ook op bij nat-chemische en vacuüm depositieprocessen. Hier kan nog veel worden verbeterd. Een drastische vermindering van materiaalverbruik kan worden bereikt door fundamenteel nieuwe materiaalkennis te ontwikkelen (b.v. nanotechnologie). Fundamenteel grensvlakonderzoek onderzoek wordt uitgevoerd naar

werking van permanente magneten (een van de doelstellingen hierbij is vermindering van het Dysprosium gehalte). Aan zonnecellen wordt veel fundamenteel onderzoek verricht naar toepassing van quantumdots voor verbetering van het gebruik van het zonlicht waardoor minder foto-actief materiaal nodig zal zijn. Veel van dit onderzoek bevindt zich echter nog in een zeer vroeg stadium.

Een van de minder bekende aspecten van deze oplossingsrichting is het zogenaamde Jevons' paradox ofwel het *rebound* effect. Vermindering van materiaalverbruik en verhoging van productie efficiëntie leidt in het algemeen tot lagere kosten waardoor de vraag naar desbetreffende product en dus ook de grondstof snel kan toenemen. Het is inderdaad vaak de bedrijfsstrategie om de marktpositie te verbeteren. Hét historische voorbeeld is de introductie van de zeer efficiënte Watt stoommachine. Doel hiervan was vermindering van de vraag naar kolen; het tegendeel bleek echter te gebeuren en deze machine bleek een van de belangrijkste aanjagers van de industriële revolutie en kolenverbruik [27]. Het zou in dit verband erg interessant zijn om de situatie voor zilver verbruik voor kristallijn silicium zonnecellen te volgen. Leidt verlaging van de zilver consumptie in zonnecellen juist tot een extra vraag naar zilver?

Figuur 21: Roadmap voor Ag-reductie van kristallijn silicium zonnecellen [28]



3.6 Substitutie

Een extreme opvatting is dat voor de lange termijn de mensheid haar technologie veel meer moet baseren op de zogenaamde *elements-of-hope* [18]. Elements-of-hope zijn elementen die overal op aarde in praktisch gezien onbeperkte hoeveelheden voorkomen en waar bij exploratie en toepassing geen nadelige milieueffecten optreden. Het zijn H, C, O, N, S, Cl en P (onbeperkte winbaarheid van P is zoals eerder aangegeven echter zeer twijfelachtig!), en de metalen Na, Mg, K, Ca, Fe, Al en Si. Voor maatschappelijk gewenste maar niet perse essentiële toepassingen kan daarnaast gebruik worden gemaakt van de *frugal* elementen Ti, Cr, Mn, Cu, B, F, Br en Ar. De overige metalen zouden alleen nog in zeer kritische toepassingen mogen worden toegepast zoals voor energieopwekking, voedselproductie, gezondheid, transport, productiemachines en defensie. Zo'n zienswijze levert in ieder geval aardige gedachtenexperimenten op. Technologisch gezien lijken Wind en PV (in ieder geval v.w.b. de kristallijn silicium technologie) al behoorlijk te kunnen voldoen aan deze voorwaarden. Door marktmechanismen, consumptiepatronen en politieke omstandigheden zal deze drastische oplossingsrichting de komende 100 jaar verder waarschijnlijk geen ingang vinden.

Soms blijkt substitutie niet mogelijk omdat het product dan niet meer aan de gewenste optimale eigenschappen kan voldoen en zichzelf uit de markt zou prijzen.

In veel situaties is substitutie in principe goed mogelijk en zijn oplossingen al op relatief korte termijn te verwachten, denk hierbij aan vervanging van Cu door Al voor het transport van elektriciteit, van dunne-film CuInGaS (CIGS) PV cellen door de zogenaamde kesterites ($\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S/Se})_4$) of vervanging van Ru in de kleurstof gesensibiliseerde zonnecel door Pb (in de zogenaamde perovskites).

3.7 Beleidsmatige aspecten materiaal schaarste

Vele landen hebben beleidsmaatregelen opgesteld op gebied van productie en gebruik van mineralen. Hieronder kunnen 3 categorieën worden onderscheiden: mineraalrijke landen met hoge of lage eigen metaalconsumptie, en mineraalarme landen met een hoge metaalbehoefte. Het HCSS heeft dit geïnventariseerd. Hier wordt simpel volstaan met verwijzing naar de figuren 22 (generieke maatregelen) en 23 (maatregelen per land) uit hun rapport [11]. Daaruit wordt o.a. duidelijk dat er een enorme verscheidenheid is in te overwegen maatregelen, op vele niveaus.

Figuur 22: Generieke beleidsmaatregelen materiaal stromen (copyright The Hague Centre for Strategic Studies, 2010 [11])

TYPE OF POLICY	POLICY INSTRUMENT
NATIONAL GOVERNANCE	Domestic Supplier, Preference, Direct State Involvement, National Coherent Government Policy, National Transparency, National Good Governance, Public-Private Partnerships, National Enterprise Preference, Private Enterprise Preference
TRADE RESTRICTIONS	Tariffs, Import Restrictions, Export Restrictions, Direct Subsidies, Export Subsidies, Layered Exchange Rates, Administrative Barriers, (Anti-)Dumping Policies
TECHNOLOGY ADVANCEMENT	Renewable Energy, Recycling, Substitutes, Research & Development, Domestic Capacity Improvement, Knowledge Base Improvement
PRO-ACTIVE ACQUISITION	Identification Critical Minerals, Stockpiling Minerals, International Strategic Partnerships, Foreign Direct Investment
DEVELOPMENT COOPERATION	Development Aid, Transparency, Good Governance
GLOBAL GOVERNANCE	Liberalisation World Market, Collaborative Governance

Figuur 23: Beleidsmaatregelen per land (copyright The Hague Centre for Strategic Studies 2010, [11])

VARIABLES	CAT.*	US	CA	CN	JP	GB	FR	GE	CZ	EU	IN	SA
Domestic supplier preference	NG	X		X		X						
Direct state involvement	NG	X		X	X							X
Coherent government policy	NG	X	X		X	X	X	X		X	X	
National good governance	NG		X	X							X	X
National transparency	NG		X	X							X	X
Public-Private partnerships	NG	X			X	X		X			X	X
Nationalised enterprises	NG		X									X
Privatised enterprises	NG								X		X	
Tariffs	TR											
Import restrictions	TR									X		
Export restrictions	TR											
Direct subsidies	TR			X	X							
Export subsidies	TR											
Exchange rates	TR											
Administrative barriers	TR	X		X								
Anti-dumping measures	TR											
Renewable energy	TA		X	X		X	X	X	X	X		
Recycling	TA		X	X		X		X	X	X		X
Substitutes	TA	X				X	X	X		X		
Research & Development	TA	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Dom. capacity improvement	TA	X		X				X	X	X	X	
Knowledge base improvement	TA	X						X	X	X	X	
Identification critical minerals	PA	X		X		X						
Stockpiling critical minerals	PA	X		X		X						
Int. strategic partnerships	PA	X	X	X	X			X		X		
Foreign direct investments	PA			X	X			X		X	X	
Development aid	DC		X		X	X		X		X		
Transparency	DC		X			X		X		X		
Good governance	DC		X			X		X		X		
Liberalisation world market	GG		X		X	X		X	X	X		X
Global governance	GG		X	X	X	X	X	X	X	X		X

* POLICY CHARACTERISTICS:

NG = National Governance

TA = Technological Advancement

DC = Development Cooperation

TR = Trade Restrictions

PA = Pro-Active Acquisition

GG = Global Governance

4

Materiaal schaarste en hernieuwbare energie

Over dit onderwerp zijn sinds 2010 enkele belangrijke publicaties verschenen waarbij om de mate van criticaliteit van technische metalen voor de duurzame energievoorziening in kaart werd gebracht [5-7, 29, 30]. De globale werkwijze voor deze studies is eerst het maken van de technologie selectie. Vervolgens wordt geïnventariseerd welke metalen essentieel zijn voor deze technologieën, en in welke hoeveelheden (bijvoorbeeld in kg/MW geïnstalleerd vermogen voor PV en Wind). Daarna wordt een analyse gemaakt van de groeipotentie op basis van het toekomstig aanbodpotentieel van metalen en de energiescenario's, resulterend in een risicoanalyse per technologie. Het 2013 JRC rapport is een update van het 2011 rapport, en bevat een analyse van een groot aantal technologieën die relevant worden geacht voor een schone (*low-carbon*) energievoorziening in de EU-27 [29]. Het DOE rapport beperkt haar analyse tot wind, dunne-film PV, verlichting en elektrisch vervoer [5].

De beschouwde risicofactoren zijn

- geologische beschikbaarheid van mineralen, het bijproduct karakter van desbetreffend metaal in deze mineralen en de geografische spreiding
- politieke risico's verbonden aan landen waar mineralen aanwezig zijn
- competitie voor metalen vanuit andere bestaande of nieuwe technologieën
- mogelijkheden voor substitutie (op metaal niveau en op technologie niveau) en recycling

Deze studies gaan begrijpelijkerwijs meestal niet verder dan 2030. Maar juist de periode na 2030 is zeer interessant, zeker als men beschouwt dat technologie ontwikkeling, implementatie en energietransitie plaatsvinden meer in termen van decades dan in jaren. Zeker voor duurzame ontwikkeling is een tijdsspanne van >50 jaar zeer relevant.

Figuur 24: Resultaat van de bottleneck analysis door JRC et al., [6]

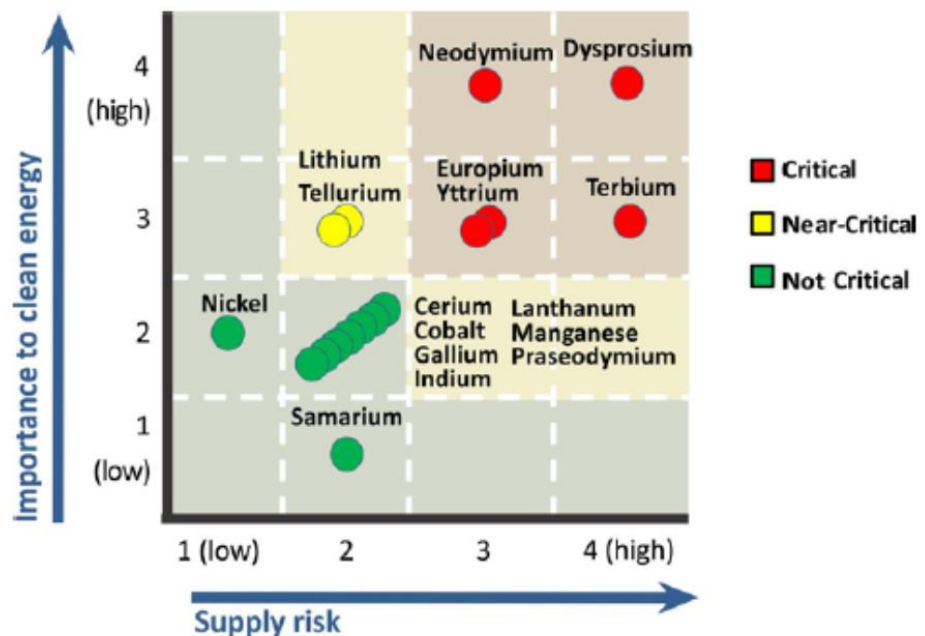
Table 1: Summary of Bottleneck Analysis

Metal	Market Factors		Political Factors		Overall risk
	Likelihood of rapid demand growth	Limitations to expanding production capacity	Concentration of supply	Political risk	
Dysprosium	High	High	High	High	High
Neodymium	High	Medium	High	High	
Tellurium	High	High	Low	Medium	
Gallium	High	Medium	Medium	Medium	
Indium	Medium	High	Medium	Medium	
Niobium	High	Low	High	Medium	Medium
Vanadium	High	Low	Medium	High	
Tin	Low	Medium	Medium	High	
Selenium	Medium	Medium	Medium	Low	
Silver	Low	Medium	Low	High	Low
Molybdenum	Medium	Low	Medium	Medium	
Hafnium	Low	Medium	Medium	Low	
Nickel	Medium	Low	Low	Medium	
Cadmium	Low	Low	Low	Medium	

Source: Chapter 5

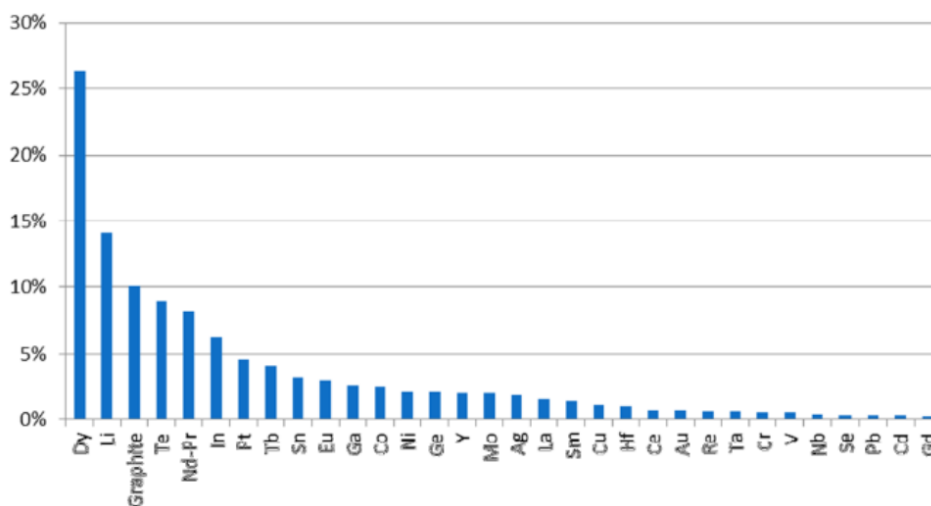
Figuur 24 geeft een resultaat van de 2011 studie van het JRC *et al* op basis van het EU SET-plan. De high-risk en medium-risk metalen in figuur 24 komen goed overeen met de resultaten van de DOE-2011 studie DOE voor de periode 2015-2025 (figuur 25).

Figuur 25: Risico analyse 2015-2025 door Department of Energy [5]



Een meer kwantitatieve illustratie wordt door JRC gegeven. Figuur 26 toont de vraag naar technische metalen in Europa nodig voor realisatie van het SET-2030 plan als percentage van de wereldvraag naar desbetreffende metalen [29]. Duidelijk wordt dat Europa bij verwezenlijken van het SET-plan voor een behoorlijk aantal metalen een forse aanslag zal doen op de wereldmarkt, tot 26%, 8% en 6% voor respectievelijk Dysprosium, Tellurium en Indium. De onzekerheden in dergelijke analyses en berekeningen zijn echter enorm. Illustratief is de vergelijking met het JRC 2011 rapport, waar de percentages 4.0%, 50.4% respectievelijk 19.4% waren. De verschillen worden vooral verklaard doordat de berekeningen in de 2013 rapportage niet t.o.v. 2010 wereldmetaalproductie zijn uitgevoerd (zoals in de 2011 rapportage). Er wordt voor 2013 met een dynamisch groeimodel gerekend voor de primaire metaalproductie, wat voor de komende decades waarschijnlijk meer conform de werkelijk zal zijn. Daarnaast zijn in de 2013 rapportage veel meer “schone” technologieën meegenomen, zoals elektrisch vervoer (dit komt tot uiting in de opname van “nieuwe” kritische elementen zoals lithium en grafiet).

Figuur 26: Metaalverbruik in de EU voor de uitvoering van het SET plan, weergegeven als percentage van wereldverbruik in 2020-2030 [29]



Het zal verder duidelijk zijn dat de onzekerheden in dergelijke criticaliteits analyses, net zoals voor berekening van de depletie indices, buitengewoon groot zijn. Metaal reserves, metaal consumptie/technologie en geopolitieke ontwikkelingen slecht te voorspellen. Ook kan geen rekening kan worden gehouden met nog te ontwikkelen producten die zouden kunnen concurreren voor dezelfde schaarse metalen. Vooral nieuwe consumentenproducten zijn in dit opzicht berucht, omdat die zeer snel op de markt kunnen komen en een onverwacht grote vraag naar grondstoffen veroorzaken. Voorbeelden zijn de flat panel display en het elektrisch vervoer. Deze toepassingen vormen een grote aanslag op de voorraden indium respectievelijk zeldzame aardmetalen. Deze metalen zijn ook essentieel voor CIGS dunne-film PV en windturbines. De vraag wordt dan welke toepassing de hoogste prijs kan betalen voor desbetreffend metaal, en welke alternatieven kunnen worden gevonden.

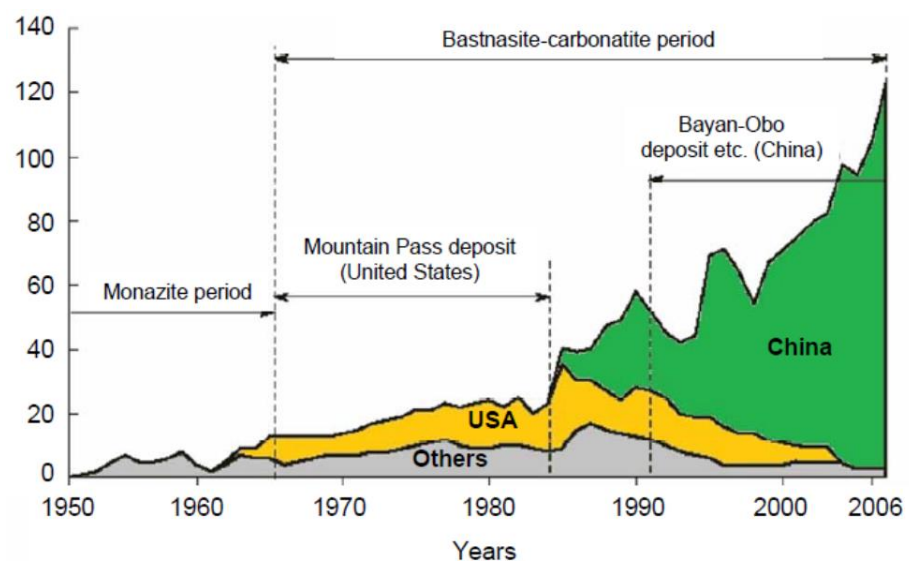
5

Case studie zeldzame aardmetalen en wind turbines

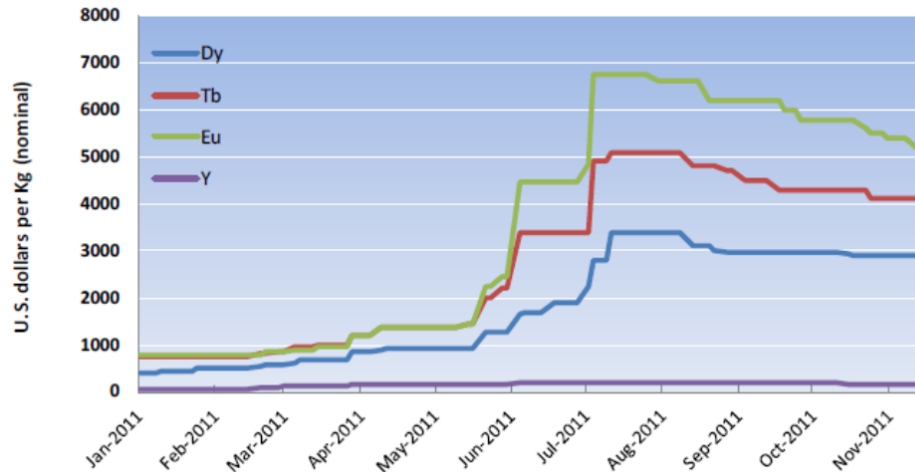
5.1 Stand van zaken

In 2009 en 2010 werden door de Chinese overheid exportrestricties ingesteld voor zeldzame aarden geproduceerd in China. China is verantwoordelijk voor > 95% van de wereldproductie (figuur 27). De exportbeperkingen leidde daarom tot zeer hoge prijzen (figuur 28). Deze prijsexplosie en de toen nog vrij onbekende positie van China als grondstofleverancier trok in 2009-2010 zeer veel media aandacht.

Figuur 27: Mondiale productie van zeldzame aardoxides (copyright Öko-Institute 2011 [31])

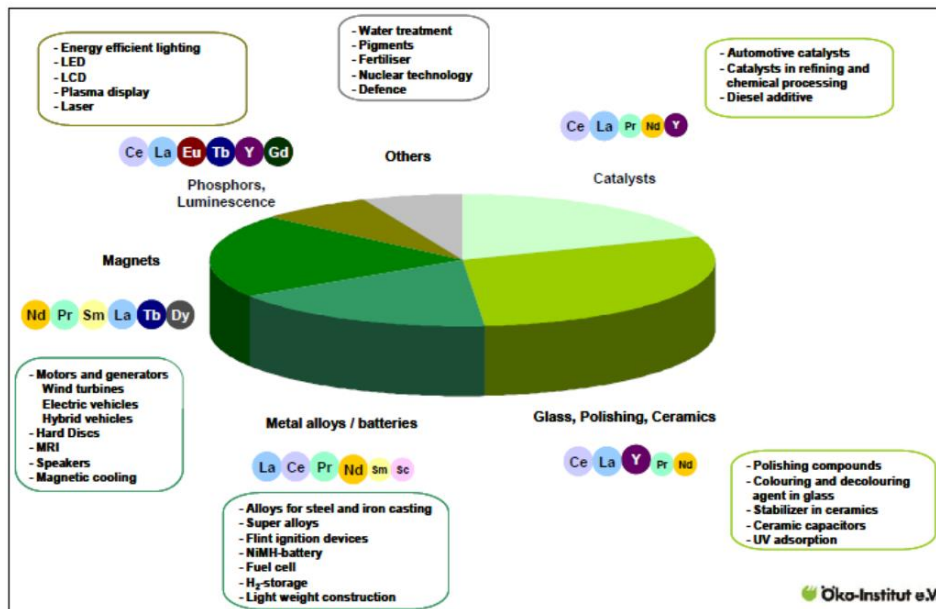


Figuur 28: Prijsontwikkeling van de “zwarte” zeldzame aardmetalen 2011 [5]



Zeldzame aardmetalen worden in een groot aantal schone technologieën toegepast (figuur 29). Een belangrijke rol is weggelegd voor Neodymium (Nd) en Dysprosium (Dy) in permanente magneten (PM), onderdeel van generatoren en elektrische motoren. Deze NdFeB magneten vertonen superieure eigenschappen in termen van magneetsterkte, thermische eigenschappen en gewicht. Nd wordt voor ~76% toegepast in magneten (JRC-2013). Dy wordt exclusief gebruikt in magneten om demagnetisering van NdFeB bij hogere temperatuur te voorkomen. NdFeB magneten zullen naar verwachting steeds meer worden toegepast in elektrisch vervoer en Direct-Drive (DD) windturbines. Direct-drive is veel minder onderhoudsgevoelig dan de gear-based generatoren, en daardoor bij uitstek geschikt voor bijvoorbeeld offshore Wind.

Figuur 29: Toepassingen van zeldzame aarden (copyright Öko-Institute 2011 [31])



Nederland is in Europa na Frankrijk en Oostenrijk een belangrijke importeur van Nd en Dy voor de productie van permanente magneten, met een aandeel van 16% (firma's Goudsmit Magnetic Systems en Walker Europe).

In de rapporten van DOE en JRC worden Nd, Dy, Y, Tb en Eu als hoogste risico elementen aangeduid. Deze inschaling heeft vooral te maken met de extreme lokalisatie van de huidige mijnbouw en productie van zeldzame aarden in een politiek eigenzinnige regio (China). Opvallend is dat in 2010 circa 25% van de Chinese windturbines waren uitgerust met Nd en Dy bevattende PM; buiten China was dit percentage nog slechts 5%. Het zeer leerzame rapport op gebied van beschikbaarheid en toepassing van zeldzame aarden is van het Öko-Institut uit 2011 [31].

Als voorbeeld het resultaat voor Dy en Nd-Pr van de JRC-2013 studie, dus specifiek voor de Europese situatie in 2030 op basis van het SET-plan. De aannames voor wind generatortechnologieën in 2030 in de EU zijn in dit rapport: 0% EMG-geared, 10% EMG-DD, 18% High Temperature Superconductor, 29% MS/HS-PMG en 43% DD-PMG. Per jaar zal volgens het scenario circa 13-14 GW Wind worden bijgeplaatst. Samen met de projecties van 400 GW wind capaciteit, waarvan 150 GW offshore, leidt dit tot een percentage van de jaarlijkse vraag vanuit de EU-27 t.o.v. de wereldvraag naar Dy en Nd-Pr in 2030 van resp. 2.2 en 1.2%. Dergelijke voorspellingen zijn natuurlijk erg onzeker maar lijken sowieso nogal mee te vallen in het licht bezien van de grote veronderstelde bijdrage van direct-drive in 2030.

In het JRC-2011 rapport waren de vergelijkbare percentages nog 4 % voor zowel Dy als Nd-Pr. Het verschil komt vooral doordat in het JRC in haar laatste rapport (2013) is uitgegaan van een groei in de REE primaire productie, terwijl in het 2011 rapport simpelweg is gerekend met de (constante) 2010 jaarproductie van REE. Ook zijn de aannames van de Wind generator technologiemix verschillend in deze rapporten. Er is dus een grote mate van voortschrijdend inzicht, wat wel begrijpelijk is gezien de stand der techniek en de relatieve nieuwheid van het probleem van materiaal schaarste. Er lijkt hier een rol voor ECN en haar partners om de aannames van het JRC te verifiëren en te monitoren.

De Dy en Nd-Pr behoefte voor Windenergie is in 2030 veel minder dan de vraag vanuit het elektrisch vervoer. Deze laatste zou verantwoordelijk zijn voor 25.0% en 6.9% van de wereldvraag naar Dy en Nd-Pr (JRC-2013, berekening voor EU-27 in 2030). Dit soort uitkomsten geeft wel aan hoe krachtig de concurrentie vanuit automotive kan zijn voor zeldzame aardmetalen. Anderszins kan ook worden gesteld dat automotive misschien wel de echte motor zal zijn achter uitbreiding van de zeldzame aardmetaal productie, wat op haar beurt weer gunstig kan zijn voor de Windturbine industrie.

Ook kunnen magnetisch koelen en elektrische 2-wielers (in Azië) voor grote druk zorgen op de markt voor Dy en Nd-Pr. De vraag hierbij is hoeveel Windenergie in de EU kan "betalen" voor deze zeldzame aarden relatief t.o.v. de concurrerende technologieën, mocht het aanbod kritisch worden. Informatie hierover is in de literatuur nog niet voorhanden.

Oplossingen voor REE schaarste zijn zoals eerder gemeld te vinden in verhoging van primaire productie, secundaire productie (recycling), vermindering van gebruik, substitutie, beleidsmaatregelen en handelsovereenkomsten.

5.2 Verhoging van primaire productie

Als grootste producent ligt de sleutel voor een snelle oplossing vooral bij China dat bijvoorbeeld export restricties kan verminderen en in staat moet worden geacht om de REE productie snel te verhogen. Dit laatste moet dan wel milieutechnisch verantwoord worden uitgevoerd, wat in China niet op voorhand is gegarandeerd. De Chinese overheid doet er wel veel aan om deze milieu situatie snel te verbeteren, en daarom is snelle uitbreiding niet te verwachten, de illegale REE mijnbouw activiteiten in China zullen namelijk moeten worden afgebouwd.

Wakker geworden door de REE crisis zijn in de USA, EU en in Australië onderzoeken gestart naar het (her)starten van de primaire productie van REE. Deze ertsen zijn gelukkig verre van schaars, en komen wereldwijd in behoorlijk grote hoeveelheden voor in (nu nog) politiek stabiele landen (USA, Groenland, Zweden, Australië). De bewezen reserves zijn voldoende voor tenminste de komende 800 jaar, meer nog dan de reserves van magnesium en kalium (figuur 13). Er wordt onderscheid gemaakt in zogenaamd lichte en zware zeldzame aardmetalen. De lichte REE komen in circa 12x grotere hoeveelheden voor dan de zware REE. Dy is voorbeeld van een zwaar REE, en komt bijvoorbeeld in de REE ertsen van Mountain Pass (USA) nauwelijks voor, maar wel in relatief grote concentraties in het Kvanefjeld op Groenland. Europese voorraden worden in kader van het Europese geo-database project Promine in beeld gebracht, o.a. in Zweden zijn interessante mogelijkheden.

Het opstarten van REE mijnbouw en opwerking buiten China is niet eenvoudig. Mijnbouw is zeer kapitaal- en energie intensief proces vooral als het een greenfield betreft (dit geldt dus niet voor Mountain Pass). Velen REE studies hebben de status van feasibility of zelfs pre-feasibility en zijn daarmee nog ver weg van werkelijke productie. Anders dan voor basis metalen en veel technologie metalen bestaat de REE uit een grote groep metalen (17 afhankelijk van de definities) die chemisch gezien een zeer sterke gelijkenis vertonen. Chemische isolatie is daarom zeer specialistisch werk. Buiten China is veel deskundigheid verdwenen door sluitingen van mijnen en opwerkingsfaciliteiten. China kon immers sinds lange tijd goedkoper de REE leveren. Daarbij moet men vaak rekening houden met de grote hoeveelheid radioactiviteit die vrijkomt bij REE winning vanwege de hoge U en/of Th gehaltes in de REE ertsen (of beter gezegd: Uranium ertsen). Dit geldt o.a. voor het Kvanefjeld in Groenland. Een grote milieucatastrofe in Groenland wordt door het Öko-instituut niet uitgesloten. Het uranium vertegenwoordigt een behoorlijke economische waarde, en zal misschien worden gebruikt voor nucleaire energieopwekking. Op deze manier zijn Windenergie en Nucleaire energie dan via de mijnbouw “met elkaar verbonden”.

5.3 Recycling

Een belangrijk voordeel van de secundaire productie (recycling) van REE is de afwezigheid van radioactiviteit. Recycling van REE wordt echter nog vrijwel niet toegepast, met uitzondering van productie *scrap* van magneten en batterijen (de zogenaamde *pre-consumer recycling*). Dit komt door de hoge complexiteit van REE-houdende producten, wat in ieder geval een nauwkeurige en kostbare ontmanteling noodzakelijk maakt. *Post-consumer* inzameling is vaak problematisch. Veel consumenten producten verdwijnen voor een 2^e leven naar ontwikkelingslanden en zijn daardoor feitelijk verloren voor recycling. Er is daarbij een zeer grote diversiteit aan REE houdende producten. Recycling van REE is een energie- en chemicaliën-intensief proces. Bij pyro-metallurgische opwerking van de grote fractie REE in WEEE gaat de REE typisch in de slag-fractie zitten waar ze niet of nauwelijks uit zijn terug te winnen. Op dit gebied wordt wel zeer veel onderzoek uitgevoerd. Al deze kennis heeft nog niet geleid tot commerciële activiteiten. Deze factoren, in combinatie met de grote prijsschommelingen op de REE markt en het verwachte nieuwe REE aanbod vanuit USA en Australië maakt dat de recycle percentages van REE nog onder 1% liggen (figuur 19).

5.4 Substitutie

Substitutie kan op het niveau van materiaal, productontwerp en technologiekeuze. Er zijn zeer veel toepassingen van REE in vele producten. Het Öko-Institut geeft in hoofdstuk 10 van haar rapport een omvangrijke opsomming van alle mogelijkheden, voor motoren/generatoren, batterijen, verlichting en katalysatoren. Alleen in het geval van elektrisch vervoer kan volgens het Öko-Institut betrekkelijk eenvoudig worden afgezien van het grootschalig gebruik van Nd en Dy, wat echter wel ten koste gaat van energie efficiëntie. Dit is een belangrijke constatering in het licht van de toch bedreigende analyse door JRC v.w.b. elektrisch vervoer (zie boven).

Als elementen zijn REE moeilijk vervangbaar want ze werden juist toegepast vanwege hun zeer bijzondere en superieure eigenschappen. Substitutie van een REE voor een ander, wat soms technisch gesproken mogelijk is zonder veel verlies in gewenste eigenschappen van het product, komt vaak neer op verschuiven van het probleem naar een ander probleem. Een voorbeeld is gedeeltelijke vervanging van Dy in permanente magneten door Tb, wat een nog kostbaarder element is dan Dy. Een ander voorbeeld is vervanging van NdFeB door SmCo. Samarium is erg duur en de Sm reserves zijn een factor 10x kleiner dan de Nd reserves; Cobalt levert socio-economische en milieuproblemen omdat Cobalt vooral in Congo wordt gewonnen. Voor Windturbines rest er dan niet veel anders dan vermindering van het Dy gehalte in de PM (ten koste van de prestaties), ontwikkelen van verbeterde *gear-based* generatoren die geen PM gebruiken of, voor zeer-hoog vermogen turbines, over te gaan op high-temperature conductive rotor technologie. Voor deze laatste technologie wordt gebruik gemaakt van het eveneens schaarse Yttrium, dus het is nog zeer de vraag in hoeverre dit een oplossing zal zijn. Bovendien is die technologie nog niet uitontwikkeld. Maar misschien is een differentiatie van magneettechnologie naar toepassing een goede oplossing, in

combinatie natuurlijk met uitbreiding van Nd en Dy productie. Misschien zal China haar export restricties verminderen om geen inkomsten te missen (en om de concurrentie niet te snel in het zadel te helpen). Er is voor de komende eeuwen immers geen intrinsiek gebrek aan REE te verwachten.

6

Case studie Tellurium en CdTe PV

6.1 Stand van zaken tellurium

Tellurium (Te) is voor het onderwerp materiaal schaarste en duurzame energie een interessante voorbeeld om tenminste twee redenen: Het is een essentieel en onvervangbaar ingrediënt van de foto-actieve laag van de belangrijkste dunne-film zonnecel technologie, CdTe. Daarom is in de literatuur veel aandacht besteed aan de groeipotentie van deze veruit meest succesvolle dunne-film PV technologie. In de JRC als DOE rapporten wordt tellurium geassocieerd als *high risk* respectievelijk *near critical* [5,6].

Tellurium staat model voor de marktmechanismen van technische bijproducten, in dit geval als bijproduct van koper winning, met een vrijwel verwaarloosbare toegevoegde economische waarde voor de Cu-refiner, maar wel met een essentiële toepassing in slechts één zeer snel groeiende technologie (dunne-film PV). Andere voorbeelden van bijproducten met vergelijkbare marktmechanismen zijn indium (uit zinkproductie) en gallium (bij aluminium productie uit bauxiet). Zie verder figuur 18 en de interessante uitleg over bijproducten in het JRC-2011 rapport (vanaf p. 66).

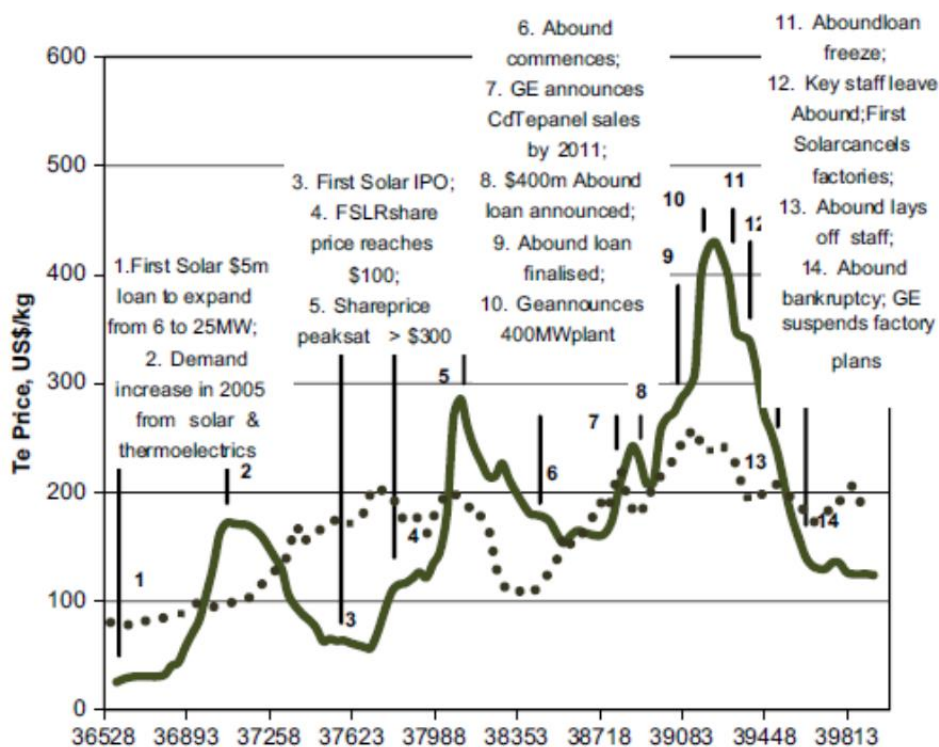
De primaire productie van Te bedroeg in 2011 circa 683 ton. Meer dan 90% hiervan is afkomstig uit Cu-electrorefining (in de zogenaamde *anode slime*). De secundaire, *recycled* Te productie was in 2011 veel kleiner, circa 59 ton (8% van de primaire productie). In 2012 was 40% bestemd voor de PV industrie; in 2010 was dit percentage nog slechts 26%. In de PV industrie neemt de firma First Solar het leeuwendeel hiervan (>90%) voor haar rekening, met een jaarproductie in 2013 van circa 1.7 GW aan CdTe zonnepanelen.

De Te-reserves worden op basis van de Cu reserves door de USGS geschat op 24000 ton. Voor de productie van 1 GW CdTe is volgens de huidige stand van de techniek circa 75-200 ton Te nodig. De huidige Te-reserves zouden daarom genoeg moeten zijn voor

circa 120-240 GW CdTe panelen. Ter vergelijking: De totale PV zonnepaneel productie in 2015 wordt geschat op 30 GW, voor het grootste deel zullen dit kristallijn silicium panelen zijn. In hoofdstuk 3.2 werd al aangegeven dat grootschalige uitbreiding van Cu-reserves erg onwaarschijnlijk is, wat grootschalige uitbreiding van de primaire Te productie als bijproduct van Cu onwaarschijnlijk maakt.

Andere toepassingen van tellurium vertonen een veel meer geleidelijke groei, of zelfs afname (thermo-elektrische materialen, metallurgisch toepassingen, rubber additief, chemicaliën en farmaceutisch). In veel van deze toepassingen blijkt tellurium vervangbaar, dit in tegenstelling tot de essentiële rol van Te CdTe zonnecellen. De prijs van tellurium wordt daarom sinds 2005 vooral bepaald door specifieke gebeurtenissen in de PV markt, zoals in figuur 30 treffend geïllustreerd [32].

Figuur 30: Spot-markt prijzen voor tellurium [32]



6.2 Groeipotentie CdTe PV

Over de groeipotentie van CdTe PV is sinds 2000 veel gepubliceerd, met zeer verschillende uitkomsten variërend van pessimistisch tot zeer optimistisch [30,32-35]. Belangrijke uitgangspunten hiervoor zijn de voorspellingen van de groei van de primaire productie van tellurium, en het potentieel voor reductie van de laagdikte van het CdTe foto-actieve materiaal. Schattingen voor de maximaal mogelijke jaarproductie van CdTe panelen variëren van 20-211 GWp. Schattingen voor het maximaal geïnstalleerde CdTe totaal vermogen lopen ook ver uiteen, van 120 tot 11000 GWp.

Illustratief voor de grote rol van aannames en rekenwijze is de schatting voor Te in de rapporten van JRC. Op basis van het SET-plan en verwachte groei van CdTe PV technologie in Europa, wordt voor het jaar 2030 de Te-vraag voor Europa geschat op 50% van de wereldvraag naar Te (2011 JRC rapport). In het 2013 JRC rapport echter is dit percentage gezakt tot 8 % van de wereldvraag. Het verschil wordt vooral verklaard doordat in het 2011 rapport is uitgegaan van de 2010 Te wereldproductie. Voor het 2013 rapport werd bij de berekening uitgegaan van een gemiddelde jaarlijkse groei van de wereldproductie Te tot 2030.

Een andere belangrijke aanname voor berekening van toekomstig Te gebruik is de laagdikte van de CdTe laag. Hier lijken goede technologische mogelijkheden voor reductie van de laagdikte van (huidig) 2-3 μm tot 0.5 of zelfs 0.3 μm , dus een vermindering in Te gebruik per GW van minimaal 5x. Ook in zo'n veel dünnere CdTe laag kan het zonlicht effectief worden ingevangen mits een verbeterde licht-inkoppeling plaatsvindt. Dit laatste kan worden bereikt door bijvoorbeeld een reflecterende achterzijde aan te brengen. Dat dit in praktijk nog niet wordt toegepast is waarschijnlijk toe te schrijven aan het feit dat dit voor massa productie een behoorlijke omschakeling en dus investeringen inhoudt (bewezen technologie), en prijstechnisch nog niet noodzakelijk is gezien de gemiddelde relatief lage Te kosten in de afgelopen jaren.

Zoals gezegd wordt >90% van Te geproduceerd als bijproduct van Cu, en daarom kan Te in principe niet sneller groeien dan de mondiale Cu-groei. Deze laatste wordt geschat op 2-3%. De overige <10% Te productie vindt eveneens plaats als bijproduct van lood- en zink waarvoor ongeveer dezelfde uitgangspunten kunnen worden gehanteerd; ook de primaire productie van deze metalen zal namelijk niet veel groter zijn dan 2-3%/jaar. De verhouding hoeveelheden Cu/Te voor een gemiddelde mijn is circa 30.000. Hieruit begrijpt men hoe ondergeschikt het financieel belang van Tellurium is als bijproduct van koperwinning. Het "voordeel" van Te is dat de investeringskosten voor Te-isolatie bij Cu-refining relatief laag zijn, een factor 50x en 20x minder dan de investeringskosten voor indium en gallium, elementen die een vergelijkbare "bijproduct" problematiek hebben.

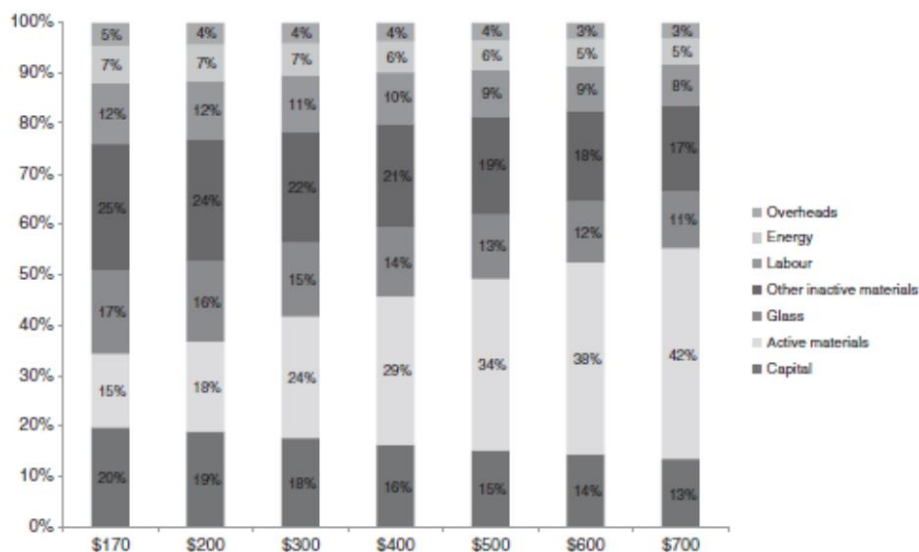
De situatie voor Te en CdTe PV is waarschijnlijk minder rooskleurig dan vaak wordt verondersteld:

- In 2000 nam China 6% van de wereldwijde vraag naar Cu voor haar rekening, in 2010 was dit percentage gestegen tot 40% en in 2018 zal het zonder veranderingen 100% zijn [7]. In de meeste rapporten wordt de politieke risico's voor Te als relatief laag ingeschat, maar door deze beweging van Cu richting China kan dit in de toekomst snel veranderen. Dit kan implicaties hebben voor het Te dat beschikbaar is/komt voor de (westerse) CdTe PV maakindustrie.
- Het Cu-gehalte in de ertsen nemen al jaren gestaag af, en daarmee ook de Te gehalten in de beschikbaar komende *anode slimes* (van 200 ppm in 1985 tot 92 +/- 7 ppm in de periode 2003-2006. Door de lagere kwaliteit in Cu-ertsen wordt overgegaan op een andere wijze van Cu-extractie (hydro-metallic solvent extraction electrowinning, SE-EW). Bij deze nieuwe methode bestaat de kans dat minder Te beschikbaar komt. In ieder geval wordt het bij het huidige relatief lage Te prijspeil minder rendabel om Te winnen.
- Twee andere economisch belangrijke bijproducten van Cu-winning zijn zilver (Ag) en goud (Au). Circa 20% van de primaire Ag productie komt van Cu-winning. De Ag

prijs is 2-7x hoger dan de Te prijs, het technisch mogelijke extractiepercentage van Ag en Au uit de Cu-winning is ook significant hoger dan Te (>90% voor Ag; 5-55% voor Te). Toch wordt slechts 60% van het Ag uit de Cu-anode slimes gewonnen. Voor Au is dit percentage circa 55%. Dus, als het voor Ag en Au voor de mijnbouwer al niet economisch interessant is om deze volledig uit de Cu-ertsen te halen, dan is het voor het veel minder waardevolle en lastiger te extraheren Te zeker ook niet rendabel om dit kwantitatief te winnen [32]. De Te gehaltes zijn zeer fluctuerend wat isolatie verder compliceert.

- De vraag naar Te wordt voor een aanzienlijk deel bepaald door de PV markt (met 1 hoofdrolspeler, namelijk First Solar). De PV markt verkeert sinds 2011 in een lastige situatie, met zeer veel concurrentie van vergelijkbare technologieën (met name kristallijn-Si) en prijsdalingen. Kristallijn-Si PV is inmiddels sterk concurrerend met CdTe, dat enige tijd de goedkoopste PV technologie was, beiden met een kostenpeil van circa \$0.75/Wp (2012). Uiteindelijk systeemkosten meestal van groter belang en hier is kristallijn-Si PV in het voordeel vanwege het hogere omzettingsrendement t.o.v. de CdTe PV technologie. De productie kosten van CdTe PV modules zijn verder sterk afhankelijk van de Te prijs, zoals modelberekeningen tonen (figuur 31). Grootchalige investeringen in uitbreiding van primaire Te productie liggen om bovengenoemde redenen niet voor de hand, waardoor een snelle groei van CdTe ook niet kan worden verwacht.

Figuur 31: CdTe cost breakdown als functie van de Tellurium prijs ("active materials") [36]



Note: Changes over baseline case scenario of 0.75\$/Wp production cost, 170\$/Kg tellurium price, 11.6% efficiency and large scale production.

De algemene conclusie is dat op middellange termijn (tot 2030) er feitelijk geen Te schaarste zal zijn en met CdTe PV kan een fors deel van de mondiale PV markt worden bediend. Voor de langere termijn is dit echter zeer onzeker. Of CdTe werkelijk grootschalig zal worden toegepast lijkt vooral af te hangen van de concurrentiepositie t.o.v. de kristallijn-Si PV technologie. Deze laatste heeft veel minder of helemaal niet te maken met materiaal schaarste.

Daarentegen lijkt functionele recycling van CdTe goed geregeld, dit is essentieel voor het milieuprofiel van CdTe PV, en kan wellicht de schaarse problematiek verzachten en/of vertragen [37].

6.3 Resterende vragen tellurium

Er resteren nog een aantal, ook voor ECN, interessante vragen over het potentieel en nut van CdTe PV die nog niet of nauwelijks in de literatuur zijn aangestipt:

- First Solar garandeert middels een onafhankelijk fonds de inname en 100% recycling van afgedankte CdTe PV panelen. Recycling van andere PV technologieën vindt nog niet plaats. First Solar neemt inmiddels met haar CdTe technologie het leeuwendeel van het mondiale Te-verbruik voor haar rekening (40% in 2012). De vraag is dus wat deze recycling betekent voor het te installeren potentieel van CdTe op de zeer lange termijn; in hoeverre kan CdTe een rol spelen als hiervoor al het beschikbare Te “continu” zal kunnen worden ingezet? Met andere woorden, wat kan de cumulatieve bijdrage zijn van CdTe PV zijn aan de elektriciteit vraag, gemeten over perioden van eeuwen en bij 100% recycling van 25-50 jaar levensduur van de PV panelen?
- Wat is de mogelijk rol van in het verleden en in de toekomst opgeslagen Cu anode slimes, hoe groot is deze voorraad, wie is de eigenaar? Kan deze voorraad worden gebruikt om aan een plotselinge vraag aan CdTe PV te kunnen voldoen? Moet daarvoor misschien een nieuwe firma worden opgericht die Te-opwerking van zeer grote voorraden als *core business* ziet. Of is een nieuw business model nodig bijvoorbeeld vanuit milieuoverwegingen (voorraden die niet langer verantwoord kunnen worden beheerd en moeten worden verwerkt? Het zou hiervoor goed zijn wanneer er nieuwe toepassingen worden ontwikkeld waarin Te een essentiële rol speelt. Opgemerkt werd al dat de investeringen in Te-isolatie betrekkelijk gering zijn.
- Hoe verloopt het onderzoek naar mogelijk Te-voorraden in diepzeemanganezenodules?
- De CdTe PV technologie heeft als potentieel “voordeel” dat het bij grootschalige toepassing een soort van veilige haven is voor het milieugevaarlijke cadmium, dat zonder nuttige toepassing grote kans loopt verspreid te raken in het milieu. Anders dan NiCd batterijen kunnen CdTe panelen goed worden getraceerd en worden verzameld voor verantwoorde recycling. Cadmium is, net als indium, een bijproduct van zink mijnbouw. Indium wordt o.a. toegepast in CIGS PV (8% in 2012) en flat panel displays (56% in 2012). Op deze wijze is CIGS verbonden aan de productie van CdTe, en kan Te worden beschouwd als deeloplossing voor het milieuprobleem van zowel Indium (waarbij Cd vrijkomt) als Cd vanuit NiCd batterij recycling.

7

Materiaal schaarste en relevantie voor ECN

7.1 Naar een unit-overstijgend soft program?

Zoals CO₂ reductie een belangrijke drijfveer is voor ons huidige onderzoeksprogramma, zo zal materiaal schaarste dit kunnen zijn in de nabije toekomst. Voor integrale milieubeoordeling zal de “materiaal *footprint*” een zelfde soort gewicht zal krijgen als de koolstof *footprint*. Zo’n materiaal *footprint* ligt ook dicht aan tegen de belangen van de industrie.

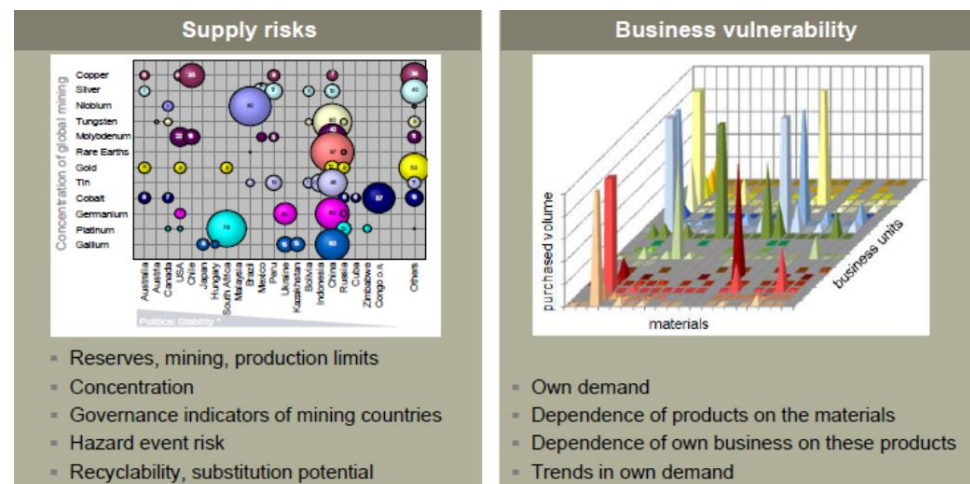
ECN staat met haar onderzoek vaak aan het begin van de technologie ontwikkeling. Daaruit volgt een verantwoordelijkheid op gebied van materiaal schaarste. ECN kan ook slim haar deskundigheid combineren op gebied van technologie roadmaps, kostenanalyses, milieuassessment en beleidsontwikkeling. De toegevoegde waarde van ECN op dit terrein is in principe groot. We kunnen nieuwe partners vinden, zoals in de mijnbouw en erts verwerkende industrie, materiaal verwerkers, recyclers en afvalverwerkers. Verder biedt het onderwerp kansen voor samenwerking met instituten als JRC, NREL, HCSS, Clingendael, TuD, het NL materiaalplatform en diverse NGO’s (WNF, SNM).

Onderstaand wordt aangegeven wat ECN zou kunnen doen, per unit en unit-overstijgend. Tenslotte volgen een aantal meer fundamentele aspecten en vragen rondom materiaal schaarste. Misschien is dit iets voor een ECN 2014 denktank die de gewenste prioriteiten kan aangeven en een *soft program*.

7.2 Unit-trekkers & denktank

Allereerst is het voor iedere unit zeer aan te bevelen om zich goed in te lezen in deze materie vooral waar het de unit strategie betreft. We zouden per unit hiervoor een trekker kunnen aanwijzen. Dit werk kan worden gecoördineerd vanuit een unit-overstijgend “soft-program” duurzaamheid of een ECN denktank, om ook niet-unit specifieke aspecten van materiaal schaarste te kunnen onderzoeken in relatie tot duurzame energie (zoals energie opslag, net, elektrisch vervoer, nucleair, etc..). Vergelijk hiervoor de aanpak van risico inventarisatie door Siemens (figuur 32). Veel bedrijven brengen op dit moment op soortgelijke wijze als Siemens de risico’s in kaart voor hun materiaaltoelevering.

Figuur 32: Materials Risks Analysis door Siemens (copyright Siemens 2013 [38])



7.3 Aandachtspunten per unit

In tabel 3 is geprobeerd om per unit aandachtspunten te identificeren voor kennisopbouw en partnersearch op het gebied van materiaal schaarste. Voor de unit Zon zijn een aantal aandachtspunten al verwerkt in het bestaande onderzoeksprogramma.

Tabel 3: Unit specifieke aandachtspunten op gebied van materiaal schaarste

Unit	Onderwerp
Wind	Trekker aanwijzen, positie bepalen over de materiaal robuustheid van het onderzoeksprogramma, rapporteren en bediscussiëren in denktank Kritisch commentaar op beschikbaarheid van Dy en Nd voor permanente magneten voor windturbines, en alternatieven hiervoor, bepalen van concurrentiekracht Wind t.o.v. anderen Bepalen van rol van meer kleinschalige windturbines die minder afhankelijk zijn van zeldzame aardmetalen, en effect hiervan op windpark ontwerp, onderhoud en opbrengst Nagaan risico van materiaal schaarste t.b.v. hoogvermogens elektronica, bijzondere staalsoorten, grid etc. Publicatie over zeer grootschalige toepassing van Wind in relatie tot materiaal schaarste
Solar	Trekker aanwijzen, positie bepalen over de materiaal robuustheid van het onderzoeksprogramma, rapporteren en bediscussiëren in denktank Onderzoek naar vermindering en substitutie Ag (x-Si) en Cu (MWT achterzijde folie), Onderzoek naar vermindering productieverliezen (o.a. via pre-consumer recycling) Publicatie over materiaal schaarste voor zeer grootschalige kristallijn-silicium technologie (als aanvulling op het artikel in Future Photovoltaics) Nagaan rol voor grafiet schaarste bij de productie en kristallisatie van silicium Kritisch commentaar op beschikbaarheid van In (CIGS), Ga (CIGS en GaAs) en Ag en Sn (x-Si) Onderzoek naar vermindering van In en Ga in CIGS, ook vermindering van productieverliezen (o.a. via pre-consumer recycling) Nagaan van mogelijke impact van materiaal schaarste op apparaat bouwers voor dunne-film productie (CdTe, CIGS) Ontwikkeling van Kesterites dunne-film PV als alternatief voor CIGS Volgen van de ontwikkeling van perovskites en grafeen toepassing dunne-film PV Ontwikkelen vervanging van ITO-TCO (door grafeen?) Kennen prijsmechanismen en materiaalkosten metalen voor PV t.o.v. andere toepassingen (concurrentiekracht van PV voor schaarse materialen, zie Andersson) Verbetering van lichtinkoppeling/verbetering van levensduur PV modules Nagaan potentieel van Concentrated-PV als oplossingsrichting materiaal schaarste Ontwikkelen expertise en partnership design-for-recycling Rol bij internationale ontwikkelingen op gebied van standaardisatie en product environmental footprinting (van PV panelen en PV systemen) Nagaan potentie en relevantie van biobased PV module materialen
Biomass Energie Efficiency	Trekker aanwijzen, positie bepalen robuustheid programma uit oogpunt van materiaal schaarste, rapporteren en bediscussiëren in denktank Besprek met EEE een eventuele schaarste van P en N als nutriënten voor grootschalige bio-energie en de biobased economy, zijn er consequenties voor >50 jaar? Literatuur onderzoek bio- en plastic-afval als grondstof voor schaarse metalen

	Literatuur onderzoek biologische processen om metalen te concentreren Ontwikkeling bio-based materialen voor PV modules Commentaar op literatuur over schaarse metalen in katalysatoren Wat kunnen we nog meer doen met cerium, zodat productie zeldzame aardmetalen meer kosteneffectief wordt? Idem voor andere hoofdelementen Bij systeem analyse naast energie efficiëntie ook rekening houden met materiaal efficiëntie als optimalisatie parameter, Nadenken over concept van materiaal footprint, Energie efficiëntie van de recycling van metalen onderzoeken
Environment & Energy Engineering	Trekker aanwijzen, positie bepalen robuustheid programma voor wat betreft materiaal schaarste, rapporteren en bediscussiëren in denktank Data mining naar de groot-volume afvalstoffen als mogelijke grondstof voor schaarse metalen die nodig zijn voor duurzame energie productie Inlezen milieu impact mijnbouw en erts verwerkende industrie vooral waar het metalen betreft die essentieel zijn voor duurzame energie productie, nadenken over in-situ leaching als ertsverwerkende methode Voorbeeld uitwerken van Ga uit red mud voor b.v. GaAs (samen met industrie) Volgen en bespreken literatuur P- en N nutriënten schaarste Nagaan welke nieuwe technische afvalstromen binnen 5-10 jaar grootschalig beschikbaar komen voor potentiële recycling (b.v. glasvezelkabel) Nadenken met units over recycling methoden (slimme ontmanteling, sortering) & chemie (PV componenten)
Policy Studies	Trekker aanwijzen, positie bepalen, rapporteren en bediscussiëren in denktank Literatuur volgen op gebied consumenten gedrag in relatie tot materiaal schaarste (if any) Consumentengedrag inzameling voor recycling t.b.v. schaarse metalen Vorbereiden beleidsmaatregelen energietransitie mede gebaseerd op materiaal efficiëntie en uitputting (naast bijvoorbeeld CO2 reductie) Prijsmechanismen grondstoffen, en kosten/prijsmechanismen bijproducten, prijselasticiteit toepassen op metalen voor duurzame energie Herkennen van mogelijk ongewilde effecten van beleidsmaatregelen op versnelde materiaaluitputting (zoals bij de verplichte introductie van spaarlampen, het bevorderen van EV).

7.4 Nieuwe onderwerpen en expertises

Onderstaande onderwerpen zijn relatief nieuw voor ECN en zouden in een soft programma duurzaamheid kunnen passen. Ze zijn ambitieus, maar relevant voor materiaal schaarste in relatie tot duurzame energie.

- Kennis van materiaal risico's die gelden voor *enabling* technologieën zoals energie opslag, het elektriciteitsnetwerk maar ook innovatieve productiemachines, en de *supply chains*.
- Kennis van prijsmechanismen- en prijselasticiteit van schaarse metalen die worden gebruik in duurzame energie technologieën én die in competitie zijn met andere toepassingen. Voorbeelden zijn indium in CIGS dunne film PV maar ook grootschalig toegepast in flat-panel display, zilver in metallisatie van kristallijn silicium zonnecellen maar ook voor sieraden, zeldzame aarden in permanente magneten voor wind maar ook voor elektrisch vervoer; wie wint, wie verliest? Welke beleidsmaatregelen zijn mogelijk?
- Recycling en design-for-recycling (*cradle-to-cradle*) van duurzame energie technologie. Hierbij ook kennis van de energievraag en milieu impact van recycling

relatief t.o.v. de primaire productie van metalen; welke nieuwe reststoffen komen beschikbaar? Case studie uitwerken?

- Levenscyclus kosten: de kosten van productie, toepassing, onderhoud én recycling/eindberging, dus van de volledige productcyclus. We beperken ons teveel tot productie- en onderhoudskosten, wat in de toekomst niet genoeg zal zijn.
- Uitbreiding van onze kennis op gebied van systeem analyse: toevoegen van materiaal efficiëntie en *footprint* (naast kosten, milieu impact, energie efficiëntie, CO₂ footprint)
- Self-healing en levensduurverlenging als belangrijke oplossingsrichtingen voor materiaal schaarste en recycling (expertise bij EEE? zie o.a. ref [39] voor relevantie en voorbeelden)

7.5 Fundamentele vragen voor ECN

Onderstaand enkele meer fundamentele onderwerpen waar ECN zich prima mee zou kunnen profileren. Een denktank is hiervoor een goed middel.

- Kunnen we ons veroorloven om, bij groeiende schaarste, toxische metalen niet te gebruiken voor duurzame energie toepassingen als deze toxische metalen hoe dan ook vrijkomen bij de mijnbouw? Voorbeelden zijn Cd, U en Pb. Hoe gaan we daarom om met synergie situaties zoals zeldzame aarden en U of In en Cd. Wat kan ECN bijdragen aan het “balancing problem”? Dat is het gebruik van metalen zoveel mogelijk afstemmen op de aanwezige minerale fracties van de metalen (voorbeeld is ook hier de reeks zeldzame aarden). Kunnen we technologieën ontwikkelen gebaseerd op Ce, Te?
- Zijn maximale technische prestaties/lage kosten/energie efficiëntie onze voornaamste drijfveren, of een zo laag mogelijke materiaal- en koolstof-*footprint*? Of is een combinatie mogelijk? Denk bijvoorbeeld aan het dilemma van FeNdB permanente magneten die erg weinig wegen en daardoor voor hybride vervoer leiden tot grote verlaging van energieverbruik maar wel een grote aanslag betekenen op Dy voorraad. In hoeverre kan systeem optimalisatie rekening houden met materiaal uitputting? Naast energie efficiëntie, kosten en milieu effecten zou dit een van de te optimaliseren parameters kunnen zijn, zeker wanneer zeer grote energie systemen worden beschouwd.
- Waar speelt bij ECN het Jevons’ paradox? Wat kunnen we hiervan leren? *Jevons’ paradox is the proposition that technological progress that increases the efficiency with which a resource is used tends to increase (rather than decrease) the rate of consumption of that resource.*
- Is voor duurzame energieopwekking op de zeer lange termijn (>2050) een materialen evenwicht mogelijk? Dat wil zeggen geen verdere netto onttrekking van metalen uit de aardkorst. In hoeverre kan dit worden bereikt door bijvoorbeeld een sterke reductie van materiaalverbruik, substitutie en recycling, aannemende dat de energievraag zal stabiliseren of zelfs verminderen? Of moet de energievoorziening hiervoor worden gebaseerd op elementen waarvoor in ieder geval de EU

zelfvoorzienend kan zijn? Of de *elements-of-hope*? Hoe zou dit laatste eruit kunnen zien?

- In hoeverre kan duurzame energie een bijdrage leveren aan de enorme energievraag die zal ontstaan bij intensivering van de mijnbouw en productie van steeds schaarser wordende metalen? Deze energievraag zal i.h.a. zeer lokaal zijn, op moeilijk toegankelijk terrein.
- In hoeverre zijn beschikbaarheid van andere belangrijke *resources* zoals water, energie en *human capital* een risico voor duurzame energie?

Referenties

- 1 **Re-Supply**, ideation challenge 2013 project nr 52497, Mei-December 2013
- 2 B. Lee *et al.*, **Resources Futures**, A Chatham House Report, December 2012
- 3 Ton Veltkamp, **Materials depletion, another inconvenient truth**, lunch colloquium ECN 2 December 2013
- 4 D.H. Meadows *et al.*, **The Limits to Growth: A Report to the Club of Rome's on the Predicament of Mankind** (1972)
- 5 U.S. Department of Energy, **Critical Materials Strategy** (2011)
- 6 R.L. Moss *et al.*, **Critical Materials in Strategic Energy Technologies, Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies**, EUR 24884, JRC-Institute for Energy and Transport, Oakdene Hollins Ltd & The Hague Centre for Strategic Studies (2011)
- 7 **Critical Materials for Sustainable Energy Applications**, Resnick Institute, California (September 2011)
- 8 **Op weg naar een Grondstoffenstrategie, Quick scan ten behoeve van de grondstoffennotitie**, The Hague Centre for Strategic Studies, TNO & CE Delft, report 08/06/11 (2011)
- 9 B. Buijs *et al.*, **Critical Thinking about Critical Minerals, Assessing risks related to resource security**, Clingendael & BGR (November 2011)
- 10 G. Turner, **A Comparison of The Limits to Growth with Thirty Years of Reality**, CSIRO (Juni 2008)
- 11 J. Koorosky *et al.*, **Scarcity of Minerals, A Strategic Security Issue**, The Hague Centre for Strategic Studies 02/01/10 (2010)

- 12 OECD, ***Sustainable Materials Management***, OECD Green Growth Policy Brief (2012), zie ook ref. 2 pg. 15
- 13 B. Achzet et al., ***Materials Critical to the Energy Industry, An Introduction***, University of Augsburg (2012)
- 14 U.S. Geological Survey, ***Mineral Commodity Summaries 2012***
- 15 B.J. Skinner, ***Exploring the Resource Base***, Yale University 2001
- 16 S. Scott, ***Mining the Oceans***, Mining Magazine (November 2012)
- 17 A. Manhart et al., ***Conflict Minerals - An Evaluation of the Dodd-Frank Act and Other Resource-Related Measures***, Öko-Institut e.V., August 2013
- 18 A.M. Diederer, ***Metal Minerals Scarcity: A Call for Managed Austerity and the Elements of Hope***, TNO, Maart 2009
- 19 R. Kirchain and El. Alonso, ***Materials Availability and Recycling***, in: Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability, Cambridge University Press (2012)
- 20 Scholz & Wellmer, USGS 2013
- 21 zie referentie 8
- 22 M. Schouten, ***Mining the Seafloor***, IHC Mining B.V., October 2013
- 23 Bron voor figuur: Hagelucken/Umicore 2012
- 24 T.E. Graedel et al., ***Recycling Rates of Metals, a Status Report***, UNEP 2011
- 25 P. Chancerel et al., ***Assessment of Precious Metal Flows During preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment***, Journal Industrial Ecology, 13(5) 791-810
- 26 A. Anctil and V. Fthenakis, ***Critical Metals in Strategic Photovoltaic Technologies: Abundance versus recyclability***, in Progr. Photovolt: Res. Appl. 2013 (21) 1253-1259
- 27 W.S. Jevons, ***The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines***. London, Macwillam and Co. (1865)
- 28 ***International Technology Roadmap for PV (ITRPV)***, Semi/PV Group (2011)
- 29 R.L. Moss et al., ***Critical Metals in the Path Towards Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies***, EUR 25994, JRC-Institute for Energy and Transport, Oakdene Hollins Ltd & Fraunhofer Institute for Systems and Innovations Research (2013)

- 30 B.A. Andersson, **Materials Availability for Large Scale Photovoltaics**, in Progr.Photovolt: Res.Appl. 8, 71-76 (2000)
- 31 D. Schöler *et al.*, **Study on Rare Earths and Their Recycling, Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament**, Öko-Institut e.V. (January 2011)
- 32 M.A. Green, **Rare Materials for Photovoltaics: Recent Tellurium Price Fluctuations and Availability from Copper Refining**, Solar Energy Materials & Solar Cells 119 (2013) 256-260
- 33 K. Zweibel, **The Impact of Tellurium Supply on Cadmium Telluride Photovoltaics**, Science 7 (328) (2010) 699-701
- 34 V. Fthenakis, **Sustainability of Photovoltaics: The Case for Thin-film Solar Cells**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2746-2750
- 35 R.L. Jaffe, **Unobtainium? Critical Elements and New Energy Technologies**, APS March meeting, 2011 Dallas
- 36 C. Candelise *et al.*, **Implications for CdTe and CIGS Technologies Production Costs of Indium and Tellurium Scarcity**, Progr.Photovolt: Res.Appl. 2012 (20) 816-831
- 37 H. Held, **Life Cycle Assessment of CdTe Module Recycling**, 24th EPVSEC, 2009, 3CO 7.4
- 38 U. Liephold, **Resource Efficiency in the Field of Scarce Raw Materials**, Siemens AG, Costs symposium Delft (December 2013)
- 39 **Self healing Materials, Concepts and Applications**, NL Agency, Ministry of Economic Affairs, second edition version 2013

ECN

Westerduinweg 3
1755 LE Petten

Postbus 1
1755 LG Petten

T 088 515 4949
F 088 515 8338
info@ecn.nl
www.ecn.nl