



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Materials and energy : a story of linkages

Kleijn, E.G.M.

Citation

Kleijn, E. G. M. (2012, September 5). *Materials and energy : a story of linkages*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/19740>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/19740>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/19740> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Kleijn, René

Title: Materials and energy : a story of linkages

Date: 2012-09-05

Samenvatting

In dit proefschrift zijn methoden en technieken uit het veld van Industriële Ecologie samengebracht met een bredere systeemanalyse om de problemen te analyseren die gerelateerd zijn aan schaarste van materialen, de energietransitie en klimaatverandering.

Hoofdstuk 1 Inleiding

Hoofdstuk 1 is de inleiding. Het geeft een overzicht van het brede debat over het metabolisme van de maatschappij, met een focus op de schaarste van natuurlijke hulpbronnen. Ook worden in dit hoofdstuk de onderstaande onderzoeksvragen gedefinieerd.

1. Hoe belangrijk zijn metalen geweest voor de ontwikkeling van de mensheid ?
2. Hoe heeft het debat rondom de schaarste van metalen zich door de eeuwen heen ontwikkeld ?
3. Wat is de metaalbehoefte van een transitie naar een koolstofarm energiesysteem ?
4. Leidt deze metaalbehoefte, samen met de vraag naar metalen voor andere toepassingen, tot een significante schaarste op korte en middellange termijn ?
5. Welke mogelijkheden en beperkingen bieden de methoden en technieken uit de Industriële Ecologie en aangrenzende vakgebieden om de werkelijke complexiteit van materiaalstromen mee te nemen in duurzaamheidsanalyses?

Hoofdstuk 2 Een korte geschiedenis van het belang van metalen voor de mensheid en het debat over de schaarste van deze metalen

Metalen die in hun metallische vorm voorkomen op aarde (goud, zilver, koper en ijzer-nikkel legeringen) zijn zeer zeldzaam en worden al sinds de prehistorie gebruikt als curiosa en sieraden. Op onze planeet zijn metalen een vreemde eend in de bijt en zeer verschillend van het biotische en steenachtig materiaal dat de belangrijkste ingrediënten vormden van het milieu van de vroege mens. Sinds er processen werden ontwikkeld om metalen uit hun erts te onttrekken, circa 600 jaar geleden, zijn metalen belangrijk geweest voor de ontwikkeling van complexe samenlevingen. De ruime beschikbaarheid van metalen heeft belangrijke voordelen opgeleverd voor de jacht, oorlogsvoering, landbouw, industrie en stedenbouw. Samenlevingen die de technologie beheersten om brons te maken hadden daarmee een belangrijke voorsprong in het maken van beter gereedschap en een betere uitrusting van zowel soldaten als ambachtslieden. Het feit dat brons gemaakt wordt uit twee verschillende metalen (voornamelijk koper en tin) met een verschillende geografische spreiding, vergrootte het belang van zowel de handel over grotere afstanden als de afhankelijkheid van buitenlandse toevoer van grondstoffen. Het versterkte daarmee ook de drang naar het veroveren van grondstofrijke gebieden.

Zowel koper als tin zijn relatief schaarse elementen vergeleken met ijzer, dat op dit moment ongeveer 90% van alle gewonnen metalen vertegenwoordigt. Het belang van

metalen werd daarom aanzienlijk groter toen zo'n 3000 jaar geleden de technologie werd ontwikkeld om bruikbaar ijzer te produceren uit ijzererts. In deze periode werd de materiële basis van de samenleving echter nog steeds sterk gedomineerd door op silicium gebaseerde materialen, met hout als belangrijkste bron van energie. Aan het einde van het Romeinse rijk (200) en in het Verenigd Koninkrijk en andere Europese landen in de periode van de 16^e tot en met de 18^e eeuw werd de beschikbaarheid van hout een beperkende factor voor de metaalproductie (voornamelijk ijzer, koper en tin). Dit veranderde gedurende de industriële revolutie en de periode van snelle technologische ontwikkeling die volgde met de introductie van kolen als een goedkope en overvloedige energiebron.

De uitvinding van de techniek om cokes te produceren, zorgde ervoor dat kolen als brandstof en reductiemiddel kon worden gebruikt in plaats van houtskool dat was afgeleid van hout, is een voorbeeld van een technologische doorbraak die een eerder schaarse probleem oploste. Deze technologie was een van de vele doorbraken tijdens de industriële revolutie, welke gezamenlijk gezorgd hebben voor een periode van snelle economische groei en globalisering. Deze groei ging gepaard met een enorme groei in de consumptie van metalen zoals als ijzer, koper, zink, tin, en lood. Deze metalen waren nodig voor de nieuwe infrastructuur zoals spoorwegen, bruggen en moderne steden maar ook om stoommachines, treinen, schepen en later ook auto's te produceren. Tegelijkertijd leverden deze nieuwe uitvindingen en infrastructuur de apparatuur, machinerie en industrie die nodig waren voor grootschalige mijnbouw en opwerking. Stoomschepen en treinen zorgden voor goedkoop bulktransport zowel over zee als over land van voedsel, textiel en andere goederen. In de late 19^e eeuw maakte de grootschalige introductie van elektriciteit het mogelijk om het enige metaal dat nog rijkelijker in de aardkorst aanwezig is dan ijzer, aluminium, vrij te maken uit het erts.

Ongeveer een eeuw na het begin van de industriële revolutie werd uitputting van biotische en abiotische grondstoffen door overheden en wetenschappers als probleem erkend. Dit resulteerde in een sterke beweging van natuurbeschermers, onder andere geleid door Theodore Roosevelt, en welke in de VS leidde tot wetgeving op het gebied van het gebruik van natuurlijk hulpbronnen en het oprichten van nationale parken. In diezelfde periode ontwikkelde economen zoals Gray (1914) en Hotelling (1931) het eerste theoretische raamwerk van de zogenaamde "exhaustion theory"

In de OECD volgde na de Tweede Wereldoorlog een nieuwe periode van snelle economische ontwikkeling en de daaraan gekoppelde urbanisatie, uitbreiding van infrastructuur en de opkomst van massaconsumptie. De beschikbaarheid van goedkope energie gecombineerd met snelle technologische vooruitgang leidde tot een overvloedige beschikbaarheid van goedkope consumentenproducten. Dit alles zorgde voor een snel groeiende vraag naar minerale grondstoffen die nodig waren om deze goederen te produceren.

De aanvoer van deze grondstoffen werd echter gehinderd door de beperkte beschikbaarheid van grondstoffen in de ontwikkelde landen, de verzwakte koloniale banden en de verstoring van de normale handelspatronen als gevolg van het begin van de koude oorlog. Gedurende deze periode van snel groeiende vraag naar grondstoffen en instabiele wereldpolitiek werd door de Amerikaanse regering in 1951 de Paley Committee opgericht om het probleem van schaarse grondstoffen te duiden en om aanbevelingen te doen voor een alomvattend grondstoffenbeleid. In hun baanbrekende rapport heeft deze commissie de hoofdlijnen van het schaarste debat beschreven, met inbegrip van mogelijke beleidsopties en onderzoekslijnen. Ze beschreef het schaarste debat in termen van grondstoffen die steeds lastiger te winnen zijn in plaats van een probleem van absolute uitputting. De commissie onderkende dat materiaal schaarste een probleem zou worden lang voordat de laatste gram erts gewonnen zou zijn, simpelweg omdat de economische, ecologische en sociale kosten te hoog zouden worden. De commissie was verdere sterk gekant tegen zelfvoorzienendheid als leidend principe om een stabiele aanvoer van grondstoffen te garanderen. De commissie koos daarentegen voor het "Least Cost Principle": het belangrijkste doel van het grondstoffenbeleid zou moeten zijn om de industrie in de VS van zo goedkoop mogelijke grondstoffen te voorzien. Ze legde de nadruk daarom ook op internationale vrijhandel en het investeren in grondstofrijke landen als zaken die door beleidsmakers zouden moeten worden nagestreefd. Hoewel het Paley rapport een mijlpaal was in de discussie rondom uitputting van grondstoffen volgde tussen de Koreaanse oorlog en de oliecrisis in de jaren 70 een periode waarin de grondstofprijzen daalden en waarin er relatief weinig aandacht was voor schaarste. De dalende grondstofprijzen werden deels veroorzaakt door de ontwikkeling van mammoetschepen die werd getriggerd door de Suez crisis van 1956-1957. Deze enorme vrachtschepen zorgden ervoor dat de prijzen van transport van goederen nog verder daalde hetgeen de globalisering van de handel in goedkope bulkproducten zoals ijzererts en kolen vereenvoudigde.

In 1968 werd de Club van Rome opgericht en in 1972 verscheen hun rapport "Grenzen aan de Groei". Ongeveer een jaar later, in oktober 1973, was de eerste oliecrisis een feit en de afhankelijkheid van grondstoffen zoals deze werd beschreven in het rapport verschoof daarmee van een wetenschappelijke exercitie naar een gebeurtenis die in veel delen van de wereld het dagelijks leven ingrijpend veranderde. De oliecrisis toonde de onderlinge afhankelijkheid van economieën en de kwetsbaarheid van grondstof importerende landen bij problemen in de aanvoer aan. Net als het Paley report, initieerde het rapport van de Club van Rome een debat over schaarste en veel aspecten van dit debat kunnen direct vertaald worden naar het huidige debat. In februari 1976 was een heel nummer van het wetenschappelijke tijdschrift Science gewijd aan materialen, met een focus op schaarste. Veel van de onderwerpen die hierin werden besproken kunnen ook weer min of meer direct worden vertaald naar de huidige discussie. Leveringszekerheid, de aanleg van strategische voorraden, zelfvoorzienendheid, recycling en dematerialisatie waren hiermee terug op de politieke agenda. Deze periode van aandacht voor schaarste werd echter opnieuw gevolgd door een periode met een relatieve overvloed aan goedkope

grondstoffen. Mammoetschepen werden steeds groter hetgeen gecombineerd met historisch lage brandstofprijzen leidde tot extreem lage transportkosten. De opschaling van de mijnbouw zorgde voor dalende prijzen van grondstoffen ondanks een jaarlijkse groei in productie van rond de 3%. De prijzen van metalen bleven laag tot wat wordt aangeduid als de “great metals boom” die begon in 2002. Deze periode van sterk stijgende prijzen was het resultaat van een sterke groei in opkomende landen, met name China. In deze periode stegen de inflatie gecorrigeerde prijzen van ‘non-fuel’ goederen bijna met een factor twee. Hoewel de financiële crisis van 2008 een significante daling in prijzen veroorzaakte zijn ze nooit meer teruggekomen op het niveau van voor 2002. In februari-maart 2011 piekte de prijzen nogmaals op een niveau dat 20% hoger lag dan de piek in 2008. Vervolgens veroorzaakte de Europese monetaire crisis nieuwe zorgen over de wereldeconomie waarna de grondstofprijzen weer daalden. In november 2011 waren de prijzen van ‘non-fuel’ goederen weer terug op het niveau van de piek in 2008. In de periode tussen 2002 en 2011 uitten een aantal auteurs die zeer bekend zijn met de mijnbouw bezorgdheid over de aanvoer van metalen. Afnemende ertskwaliteit, kleinere nieuwe vondsten, beperkingen als gevolg van water- en energiegebruik en zorgen over lokale en mondiale milieueffecten van de mijnbouw werden allemaal genoemd als oorzaken van problemen in de aanvoerlijnen.

Als een reactie op deze periode van hoge metaalprijzen en de recente toevoerproblemen van bepaalde zeldzame (aard)metalen, hebben veel overheden, NGO's en onderzoeksinstellingen rapporten uitgebracht waarin materialen worden aangewezen als kritiek voor de lokale en mondiale economie. Alle belangrijke wereldeconomieën zijn op dit moment bezig met onderzoek naar de mogelijke gevolgen van metaal schaarste. Ook worden de verschillende beleidsmaatregelen tegen het licht gehouden waaronder de WTO mechanismen om vrije internationale handel te garanderen, het aanleggen van strategische voorraden en het maken van bilaterale afspraken met exporterende landen. De oprichting van het ‘Resource Panel’ door de Verenigde Naties is een duidelijk signaal dat de internationale gemeenschap zaken gerelateerd aan natuurlijke hulpbronnen een belangrijk onderwerp vinden voor de komende decennia.

Hoofdstuk 3: Materiaalgebruik als beperkende factor voor een op hernieuwbare energie gebaseerde waterstofeconomie.

In een moderne maatschappij zijn er vele complexe verbanden tussen het gebruik van verschillende natuurlijke hulpbronnen. Het gebruik van energie en materialen is in twee richtingen met elkaar verbonden. Ten eerste is er energie nodig voor mijnbouw en opwerking van ertsen om deze om te zetten in bruikbare materialen. Ten tweede zijn materialen nodig om fossiele brandstoffen te winnen en op te werken (bijv. olie raffinaderijen, elektriciteitscentrales en transformatoren), ze te transporteren (mammoetschepen, pijpleidingen en bovenleidingen) en om energie te winnen uit diffuse bronnen (bijv. windturbines, zonnecellen en waterkrachtcentrales).

In Hoofdstuk 3 wordt een kwantitatieve analyse gemaakt van de grondstoffen die nodig zijn om in 2050, uitgaande van huidige technologieën, een mondiaal

energiesysteem te hebben dat volledig is gebaseerd op hernieuwbare energie, met elektriciteit en waterstof als de twee belangrijkste energiedragers. De hoeveelheid beschikbare energie is geen beperkende factor voor een energiesysteem gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen. Zelfs in een extreem groeiscenario van het energiegebruik tot circa 1300 EJ/jaar in 2050 zouden huidige technologie wind- (15%) en zonne-energie (80%) toereikend zijn, hetgeen 5% over zou laten voor andere hernieuwbare energie.

Om het aantal benodigde zonnecellen en windturbines te minimaliseren is het belangrijk om locaties te kiezen waar de omstandigheden optimaal zijn. Met name voor zonne-energie zijn deze locaties vaak ver verwijderd van de locaties waar de energie gebruikt zal worden. Daarom zijn uitgebreide transmissie netwerken nodig om de energie naar de juiste plaats te transporteren.

De keuze voor een (energie)technologie is zeer bepalend voor de hoeveelheid en het type grondstof dat nodig is. In drie cruciale delen van het systeem zijn relatief schaarse elementen cruciaal voor specifieke technologieën: tellurium en indium in dunne-film zonnecellen, neodymium in direct-drive windturbines en elektromotoren met permanente magneten, en platina in elektrolyse en brandstofcellen. De hoeveelheid benodigde grondstoffen zorgt ervoor dat deze technologieën nooit een substantiële bijdrage kunnen leveren aan de energievoorziening (honderden exajoules). In al deze gevallen zijn alternatieve technologieën denkbaar maar deze zijn vaak kostbaarder en/of minder efficiënt.

In dit scenario zijn ook grote hoeveelheden staal nodig voor zowel windturbines als waterstofpijpleidingen: voor windturbines ongeveer zes keer de huidige jaarlijkse wereldproductie en voor pijpleidingen ongeveer 40% van de huidige jaarlijkse productie. Als voor de pijpleidingen roestvrij staal zou worden gebruikt zou daarvoor 45 maal de huidige jaarlijkse nikkelproductie en 5500 maal die van chroom nodig zijn. Wanneer elektriciteit wordt gebruikt als belangrijkste energiedrager zou ongeveer 70 maal de huidige jaarlijkse productie nodig zijn terwijl voor de benodigde windturbines nog eens 4 maal de huidige jaarlijkse productie nodig zou zijn.

Hoofdstuk 4: Metaalgebruik in koolstofarme elektriciteitsproductie

Ongeveer 40% van de wereldwijde emissie van CO₂ komt vrij bij de productie van elektriciteit. In Hoofdstuk 4 wordt een analyse gemaakt van het metaalgebruik van koolstofarme elektriciteitsproductie. De CO₂ emissies en het metaalgebruik van elektriciteit uit wind, PV, biomassa en fossiele brandstoffen met CO₂ afvang en opslag zijn bepaald met behulp van een LCA benadering. Alle drie gepresenteerde elektriciteitsmixen resulteren in een vermindering van de CO₂ emissie van ongeveer 80-90%. Als in alle andere sectoren een vergelijkbare emissiereductie zou worden gerealiseerd zou de doelstelling om het CO₂ niveau in de atmosfeer te stabiliseren op 450-490 ppm haalbaar zijn.

In alle drie de gevallen zal dit echter gepaard gaan met een hoger metaalgebruik. Het toevoegen van CCS aan de huidige elektriciteitsmix zou de jaarlijkse vraag naar nikkel en molybdeen met zo'n 10-30% vergroten. Dit is een logisch gevolg van de additionele infrastructuur die nodig is voor het afvangen, het transport en de opslag van de CO₂ (speciale staalsoorten), in combinatie met lager rendement van de centrales zelf. Het overschakelen naar een elektriciteitsmix gebaseerd op niet-fossiele energiebronnen zal een veel grotere vraag naar nikkel, uranium, zilver, molybdeen, en in mindere mate, koper en aluminium tot gevolg hebben. Voor PV, biomassa (op afval na) en wind zit deze vergroting in de range van een paar procent tot een factor 1000. Dit betekent dat de winning van deze metalen sterk zal moeten worden uitgebreid om aan de vraag te kunnen voldoen. Niet alle niet-fossiele technologieën zijn metaalintensiever dan fossiele brandstof gebaseerde elektriciteit. Voor kernenergie, waterkracht en biomassa afval zijn relatief weinig metalen nodig, met uitzondering van uranium voor kernenergie. In het geval van PV en wind zijn de metalen met name nodig voor de productie van de PV zonnecellen en windturbines zelf. Voor gecultiveerde biomassa komt de vraag naar metalen vooral voort uit de materiaal intensieve landbouwprocessen, waaronder de productie van landbouwmachines en kunstmest.

De afgelopen decennia was in veel ontwikkelde landen een trend zichtbaar van een afnemende materiaalintensiteit per eenheid BNP. Wanneer klimaatverandering deze landen dwingt om over te schakelen op alternatieve energiebronnen, zal deze trend in de energiesector worden doorbroken. Het soort materiaal dat nodig is hangt sterk af van de keuze voor specifieke technologieën. Zo wordt de hoge zilverbehoefte in PV met name veroorzaakt door de keuze voor mono-kristallijne silicium cellen. Andere PV technologieën kennen echter weer hun eigen materiaal gerelateerde problemen. De huidige dunne film CdTe en CIGS gebaseerde cellen zullen geconfronteerd worden met de schaarste van de benodigde grondstoffen lang voordat ze een significante bijdrage leveren aan de elektriciteitsproductie. De 2 MW offshore windturbines met een versnellingsbak die gebruikt wordt in de berekeningen in Hoofdstuk 4 bevatten geen neodymium gebaseerde permanente magneten. Echter, veel van de nieuwe direct-drive turbines die weinig onderhoud vergen, bevatten zo'n 150 kg neodymium per MW. Het opschalen van deze technologie tot een niveau van tientallen GW zou een geweldige opschaling vergen van de huidige jaarlijkse productie van dit zeldzame aardmetaal die op dit moment 18000 ton per jaar bedraagt. De Chinese overheid heeft recent aangekondigd dat de te installeren capaciteit van windenergie in 2050, 1000 GW zou moeten bedragen. Wanneer al deze turbines op de direct-drive technologie gebaseerd zouden zijn, zou hiervoor 30 maal de huidige jaarlijkse wereldproductie van neodymium nodig zijn waardoor er weinig zou overblijven voor andere landen en toepassingen.

Hoofdstuk 5: Metaalschaarste: acute dreiging, eeuwigdurend probleem of dwaalspoor

In Hoofdstuk 5 worden de diverse aspecten van vraag en aanbod van metalen geanalyseerd. In combinatie met de andere hoofdstukken wordt de kwestie besproken of de metaalbehoefte van de energietransitie, gecombineerd met gebruik in andere sectoren zal leiden tot een significante schaarste op korte en middellange termijn.

Ondanks het feit dat de planeet Aarde eindig is, is de omvang van de voorraden nog geen beperkende factor geweest voor de productie van metalen. Hoewel de ertskwaliteit achteruit gaat zijn de voorraden metaal in laagwaardige erts tot nog toe steeds groter gebleken dan die in de hoogwaardige erts. Uiteindelijk zijn er altijd nog ultieme reserves in de vorm van oceaanwater en veelvoorkomende gesteenten. Tot op heden zijn de beschikbare voorraden van vrijwel alle metalen in omvang gegroeid in plaats van gekrompen, ondanks, of misschien wel juist vanwege, een exponentiële groei in winning. Dit is echter geen garantie dat de productie de komende decennia de exponentiële groei in vraag kan blijven bijhouden.

De schaal waarop materialen aan het milieu worden onttrokken is groter dan ooit. Globalisering, deels gedreven door goedkoop massatransport, heeft vrijwel elke uithoek van de wereld toegankelijk gemaakt voor exploratie en mijnbouw. Globalisering is echter eindig. De overgebleven onontdekte voorraden liggen vrijwel allemaal in gebieden waar de mijnbouw moeilijk zal zijn of onder een laag van één of meer kilometer gesteente. Bovendien lijken de kosten van massatransport hun laagste punt te hebben bereikt als gevolg van beperkingen in de opschaling van mammoetschepen en stijgende brandstofkosten.

De snelheid waarmee metalen kunnen worden gewonnen is beperkt, analoog aan conventionele olie. De snelheid van winning wordt beperkt door de beschikbaarheid van geschoolde arbeiders, de benodigde energie en, niet onbelangrijk, de milieugevolgen van de winning. In de twee periodes in het recente verleden waarin de prijzen van metalen hoog waren (jaren 50 en 80) werden deze hoge prijzen veroorzaakt door een snel groeiende vraag gecombineerd met onzekerheid over de toevoer naar de OECD. Hoewel in de huidige geglobaliseerde wereld de snel groeiende vraag nog steeds een belangrijke factor is, is de geopolitieke onzekerheid over de toevoer nu een mondiaal probleem geworden. Daarnaast zijn er op dit moment ook problemen zichtbaar bij winning. Mijnbouwbedrijven hebben grote moeite om de vraag bij te houden om allerlei redenen, waaronder teruglopende ertskwaliteit, nieuwe ertslagen die kleiner zijn en dieper liggen en milieueisen.

Daarnaast leven we in een tijd waarin we voor het eerst echt op wereldschaal worden geconfronteerd met de verbondenheid van de verschillende natuurlijke hulpbronnen. Als de ertskwaliteit achteruit gaat, is er meer energie nodig om metalen te winnen uit de erts terwijl we tegelijkertijd meer metalen nodig hebben voor de energietransitie die nodig is om het klimaatprobleem het hoofd te bieden. Watergebruik, ruimtelijke ordening en milieueffecten leggen additionele beperkingen op aan de productie van

metalen. Deze elkaar versterkende grenzen aan de groei zullen een uitdaging vormen voor toekomstige generaties. Als we voor de hand liggende beperkingen als gevolg van materiaalschaarste willen voorkomen, zullen we onze technologieën zorgvuldig moeten kiezen.

De vraag naar metalen zal de komende decennia exponentieel blijven stijgen. Een van de belangrijkste oorzaken is de snelle verstedelijking welke zal leiden tot een massale groei van steden en bijbehorende infrastructuur. Bovendien zal de economische groei in de opkomende economieën leiden tot de productie van steeds meer complexe producten, en daarmee groeiende vraag naar metalen. De transitie naar een duurzame koolstofarme energievoorziening vraagt ook een omvangrijke stroom materialen. Voor sommige metalen zal dit betekenen dat de huidige productie enkele malen zal moeten worden opgeschaald. Het meest cruciale aspect is echter dat we al deze metalen in de komende decennia nodig hebben om klimaatverandering het hoofd te kunnen bieden.

Het is zeer onwaarschijnlijk dat de optimisten doctrine van steeds maar groeiende voorraden en dalende prijzen de komende decennia waar zal blijven. Wanneer de voorspellingen voor verstedelijking bewaarheid worden en wanneer klimaatverandering substantieel wordt aangepakt, zullen we de komende decennia het equivalent bouwen van alle steden die er nu zijn, zal het gemiddelde inkomen per capita met een factor drie toenemen en bouwen we vanuit niets een geheel nieuw duurzaam energiesysteem. Mijnbouw en exploratie worden op dit moment al geconfronteerd met beperkingen als gevolg van milieueffecten en water-, land- en energiegebruik en hebben daarom nu al moeite om de vraag bij te houden. Een ruime beschikbaarheid van metalen is niet alleen nodig voor de productie van onze favoriete gadgets, het is ook onmisbaar om in 2050 negen miljard mensen van voedsel, onderdak en duurzame energie te voorzien.

Hoofdstuk 6 Het combineren van IE en IEA methoden: de PVC case

In hoofdstuk 6 wordt een case studie van een fictief verbod op PVC gebruikt om aan te tonen dat zelfs de complexiteit in een beperkt onderdeel van het industrieel complex, de chloorindustrie, een substantiële invloed kan hebben op de uitkomst van de analyse. Noch de methoden van de Integrated Environmental Assessment, noch die van de Industrial Ecology zijn in staat de connecties die binnen de chloorindustrie bestaan volledig in beschouwing te nemen.

Met LCA ontstaat een beeld van veranderingen in een grotere groep milieuaspecten wanneer PVC wordt vervangen door andere materialen. Met SFA wordt het belang van de chloorketen duidelijk. De reikwijdte van methoden zoals LCA en SFA is echter beperkt omdat de analyse van de milieueffecten in deze methoden generiek is. Het beeld blijft gefragmenteerd en onvolledig.

Alle methoden en modellen die we gebruiken zijn slechts een beperkte afspiegeling van de werkelijkheid en dus per definitie minder gedetailleerd. Dit betekent dat niet alle verbanden kunnen worden meegenomen in de methoden en modellen die worden gebruikt.

Zelfs een combinatie van deze methoden is ontoereikend om alle effecten in beschouwing te nemen. Er is duidelijk behoefte aan een bredere systeemanalyse die kan worden gebruikt om de daadwerkelijke gevolgen van een verbod op PVC te analyseren, nog voordat specifieke methoden voor nadere analyse worden gekozen. De vorm van deze bredere systeemanalyse kan variëren van een materiaal- en productstroombiagram tot een dynamische en gekwantificeerde analyse. Pas nadat een dergelijke analyse duidelijk heeft gemaakt wat er waarschijnlijk in de praktijk zal gebeuren is de tijd gekomen om specifieke IEA, IE methoden of een combinatie daarvan te selecteren om de gevolgen van beleid en/of activiteiten te kwantificeren. Dit is niet hetzelfde als het simpelweg kiezen van de juiste methode of het juiste model en of de juiste parameters. Een brede systeemanalyse kan niet worden gestandaardiseerd, deze verschilt van geval tot geval en is een op maat gemaakte holistische analyse. Recente ontwikkelingen op het gebied van *Life Cycle Sustainability Analysis* kunnen gezien worden als een stap in deze richting.

Hoofdstuk 7 Overall conclusions, algemene discussie en onderzoeksagenda

In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd in de vorm van een reeks conclusies. De belangrijkste reflecteren op de centrale onderzoeksvragen uit Hoofdstuk 1 en hebben betrekking op het belang van metalen in de menselijke geschiedenis, de ontwikkeling van het debat over grondstofschaarste met een focus op metalen, de metaalbehoefte van de energietransitie en de bruikbaarheid van Industrial Ecology methoden om de milieugevolgen van grootschalige transitie te analyseren. Dit proefschrift wordt afgesloten met een algemene discussie en een voorstel voor een onderzoeksagenda.

