

In kringetjes vooruit.
De circulaire economie als recept voor duurzaamheid.

Oratie in verkorte vorm uitgesproken door

Prof.dr. Arnold Tukker

bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar

Industrial Ecology

aan de Universiteit Leiden

op vrijdag 26 februari 2016



**Universiteit
Leiden**

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	De opgave: naar een klimaatneutrale economie die natuurlijke hulpbronnen in stand houdt	5
3	Circulariteit: de oplossing?	7
3.1	<i>Inleiding</i>	7
3.2	<i>Punt 1: Energie, voeding: veel materiaalgebruik is inherent lineair</i>	7
3.3	<i>Punt 2: Veel landen bouwen nog nieuwe infrastructuur – de grondstoffen daarvoor haal je dus (nog) niet uit recycling</i>	8
3.4	<i>Punt 3: Ontkoppeling helpt – maar niet oneindig</i>	9
3.5	<i>Toch: juist daarom aan de slag!</i>	9
4	De onderzoeksagenda voor het Leiden-Delft-Erasmus Centre for Sustainability	10
4.1	<i>Inleiding</i>	10
4.2	<i>Lijn 1: Technologie</i>	11
4.3	<i>Lijn 2: Business, design, consumenten</i>	12
4.4	<i>Lijn 3: Governance en transitie-management</i>	13
4.5	<i>Lijn 4: Natuurlijke hulpbronnen en economie</i>	14
5	De onderzoeksagenda voor Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML)	16
5.1	<i>Inleiding</i>	16
5.2	<i>Verbinden van data en analysemethoden: Fundamentals of Industrial Ecology</i>	16
5.3	<i>Verkennen van de toekomst: Life cycle sustainability analysis</i>	17
5.4	<i>Toepassingsgebieden: energie, materialen, steden, voeding</i>	19
6	Dankwoord	19

Mijnheer de Rector, lieve familie, vrienden en collega's, zeer geverdeerde toeoorders,

1 Inleiding

Hartelijk welkom bij deze intreedere, getiteld: 'In kringetjes vooruit. De circulaire economie als recept voor duurzaamheid'. In deze lezing zal ik ingaan op deze titel en wat deze van doen heeft met mijn leerstoel 'Industrial Ecology', de wetenschap die onderzoekt hoe materialen en energie door de economie stromen.

Ik begin maar met het slechte nieuws. In 1987 definieerde een VN Commissie onder leiding van de toenmalige Noorse premier Brundtland duurzaamheid als een *"ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen"*.¹ Dat doel lijkt inmiddels veel lastiger te bereiken dan 100 jaar geleden. Aan het begin van de 20^e eeuw waren er zo'n 1,6 miljard mensen, en hadden we grondstoffen en ruimte in overvloed. Technologische vooruitgang was een bonus en kon het lot van de mensheid alleen maar verbeteren. Maar vooral sinds de jaren '50 zijn de bevolkingsgroei, de vraag naar grondstoffen, en de uitstoot van emissies exponentieel gegroeid.² Aan het begin van de 21^e eeuw bevinden we ons in een situatie waarin de komende veertig jaar radicale technologische en sociale oplossingen gevonden *moeten* worden.³ Natuurlijk is de levensstandaard nu veel beter dan 100 jaar geleden en dat is (grote) winst. Maar voor het eerst sinds eeuwen is het niet meer vanzelfsprekend dat toekomstige generaties het beter zullen krijgen dan de huidige.

Grote duurzaamheidsconferenties zoals Rio+20 conferentie van juni 2012 spaarden graag de kool en de geit. De Verenigde Naties (VN) stelden zich twee hoofddoelen: er moesten afspraken komen over het uitbannen van de armoede en over het verwezenlijken van een groene economie. Laten we eens kijken wat dit inhoudt. De OESO-landen van het 'oude' rijke Westen

hebben ongeveer 1 miljard inwoners en een Bruto Nationaal Product (BNP) dat neerkomt op zo'n 50.000 \$ per persoon per jaar.⁴ In China, India, Rusland en Brazilië ontstaat momenteel in buitengewoon rap tempo een nieuwe middenklasse van 1 tot 2 miljard mensen, die tegen 2050 ook een dergelijk inkomen verwachten.⁵ Het is voor iedere politicus uit zo'n land professionele zelfmoord om te stellen dat mensen in die OESO-landen en snel ontwikkelende economieën maar met minder genoeg moeten nemen als die 50.000 \$ per persoon. Met een wereldbevolking van minstens 9 miljard in 2050 houden we dan nog zo'n 6 tot 7 miljard mensen over die in de armere landen en regio's wonen.⁶ Uit alle statistieken blijkt dat een gemiddeld BNP van 10.000 \$ per persoon per jaar nodig is voor een redelijke levensverwachting, toegang tot basale voorzieningen als onderwijs en schoon drinkwater, en een redelijke 'human development index'. Valt je BNP terug tot onder dit niveau, dan leidt dit in snel tempo tot een slechter bestaan: een korter leven, meer kindersterfte, enz..⁷ Leiders van die landen zullen dus minimaal een BNP-niveau van zo'n 10.000 \$ per persoon per jaar willen nastreven, en dit niet geblokkeerd willen zien door bijvoorbeeld de milieudoelstellingen van Rio+20 of de recente COP21 in Parijs. Dit verlanglijstje, dat de wereldleiders in hun achterhoofd meenemen naar internationale duurzaamheidsconferenties, houdt in dat de wereldeconomie in 2050 een omvang zou moeten hebben van 200 triljoen dollar. Dat is vier maal zo veel als in 2005. En eigenlijk willen die leiders natuurlijk meer. Zo gaat dit sommetje uit van een nulgroei in de OESO-landen, terwijl veel van die landen nog onder de schulden crisis gebukt gaan. Vrijwel al hun leiders zien groei als de enige manier om de staatsschuld af te betalen, het vertrouwen van de financiële markten te herwinnen en verdere crises te vermijden.

Die enorme economische groei die we tot 2050 willen realiseren gaat vroeg of laat knellen.^{8,9} We zien nu al dat de inspanningen die het kost om nieuwe fossiele energiebronnen aan te boren veel groter zijn dan in de jaren '50. Tussen nu en 15 jaar wordt een piek in de olieproductie verwacht.¹⁰ In 2030 heeft de

wereld 40% meer zoet water nodig dan duurzaam kan worden gewonnen.¹¹ De zee is al zodanig overbevist dat we ondanks een onvergankelijk veel modernere vissersvloot nu minder vis uit zee halen dan in de jaren '70.¹² De CO₂ emissies moeten per 2050 80% omlaag.¹³ Het gebruiken van nog meer land voor landbouw of bio-energie heeft forse implicaties voor biodiversiteit en kan eigenlijk niet meer.¹⁴ De kwaliteit van ertsen loopt terug, omdat we de beste bronnen al hebben uitgeput. Dit betekent weer dat de energiebehoeften en daardoor de reële kosten om die metalen te winnen zullen stijgen.¹⁵ Er ontstaat harde concurrentie over toegang tot grondstoffen.¹⁶ De recente crisis over 'zeldzame aarden' raakte vooral in Japan, maar ook in de VS en Europa, de high-tech industrie hard.^{17,18}

Die benodigde viervoudige economische groei tot 2050, gekoppeld aan de noodzaak van op veel terreinen een absolute vermindering van milieudruk, komt neer op een economie die een factor 4, 8 of misschien wel 16 keer minder grondstof- en emissie-intensief is als nu. Een duizelingwekkende opgave.

2 De opgave: naar een klimaatneutrale economie die natuurlijke hulpbronnen in stand houdt

We moeten kort gezegd naar een omslag in ons economisch systeem. Het moet in staat zijn de toekomstige 9 of 10 miljard aardbewoners welvaart te geven, maar ook passen binnen de grenzen van onze planeet.

Klimaatneutraliteit is daarbij één belangrijk aspect. Ik was enorm verrast dat de COP21 in Parijs in december 2015 een klimaatakkoord bereikte. Enerzijds ben ik verheugd over de strenge doelstellingen. Wereldleiders spraken af te streven naar een temperatuurstijging op aarde van minder dan 2°C, liefst slechts 1,5°C.¹⁹ Tegelijk ben ik bezorgd over het gebrek aan concrete uitwerking hoe die doelen zouden moeten worden bereikt. Inderdaad, ik vraag me bijna af of de onderhandelaars zich hebben gerealiseerd wat dit doel betekent. De wereld emit-

teert op dit moment zo'n veertig Gigaton (Gton) kooldioxide per jaar. Om een doelstelling van 2°C te halen kan de mensheid, volgens het gezaghebbende tijdschrift *Nature* uit 2009 na 2000 nog zo'n 1000 Gton kooldioxide uitstoten.²⁰ Voor een doelstelling van 1,5°C is dit natuurlijk veel minder. De opwarming is nu al circa 1°C ten opzichte van het pre-industriële tijdperk, en zelfs als we vandaag stoppen met de uitstoot van CO₂ leiden naijl-effecten tot een hogere opwarming. Om de 1,5°C te halen zou in totaal nog minder dan 500 Gigaton mogen worden uitgestoten - slechts 12 maal de huidige jaaremmissies.²¹ Dat lijkt een vrijwel onmogelijke opgave. Zeker als je de volgende problemen meeneemt: ons eigen onderzoek in het Europese Carbon CAP project laat zien dat door landen beloofde maatregelen elkaar tegenwerken of rebounds veroorzaken, en de emissiereducties dus minder zullen zijn dan beloofd. Davis en Caldeira rekenden uit dat alleen de bestaande, nog niet afgeschreven elektriciteitscentrales, auto's, etc. zo'n 500 Gt CO₂ zullen emitteren over hun nog resterende levensduur.²² En mijn collega Paul Ekins van University College London rekende uit dat van de bewezen reserves aan fossiele brandstof die Shell, BP, Gazprom en al die anderen op hun balans hebben staan, maar een fractie gebruikt mag worden om de 2°C doelstelling te halen.²³ Geen leuk nieuws voor diegenen wiens pensioen van de beurskoers van deze bedrijven afhangt. Het lijkt er dus op dat we voor een vergaand klimaatbeleid erg laat zijn. We kunnen vergaande klimaatdoelstellingen alleen nog realiseren door bestaande, fossiele infrastructuur versneld af te schrijven en een fors verminderde beurswaarde van grote spelers in de energie-infrastructuur voor lief te nemen.

Naast de omschakeling naar een koolstof-neutraal energiesysteem wordt tegenwoordig het implementeren van een circulaire economie vaak als essentiële randvoorwaarde gezien voor duurzaamheid. Zo'n circulaire economie houdt materialen in kringlopen, in plaats van telkens nieuwe grondstoffen te gebruiken voor nieuwe producten die uiteindelijk als afval verdwijnen.

Om een aantal redenen is dit streven naar een circulaire economie heel logisch. Op dit moment gebruikt de mensheid jaarlijks meer dan 60 miljard ton aan natuurlijke hulpbronnen - biomassa, energie, metalen, en andere mineralen. Als we niets doen stijgt dat tot minstens het drievoudige in 2050.²⁴ En zoals hiervoor al aangegeven lopen we ook tegen de grenzen aan wat betreft gebruik van water en land.^{25,26}

Natuurlijk is er al sinds het rapport de Club van Rome in 1972 gewaarschuwd dat dit niet zo verder kon.²⁷ Wat - zie de recente dalingen voor prijzen van olie en andere grondstoffen - weer tot de opmerking heeft geleid dat diezelfde Club van Rome een groep zwartkijkers is gebleken, het grondstofprobleem allemaal wel meevalt en er tot nog toe in elk geval geen fundamentele crisis rond natuurlijke hulpbronnen heeft plaatsgevonden.

Misschien is dat laatste allemaal wel waar. Maar laat ik u eens meenemen in een niet eens zo heel extreem gedachtenexperiment. Laten we eens aannemen dat we wereldwijd een 7% economische groei per jaar willen realiseren. Een normaal getal in het Westen tot halverwege de jaren '70. Ondanks hun economische crisis, haalt China dat groeicijfer nog steeds. Net als veel andere zich snel ontwikkelende landen. Ruim het dubbele van wat de meeste economische prognoses wereldwijd aanhouden, maar dus niet extreem.²⁸ Bij een dergelijke groei verdubbelt de wereldwijde economie elke 10 jaar. Vertienvoudigt die economie in een kleine 35 jaar. Als je zo echt een eeuw of wat door wilt groeien, en het grondstof-, energie of water gebruik per euro economie niet omlaag brengt, loop je tegen het volgende aan. Na zo'n 200 jaar gebruikt de economie al het water op de planeet, inclusief zeewater. Na zo'n 300 jaar heeft de economie een hoeveelheid primaire grondstoffen nodig, gelijk aan het volume van de aardkorst. Na nog geen 400 jaar is er een hoeveelheid olie nodig, die gelijk is aan het volume van de aardbol.²⁹

Dat is natuurlijk fysiek volstrekt onmogelijk. Dus: zet het idee dat je de wereldeconomie een eeuw of twee lang met forse cijfers kunt laten groeien uit je hoofd. Of zorg dat die economie

veel minder primaire grondstoffen nodig heeft om te functioneren. Dat is het idee achter een circulaire economie.

3 Circulariteit: de oplossing?

3.1 Inleiding

Ik wil nu dieper ingaan op de mogelijkheden en onmogelijkheden van zo'n circulaire economie. De Europese Unie, op dit moment daarbij fors ondersteund door het Nederlandse Voorzitterschap, zet sterk op zo'n circulaire economie in. We zien nationaal en internationaal heel krachtige maatschappelijke initiatieven rond dit thema ontstaan. De EU heeft recent een Circular Economy Communication gepubliceerd.³⁰ De EU financiert ook, met 100-en miljoenen euro's, het EIT KIC Raw materials. Daarin is circulariteit een belangrijke component. Voor Nederland participeren o.a. de Universiteit Leiden, de Technische Universiteit Delft en TNO in het consortium van 100 bedrijven, onderzoeksinstituten en universiteiten dat dit programma vormgeeft.³¹ Ellen MacArthur, de bekende zeezeilster, heeft een stichting opgericht die met een groot aantal internationale bedrijven bekijkt hoe hun producten en diensten meer circulair kunnen worden.³² In Nederland werken partijen als het Groene Brein³³, ons eigen Leiden-Delft Erasmus Centre for Sustainability³⁴ en anderen aan deze agenda. Dat is een prachtige ontwikkeling.

Tegelijk ben ik ook beducht voor mythevorming en hypes. Ik gaf al eerder aan: de politiek is niet zo happig op verhalen rond grenzen aan de groei. Liever wordt een eeuwige groei beloofd, ook al is dat gezien de al genoemde fysieke eindigheid van onze planeet net zo reëel als een eeuwige jeugd. Het verkopen van zulke leuk scorende verhalen is verleidelijk - en hoe spijtig ook - je ziet soms bedrijven en zelfs wetenschappers voor die verleiding vallen. Net zoals één zwaluw geen lente maakt, staat een geslaagd gesubsidieerd proefproject nog niet gelijk aan een omslag naar de kringloop-economie. Wat is nu hype? Wat is waarheid? Ik zie minstens drie ongemakkelijke waarheden ten aanzien van het concept van de circulaire economie.

3.2 Punt 1: Energie, voeding: veel materiaalgebruik is inherent lineair

Ik begin maar met de eerste ongemakkelijke waarheid: bijna de helft van ons materiaalgebruik is inherent lineair.³⁵ Bijna 20% van ons materiaalgebruik bestaat uit fossiele energie: olie, kolen en gas.³⁶ En dat verbranden we nu eenmaal. Daar is geen kringloop meer van te maken. Er zijn wel creatieve geesten die vervolgens de CO₂ weer denken om te zetten in plastics of andere materialen die we nu nog van fossiele grondstoffen maken. Maar dit lijkt mij toch teveel op het najagen van een perpetuum mobile. En die kan volgens de ijzeren wetten van de thermodynamica toch onmogelijk bestaan. Waarschijnlijker is het dat je voor het omzetten van die CO₂ in fossiele grondstoffen net zoveel energie nodig hebt als je net door het verbranden van die fossiele grondstoffen hebt gewonnen. Voor fossiele energiedragers is de enige circulaire oplossing: hen uitbannen. En omschakelen op een duurzaam energiesysteem.

6

Bijna 30% van ons materiaalgebruik bestaat uit voedsel. Ook dat systeem kun je moeilijk circulair maken.³⁷ We eten ons voedsel nu een keer op. De omzettingsproducten van dat proces zijn bezwaarlijk geschikt voor direct hergebruik.³⁸ Maar natuurlijk is er in deze zogenaamde biotische kringloop nog wel veel te winnen. Het lijkt ongelofelijk, maar over de hele voedingsketen gerekend gooien we wereldwijd ruim 30% van het geoogste materiaal weg.³⁹ Spullen die ergens in de keten bederven, in de supermarkt van het schap gehaald worden door overschrijding van de houdbaarheidsdatum, of gewoon het bordje wat iemand niet leeg eet. En, ook een schrikbarend cijfer: maar liefst de helft van de landbouwgrond en -productie wordt gebruikt om kippen, varkens en koeien te voeren, die als vlees en melkproducten op onze tafels terecht komen. Terwijl algemeen de indruk is dat we in de westerse wereld al te veel rood vlees en teveel dierlijke eiwitten nuttigen dan gezond is. Nee, ik pleit niet voor algeheel lactovegetarisme. Maar uit studies van ons bij het Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML) en TNO en van anderen blijkt zonneklaar dat je vlees- en melkconsumptie terugbrengt tot letterlijk gezonde

proporties je al heel wat landbouwproductie kunt uitsparen - en die landbouwgrond bijvoorbeeld dan kunt inzetten voor het produceren van biomassa, wat het klimaatprobleem vermindert.^{40,41}

3.3 Punt 2: Veel landen bouwen nog nieuwe infrastructuur - de grondstoffen daarvoor haal je dus (nog) niet uit recycling

De tweede ongemakkelijke waarheid is dat op dit moment, zelfs al zou je alle materialen recyclen die als afval vrijkomen, je nog een enorme hoeveelheid primaire grondstoffen nodig blijft hebben. Vooral in de niet-westerse wereld zijn landen namelijk nog met een enorme inhaalslag bezig. Zij zijn hard bezig de huizen, fabrieken, kantoren, spoorlijnen, elektriciteitsnetten, snelwegen en bruggen te bouwen die we in Europa en de VS al lang hebben. Kort gezegd: ze breiden hun infrastructuur nog steeds (fors) uit. Dat kan alleen maar door materiaal te verplaatsen vanuit het natuurlijke systeem naar het economische systeem. Als je de ideale circulaire economie bereikt hebt, kun je van oude, bestaande gebouwen misschien weer evenveel nieuwe gebouwen maken. Maar als je extra gebouwen neerzet, heb je simpelweg extra staal en cement nodig. Dat was de afgelopen jaren heel goed te zien in China. Dankzij de enorme uitbreiding van hun infrastructuur produceerde en consumeerde dat land maar liefst de helft van het staal en cement in de wereld.⁴² Dit terwijl China maar zo'n 19% van de wereldbevolking en ruim 15% van de wereldwijde economie omvat.⁴³ Mijn CML collega's Mingming Hu, Ester van der Voet en Ruben Huele hebben aan dit fenomeen in hun wetenschappelijke werk flink gerekend. Hun conclusie: pas als je qua infrastructuur een zogenaamde 'steady state' hebt bereikt - je hebt geen extra huizen, snelwegen of kantoren meer nodig - raak je in een situatie dat je behoefte aan grondstoffen kan worden gedekt door materialen die je uit het economisch systeem terugwint - de zogenaamde 'urban mine'. Maar helaas: voor veel infrastructuur duurt het nog wel 50 jaar of meer voor die 'steady state' in zicht komt.^{44,45} En, een klein venijnigheidje: natuurlijk zijn al die componenten, onderdelen en materialen die tijden in de economie zijn gebruikt niet zomaar opnieuw in

te zetten. Je hebt altijd een deel wat niet meer te gebruiken is. Bij elk opwerkingsproces heb je verliezen. Je hebt altijd energie nodig bij die opwerking. Dus 100% circulariteit, ook in een 'steady state', is een illusie.

3.4 Punt 3: Ontkoppeling helpt - maar niet oneindig

De laatste ongemakkelijke waarheid: natuurlijk zal het streven materialen duurzamer en in kringlopen te gebruiken helpen de materiaalintensiteit van onze economie te verminderen. Dat betekent weer dat je in principe meer economische groei kunt hebben, bij hetzelfde materiaalgebruik. Ontkoppeling van economische groei en materiaalgebruik, heet dat in mooie termen. Maar hoever kom je daarmee? Mijn voorbeelden over materiaal-, water- en oliegebruik bij een permanente 7% groei geeft al duidelijk grenzen aan. We kunnen dat voorbeeld ook omdraaien. Zoals ik al zei, 7% economische groei per jaar leidt over 35 jaar tot een economie die tien keer zo groot is als nu. Per euro wil je dan eigenlijk dat je materiaalbehoefte tien keer zo klein is als nu. Over 100 jaar liggen die verhoudingen nog dramatischer. Dan is de economie 1.000 keer zo groot, en moet je materiaalgebruik per euro een factor 1.000 minder zijn bij volledige ontkoppeling.

Laat mij aan de hand van het volgende voorbeeld uitleggen wat dat betekent. Stel; u heeft vandaag een mooie auto die uw behoefte aan mobiliteit vervult, met een gewicht van zo'n 1.000 kg. Over 35 jaar - de economie is een factor 10 gegroeid - mag diezelfde auto, met dezelfde economische waarde, nog maar 100 kg wegen. En over 100 jaar, de economie is een factor 1.000 gegroeid, is er nog 1 kg materiaal beschikbaar om dezelfde mobiliteitswaarde te leveren als een auto nu.⁴⁶ Zeg maar de massa van een handvol dinky toys. Tja. Ik heb geen ambities in die richting, maar als ik ooit politicus zou worden: ik zou erg oppassen met uitspraken als dat dit soort ontkoppeling mogelijk is.

3.5 Toch: juist daarom aan de slag!

Eigenlijk zeg ik hiermee, dat elke economie uiteindelijk een fysieke basis heeft, die altijd in zekere mate zal moeten

meegroeien met de omvang van die economie. Samen met mijn collega's van TNO en CML toonden we dit heel mooi aan in de zogenaamde EIPRO studie voor de EU. Alles waar je geld voor uitgeeft, of het nu harde producten of ogenschijnlijk immateriële diensten zijn, resulteert in materiaalgebruik in de levenscyclus. De economie opdelend in zo'n 250 producten en diensten, vonden we dat het verschil in materiaal-intensiteit van verschillende producten en diensten meestal maar enkele factoren was.^{47,48} Dus; hoe je je geld ook uitgeeft, je gebruikt onherroepelijk materiaal. Tenzij we via kernfusie of anderszins een ongelimiteerde energiebron uitvinden, zal continue groei op een eindige planeet, met een eindige hoeveelheid zonne-energie altijd ergens gaan knellen. De economische groeispuurt van de afgelopen eeuw zal dus vroeg of laat afvlakken. Of dat over 25, 50 of 100 jaar is durf ik niet te zeggen.

Wat betekent dit nu allemaal voor de agenda rond circulaire economie? Dat die zinloos is? Ik zou zeggen: integendeel. Zich ontwikkelende landen moeten een enorme groei doormaken om welvend te worden. De vraag naar grondstoffen en energie is inherent stijgend. De huidige crisis rond grondstof- en energieprijzen kan dus niet anders dan een tijdelijke zijn. Bedrijven die door circulariteit meer toegevoegde waarde leveren met minder grondstofgebruik, zullen uiteindelijk concurrerende blijken. Internationale spanningen rond grondstoffen zullen wordt verminderd. Misschien voorkomt circulariteit dus zelfs oorlogen. Maar het belangrijkste is dit. Stel nu eens dat een circulaire economie met 80% minder primaire grondstoffen toekan dan een lineaire economie. Dan worden we uiteindelijk binnen dezelfde planetaire grenzen allemaal 5 maal zo rijk. Daarnaast is er tussen landen met gelijk inkomen een groot verschil in welbevinden. Als voorbeeld: in een land als Costa Rica is het welbevinden minstens zo goed als in veel rijke OESO landen.⁴⁹ Stel dat scheelt nog een factor 2 of 4. Een circulaire economie die geld slim in welbevinden omzet, levert dus 10 of 20 maal zoveel welzijn op als het lineaire alternatief. Mijn vraag is dus niet óf je een circulaire, mensgerichte economie moet willen. Mijn vraag is hoe je hem realiseert.

Want zo'n circulaire economie bouw je niet van vandaag op morgen. Veel infrastructuur, veel duurzame gebruiksgoederen, gaan jaren mee. Als je niet nu al nadenkt hoe je die circulair maakt, en het energie- en materiaalgebruik over de levensduur minimaal maakt, ben je eigenlijk te laat. En kan het, net als met dat fossiele energiesysteem, wel eens veel geld gaan kosten om het alsnog circulair te maken.

4 De onderzoeksagenda voor het Leiden-Delft-Erasmus Centre for Sustainability

4.1 Inleiding

Diverse auteurs hebben vuistregels opgesteld hoe zo'n circulaire economie eruit kan zien. De Ellen MacArthur Foundation is een van de meest prominente, en die suggereert het volgende. Zet in op een "deeleconomie" waarin mensen producten samen gebruiken - car sharing bijvoorbeeld. Zorg voor producten met een lange levensduur. Bevorder hergebruik van het hele product. Zorg voor component-hergebruik of 'remanufacturing'. En denk pas als al deze opties zijn uitgeput, aan het recyclen van materiaal.

Echter, hoe je de omslag van een lineaire economie naar een circulaire economie vormgeeft is geen panacee.⁵⁰ Ik heb in mijn eigen loopbaan via verschillende invalshoeken aan deze vraag gewerkt. Bij TNO leerde ik bij het Instituut voor Strategie, Technologie en Beleid (STB) veel over innovatiewetenschap van kopstukken zoals Ruud Smits, Danny Jacobs, en mijn promotor Jacqueline Cramer. Ik werkte met Jan Rotmans, John Grin en Johan Schot in het Kennisnetwerk Systeeminnovaties, en leidde grote EU projecten als SusProNet over duurzame business modellen^{51,52}, en SCORE! over duurzaam consumeren.⁵³ Toen ik in dienst kwam bij CML, vond het ik geweldig te merken dat de Universiteit Leiden, de TU Delft, en de Erasmus Universiteit Rotterdam (EUR) een strategische alliantie hadden gevormd, en ook een Centrum voor Duurzaamheid wilden opzetten. Deze drie universiteiten samen hebben namelijk een aantal topgroepen in huis, juist op disciplines die essentieel

zijn om het fenomeen circulaire economie goed te begrijpen en te stimuleren. Zo'n unieke combinatie van kennis van wetenschap, technologie en beleid kom je op dit terrein maar op weinig plaatsen in de wereld tegen. Bovendien pas zo'n Centrum dat zich richt op het duurzaam en rechtvaardig omgaan met grondstoffen uitstekend bij de ambities van de stad Den Haag, die zich profileert als 'Internationale stad van Vrede en Recht' - immers, het aantal oorlogen dat is gestart om grondstoffen is nauwelijks te tellen.

Dit 'Centre for Sustainability' (CfS) is inmiddels operationeel, aangestuurd door Lucas Meijs uit Rotterdam, Ellen van Bueren en Erik Offermans uit Delft, en mijzelf uit Leiden. Het is bemenst door een enthousiast team bestaande uit Gertjan de Werk, Esther Philips en David Peck. Als netwerkcentrum steunt het op een dozijn groepen binnen de Leiden-Delft-Erasmus alliantie. Binnen CfS zien we vier belangrijke onderzoeksvelden die essentieel zijn voor de omslag naar een circulaire economie. Ik bespreek die hieronder, en eindig met het veld waarin het onderzoek van mijn eigen instituut, CML, een cruciale bijdrage levert. .

4.2 Lijn 1: Technologie

Natuurlijk is bij de omslag naar een circulaire economie een sleutelrol weggelegd voor technologie.

Eén aspect daarbij is materiaaltechnologie. Professor Tom Graedel van Yale University maakte in werk voor het UNEP International Resources Panel duidelijk, dat de materialen in onze producten steeds complexer worden. Vroeger zaten er misschien een dozijn chemische elementen in een mobieltje. Vandaag heb je het halve periodiek systeem nodig. Technisch, noch economisch, is het haalbaar de individuele elementen uit zulke complexe mengsels terug te winnen.⁵⁴ Het vervelende is verder ook, dat veel van die toeslagstoffen maar in kleine hoeveelheden worden gewonnen of in een heel beperkt aantal landen gemijnd. Dat leidt er weer toe dat de voorzieningszekerheid van de toeslagstoffen beperkt is. Een logische strategie om dit soort problemen het hoofd te bieden is: ontwikkel

slimme materiaaltechnologie zodat je die kleine beetje kritische materialen niet of veel minder nodig hebt. Een strategie die inmiddels door CfS collega Erik Offermans bij de faculteit 3ME van de TU Delft wordt nagevolgd.

Uiteraard is ook de technologie die we inzetten voor energiesystemen, gebouwen, infrastructuur, consumentenproducten, etc. van grote betekenis. Technologische innovaties kunnen hier helpen om het materiaal- en energiegebruik van producten tijdens hun levensduur te minimaliseren. Ze kunnen verder de door de Ellen MacArthur Foundation gesuggereerde strategieën van levensduurverlenging, hergebruik, ‘remanufacturing’ en recycling handen en voeten te geven. Het is glashelder dat binnen het CfS diverse groepen van de TU Delft op dit vlak een sleutelrol spelen.

4.3 Lijn 2: Business, design, consumenten

Met technologie alleen red je het natuurlijk niet. Die technologie moet ingebed worden in waardenketens die lopen tussen verschillende bedrijven en de consument. Om circulariteit te bereiken, moet je vaak heel nieuwe productconcepten en daarbij behorende business modellen en waardeketens ontwerpen. Pas als die waardeketens beter werken - lees: meer toegevoegde waarde opleveren - dan een lineair model, zal er een omslag naar circulariteit optreden. In het Europese SusProNet project, dat ik ruim 10 jaar geleden opzette met een aantal design instituten en bedrijven in Europa, bleek al hoe lastig dat kan zijn.⁵⁵ Veel bedrijven zijn goed in het maken en verkopen van producten en hebben daarop gerichte ‘core competences’.⁵⁶ Maar stel je gaat over op een heel ander business model, en verkoopt die producten niet meer maar leent ze uit, onderhoudt ze, enzovoorts. Vanuit circulariteit gedacht geweldig: de producent kan dan dat product tijdig weer terugnemen, opknappen, enzovoorts. Maar opeens sta je als bedrijf voor heel andere puzzels dan een simpele product-verkoper.⁵⁷ Je moet onderhoud gaan mee verkopen, en misschien ben je daar niet goed in. Je krijgt je geld niet meer in een klap als je het product verkoopt, maar stukje bij beetje per maand - wat betekent dat je banken

moet overtuigen om je bedrijf extra te financieren. Degene die je product gebruikt is daar misschien onzorgvuldiger mee dan je denkt. Maar omdat jij nu eigenaar bent heb jij daar nu de last van. Je kunt dat door complexe contracten proberen af te dekken, maar daar zijn vaak vooral alleen dure juristen blij mee - de zogenaamde transactiekosten kunnen opeens duizelingwekkende vormen aannemen. En omgekeerd, misschien vindt die consument het veel leuker en makkelijker toch eigenaar te zijn. Laten we zeggen dat ik blij ben dat ik zelf bepaal welke verlichting ik in mijn huis heb, en niet dat een of andere ‘energy saving company’ mij opzadelt met TL balken omdat ik met dat bedrijf een resultaatverplichting ben aangegaan over het zo efficiënt mogelijk verlichten van mijn huis.⁵⁸ Na het SusProNet project publiceerde ik een heel goed geciteerd overzichtsartikel rond deze problematiek, en daar ben ik best trots op.⁵⁹ Maar het identificeren van vragen is maar één stap richting oplossing. Ik ben heel blij dat CfS kan bouwen op één van de beste business schools in Europa - de Rotterdam School of Management van Steef van der Velde - en de Faculteit Industrieel Ontwerpen van de TU Delft, waar mensen als Han Brezet, Ruud Balkenende en Conny Bakker een van de meest zichtbare duurzame ontwerpgroepen hebben neergezet. Hun Massive Open Online Course (MOOC) rond circulair design is nu al een klassieker.⁶⁰

4.4 Lijn 3: Governance en transitie-management

Maar ook met een combinatie van slimme, nieuwe technologie en creatief opgezette nieuwe business modellen red je het vaak niet.⁶¹ De innovatie-wetenschappen noemen nieuwe technologieën wel ‘hopeful monstrosities’.^{62,63} In potentie veel beter dan wat bestaat, maar nog lang niet rijp. En dus vaak niet in staat te concurreren met producten die na tientallen jaren gebruik volledig geoptimaliseerd zijn. Kijk naar de elektrische auto. Die heeft nog steeds grote nadelen als het gaat om actieradius en snelheid van ‘bijtanken’. Zelfs met de beste snelladers kun je je elektrische tankbeurt toch maar beter plannen tijdens een lunch, terwijl de concurrerende benzine-auto na een minuut of twee de weg weer op kan. Meer in brede zin vormen allerlei

andere zaken weerstand voor verandering. Beleidswetenschappers en transitie-wetenschappers gebruiken daarbij termen als 'regime', 'landschap' en instituties.⁶⁴⁻⁶⁷ Er zijn in onze samenleving allerlei systemen van sociale regels die interacties tussen actoren in de samenleving structuren. Deze formele en informele 'spelregels' vergemakkelijken ons handelen en maakt ons handelen voorspelbaar. En elke keer als we volgens bepaalde spelregels handelen bevestigen we deze regels en raken deze dieper 'geïnstitutionaliseerd'. Ik noemde hiervoor al allerlei redenen waarom bedrijven niet makkelijk een omslag maken van traditionele naar circulaire business modellen. Maar er zijn ook allerlei netwerk-effecten die omslagen lastig maken. Om die elektrische auto maar weer op te voeren: die vergt een brede uitrol van oplaadpunten, anders lukt het niet.

Deze weerstand verklaart waarom mooie, duurzame innovaties vaak in niches blijven hangen. En waarom we niet helemaal, of misschien wel helemaal niet, op marktwerking kunnen vertrouwen als het gaat om het realiseren van duurzaamheid op lange termijn. Je ziet dan ook nog wel eens dat er gepleit wordt voor een 'Deltaplan voor duurzaamheid'.⁶⁸ Daarin zou de overheid het voortouw moeten nemen en flink met regels gaan sturen. Helaas komt het maar zelden voor dat een overheid zodanig is gelegitimeerd, dat zij echt doortastend op kan treden. Het Nederlandse Deltaplan kwam er immers ook pas toen er een watersnoodramp was gebeurd - de vele waarschuwingen daarvoor over te zwakke dijken waren niet voldoende.

Mijn collega Ellen van Bueren illustreerde in haar oratie hoe veel partijen stedelijke ontwikkeling wel niet beïnvloeden.⁶⁹ Naast bijvoorbeeld projectontwikkelaars, bouwbedrijven, gemeenten, beleggers, en architecten spelen via technologie-ontwikkeling energiebedrijven en autoproducenten een sleutelrol. En tegelijk, zoals de Engelsen zo mooi zeggen "too many cooks spoil the soup". Sommigen stellen dus dat we voor de omslag naar circulariteit en duurzaamheid beter maar helemaal niet meer moeten rekenen op een sterke, centrale rol van de overheid. We zouden het vooral moeten hebben van 'bottom-up'-initiatieven

uit de samenleving. Maarten Hajer, tot voor kort directeur van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), bedacht hier een mooie term voor: De energieke samenleving.⁷⁰ Volgens de theorie van transitie management zouden zulke bottom-up initiatieven, in combinatie met bestaande problemen binnen een bestaand regime, en externe druk op dat regime - denk aan de klimaatafspraken gemaakt in Parijs - uiteindelijk tot omslagen richting een duurzame samenleving moeten leiden.⁷¹

Om kort te gaan, of en zo ja hoe je grote maatschappelijke omslagen kunt beïnvloeden is een vraagstuk van eminent belang.⁷² Wanneer moet je vooral de markt zijn werk laten doen en marktprikkels aanscherpen? Zijn er misschien 'windows of opportunity' te bewerkstelligen zijn waarbinnen een overheid toch met overmacht kan toeslaan?⁷³ Wanneer moet je vooral inzetten op experimenteren en bottom-up initiatief? Wanneer is elk beleid onmogelijk en moet je eerst wachten op een ramp?⁷⁴ Ook hier kan Cfs weer bouwen op buitengewoon goede expertise. De Faculteit Sociale Wetenschappen en DRIFT, het Dutch Research Institute for Transitions, in Rotterdam.⁷⁵ De Faculteit Techniek, Bestuur en Management van TU Delft, met sterke groepen op het gebied van governance en agent-based modeling van socio-technische systemen. En natuurlijk de Leidse Faculteiten Rechten en Governance en Global Affairs.

4.5 Lijn 4: Natuurlijke hulpbronnen en economie

Ik ben nu zo'n half uur bezig, en sommigen onder u zullen misschien denken: "Maar mijn beste Arnold. U praat maar over alle grote duurzaamheidsproblemen van de wereld en dat ongeveer alle denkbare disciplines gemobiliseerd moeten worden om die op te lossen. Wat gaat u zélf nu eigenlijk in uw onderzoek doen?" U heeft daar best een beetje gelijk in. Ik heb in mijn loopbaan de meeste vakgebieden die ik hiervoor besprak zelf bestreken, omdat ik denk dat je bijdragen vanuit je eigen discipline het beste kunt richten vanuit een redelijk overzicht over het geheel. Niet dat ik denk dat ik daarmee al die disciplines geheel beheers. Nee, op zijn best ben ik een 'Jack of all trades, master of some'.

Er is één belangrijk vraagstuk rond de circulaire economie dat ik tot nog toe alleen maar impliciet heb genoemd. Als je een omslag naar een circulaire economie wilt bewerkstelligen, is het essentieel dat je weet hoe de stromen van grondstoffen, producten en afvalstoffen in onze economie zijn verknoot, welke emissies daar ontstaan, en hoe dat druk op het natuurlijke systeem veroorzaakt. En welke nieuwe producten en technologieën over de levensketen gezien nu echt verbeteringen zijn.

Juist op dit terrein ligt nu al bijna 40 jaar de kracht van CML - het rekenen aan het 'economisch metabolisme' door de afdeling Industrial Ecology (IE) en het inschatten van effecten op biodiversiteit door de afdeling Conservation Biology (CB). Natuurlijk, we doen dat op onze manier interdisciplinair. We combineren informatie vanuit b.v. de toxicologie, geologie en het klimaatonderzoek. Maar dat brede rekenwerk aan het milieu is toch al tijden ons handelsmerk en onze kracht. En CML mag trots zijn op wat zij daarin heeft bereikt.

De naam van onze illustere eerste directeur, Helias Udo de Haes, zal samen met die van Gjalt Huppes, Reinout Heijungs en Jeroen Guinée altijd synoniem zijn met de methodiek voor Levenscyclusanalyse van producten (LCA). Zij leidden de ontwikkeling van die methode wereldwijd en bezorgden daarmee CML wereldfaam als grondlegger van die methodiek.^{76,77} Ester van der Voet en René Kleijn speelden in samenspel met b.v. het Wuppertal Institute uit Duitsland, het National Institute for Environmental Studies in Japan, het World Resources Institute in de US en het Institute for Social Ecology in Wenen een vergelijkbare vooraanstaande rol in het ontwikkelen van de methodiek van materiaalstroom-analyse (of 'material flow analysis', MFA).⁷⁸ Dit leidde als kroon op het werk tot een benoeming van Ester in het UNEP International Resources Panel - hét internationale wetenschapsforum voor natuurlijke hulpbronnen.⁷⁹ Voortbouwend op werk van cum laude promovendus Sangwon Suh heb ik zelf - toen nog vanuit TNO - samen met Gjalt Huppes en Arjan de Koning en vier grote Europese

projecten de leiding gehad in het opzetten van wat nu de meest uitgebreide globale milieukundige input-output (IO) database ter wereld is, EXIOBASE.⁸⁰⁻⁸² Om kort te gaan, ten aanzien van de LCA, de MFA, en input-output analyse (IOA), de drie belangrijkste methoden voor het analyseren van het 'economisch metabolisme', is CML een speler van wereldformaat. Voeg daarbij de mooie positie die de afdeling Conservation Biology onder leiding van eerst Geert de Snoo en nu Peter van Bodegom heeft opgebouwd rond biodiversiteits-onderzoek - en het is glashelder welke natuurlijke rol CML binnen het debat rond de circulaire economie speelt: het analyseren van de rol van natuurlijke hulpbronnen in de economie, en de impact van die economie op het natuurlijk systeem. Natuurlijk zie ik dit werk heel graag gekoppeld aan meer economisch analyses gericht op effecten op welvaart en concurrentiekracht. Voor de toekomst is dit een mogelijke inbreng van de Economische faculteit van de EUR in Cfs. Maar ook ben ik heel blij nog steeds een aanstelling te hebben bij de economiegroep van TNO, waar eerst met Olga Ivanova en later met mensen als Saeed Moghayer, Tanya Bulavskaya, Jinxue Hu en Mohammed Chahim een heel krachtig economisch model rond EXIOBASE is gebouwd. Ik ga nu verder deze rol van CML, en de afdeling IE in het bijzonder, binnen Cfs in.

5 De onderzoeksagenda voor Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML)

5.1 Inleiding

Als ik nu verder inzoom op de agenda van 'mijn' groep binnen het CML, de afdeling Industrial Ecology, dan zien we dat de strategische analyses die we samen hebben gedaan leidden tot drie activiteitenclusters. De eerste gaat over het koppelen van allerlei databronnen in het hier en nu en verknopen van analyses op verschillende schaalniveaus. De tweede gaat over het doen van toekomstverkenningen - maar dan op een typische 'Industrial Ecology' manier. De derde gaat over toepassingsgebieden.

5.2 Verbinden van data en analysemethoden: Fundamentals of Industrial Ecology

Het eerste activiteitencluster is het verder uniformeren en harmoniseren van datasets en analysemethoden. Met een knipoog naar de Universitaire profileringsgebieden - één heeft de naam 'Fundamentals of Science' - hebben we dit 'Fundamentals of Industrial Ecology' genoemd. Je ziet namelijk dat de traditionele methoden in ons vakgebied steeds meer in elkaar schuiven. Als je een economische input-output tabel ook voorziet van fysieke informatie, wat we in de EU projecten CREEA en DESIRE hebben gedaan, heb je precies dezelfde informatie die je voor de zogenaamde economy-wide MFA nodig hebt. Als je die IO tabellen verder flink detailleert, en ook schattingen maakt van de hoeveelheid materiaal die als infrastructuur in de maatschappij in gebruik is, heb je voor heel wat materialen een MFA in detail, iets wat we in ons vakgebied ook wel stroomanalyse noemen. En verder toonde Reinout Heijungs in zijn mooie proefschrift 'Economic drama and the environmental stage' in 1997 al aan dat IOA en LCA enorm op elkaar lijken - het belangrijkste verschil is dat een LCA vele malen gedetailleerder is in het beschrijven van producten en productieprocessen dan een IOA, die economische sectoren en productclusters onderscheidt.^{83,84} Maar ook dit verschil is aan het vervagen. Moderne IO tabellen zoals EXIOBASE onderscheiden al een tiental specifieke technieken voor opwekking van elektriciteit per land. Dat gaat al behoorlijk in de richting van het detail dat grote LCA databases, zoals eco-invent, bieden. Eigenlijk zie je dat ons veld altijd data over producten, technologische processen, en stromen en voorraden daarvan samen met grondstofonttrekking en emissies in een input-output structuur combineert om zo beleidsrelevante analyses te kunnen doen. Waarbij dan weer moet worden voldaan aan simpele regels zoals de wetten van behoud van massa en energie.

Natuurlijk heb ik wel eens droombeelden van die ultieme Industrial Ecology database waar je dit voor alle processen in de hele wereld op het grootste detailniveau doet - en liefst ook nog qua locatie specifiek. Zeg maar een wereldwijde input-

output tabel met het detailniveau van LCA-databases, gekoppeld aan een Geografisch Informatie Systeem (GIS). Misschien is dat wat gevaarlijk.⁸⁵ De 'grand unified theory of everything' is ook nog steeds niet uitgevonden. Misschien is het praktischer om verschillende data sets voor verschillende vragen op verschillende schaalniveaus naast elkaar te gebruiken. Maar het veld ontwikkelt stapsgewijs een strategie waarin diverse databronnen, van reguliere statistiek tot 'big data' bronnen als twitter-berichten, op een logische manier modulair en koppelbaar worden gemaakt. Dat heeft een aantal goede redenen. Eén: je zult analyses op lage schaalniveaus altijd moeten koppelen met hogere schaalniveaus om zeker te weten dat je geen problemen afwentelt. Mijn collega's Mingming Hu en Dong Liang koppelen analyses van het stedelijk metabolisme en stofstromen in eco-industriële parken op lokale schaal nu met globale input-output tabellen.⁸⁶ Alleen zo kun je zien of milieuverbeteringen binnen zo'n regio niet ten koste gaan van milieuerslechtering elders - omdat je andere materialen gebruikt of bepaalde afvalstoffen elders verwerkt, bijvoorbeeld. Twee: het is gewoon veel efficiënter om databases, routines om die te koppelen, en de daarbij behorende analytische tools in een gezamenlijke infrastructuur te beheren. Het komt nog te vaak voor dan elke promovendus zijn eigen data verzamelt en routines bedenkt, en dat die kennis niet goed overdraagbaar blijkt als die vertrekt. Idealiter wordt zo'n infrastructuur zelfs gedeeld door een heel veld. Dat geeft natuurlijk discussie over 'intellectual property rights'. Maar mijn collega's in de Sterrekunde delen hun data al wereldwijd en hebben laten zien dat zulke zaken oplosbaar zijn.^{87,88} Drie: er komen allerlei nieuwe databronnen bij. Die maken een nog beter begrip van het maatschappelijk metabolisme en inzicht in de opties voor beleidsinterventies mogelijk. Zulke 'Big data' vormen een interessante optie voor het verknopen van het vak van Industriële ecologie met andere disciplines.

CML is het aan zijn stand verplicht hier een voortrekkersrol te spelen. Met Bernhard Steubing, Joao Rodrigues, en Arjan de Koning op dit veld aan zet komt dit vast goed. En natuurlijk

doen we dit graag samen met de data science specialisten binnen onze faculteit, zoals Aske Plaat, Joost Kok, Hai Xiang Ling en Jaap van den Herik van het Leiden Centre for Data Sciences.

5.3 Verkennen van de toekomst: *life cycle sustainability analysis*

Het tweede veld is het maken van scenario's. Je wilt immers kunnen inschatten of allerlei verbeterde technologieën en circulaire business modellen uiteindelijk de milieudruk omhoog brengen en wat op diverse schaalniveaus de economische consequenties daarvan zijn. Er is al een rijk scala aan modellen en methoden voor het maken van zulke scenario's. Bij TNO hebben we een groot zogenaamd 'Computable General Equilibrium' model ontwikkeld, EXIOMOD. In het Carbon CAP project werken we samen met Cambridge Econometrics en Cambridge University, wat het econometrisch gevalideerde model E3ME gebruikt.⁸⁹ In de klimaatwereld worden grote, zogenaamde 'integrated assessment' modellen zoals IMAGE⁹⁰ of GCAM⁹¹ veel toegepast. De kracht van dit soort modellen is dat die allerlei dynamische interacties in de economie, of tussen het economische en natuurlijke systeem, proberen in te schatten. Als je meer in een economische sector investeert krijg je nieuwe technologie en/of schaalvergroting en worden producten goedkoper. Dat leidt weer tot meer vraag naar die producten. Deze modellen hebben uiteraard grote waarde, maar ook beperkingen. Juist omdat ze alle dynamiek in de economie willen omvatten, wordt het te complex om nog naar individuele technologieën of waardeketens te kijken. Zulke modellen zijn vaak geaggregeerd, en extrapoleren op dat geaggregeerde niveau trends uit het verleden door. Of hebben modules die het energiesysteem, landbouwsysteem en de rest van de economie apart beschrijven en maar beperkt integreren.

De kracht van Industriële ecologie is nu net, dat we juist wel de modellen en databases in huis hebben die de economie in zijn geheel - IO en MFA - en op een heel gedetailleerd detailniveau - LCA - kan beschrijven. In theorie moet ons vak dus in staat zijn heldere plaatjes te maken van hoe een toekomstig economisch systeem er uit kan zien, inclusief gedetailleerd inzicht in

nieuwe technologie voor energie-opwekking, mobiliteit, huisvesting, maar ook hoe die uiteindelijk bijvoorbeeld een vraag naar primaire grondstoffen oproepen. Tegelijk is dit mogelijk ook een zwakte. Als je zo'n gedetailleerde beschrijving van het economische systeem wilt koppelen aan allerlei dynamische processen, kom je toch weer dicht bij die onmogelijke 'grand unified theory of everything' uit. We zullen daarin dus slim en met beleid moeten opereren. Eén mogelijkheid is een beperkt aantal, heel belangrijke, dynamische processen in de IE toolbox in te bouwen. David Font Vivanco, die volgende week zijn proefschrift verdedigt, ontwikkelde in het Europese EMININN project LCA's voor toekomstige vervoerssystemen. Maar hij wist daarbij ook rebound-effecten te kwantificeren.⁹² Een andere benadering is wat Arjan de Koning en ikzelf 'paaltjes slaan' noemen. We gebruiken het detail van onze modellen vooral om te weten te komen in welke scenario's je qua grondstofvoorziening of emissies klem loopt, en in welke niet.⁹³ Een voorbeeld: elektrische auto's kun je maken met diverse soorten magneten. In geaggregeerde modellen zie je echt niet meer welke metalen in die magneten zitten, maar onze databases geven dat inzicht wél.⁹⁴ Wat blijkt: als we massaal overstappen op Toyota's met permanente Neodymium-magnetten, zal de vraag naar dat metaal de komende jaren een factor 10 of meer stijgen. Zo snel grondstofwinning verhogen is nog nooit gelukt, dus dit scenario zal het wel niet worden. Waarschijnlijker is het, dat een groot deel van het wagenpark de technologie van Tesla zal gebruiken, waar gewone elektromagnetten van koper in zitten.

Kortom, een heel uitdagend veld. Jeroen Guinée, die mede gezien zijn rol als voorzitter van de Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) werkgroep van de International Society of Industrial Ecology (ISIE) deze lijn bij CML trekt, heeft er een mooie kluif aan. Maar met het team dat we hebben gaan we op dit vlak ongetwijfeld mooie dingen zien.

5.4 Toepassingsgebieden: *energie, materialen, steden, voeding*

Tot slot: die mooie databases en IE scenariomethoden hangen niet in het luchtledige. We passen die toe op domeinen, die

cruciaal zijn voor de transitie naar circulariteit en klimaat-neutraliteit. Op regionaal niveau kijken we natuurlijk naar het metabolisme van steden en industriegebieden, en hoe je die circulair kunt maken. Voorbeelden zijn het PUMA project dat we doen met het de TU Delft en het Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions (AMS) en het Smart Industrial Park project gefinancierd door de Nederlandse en Chinese organisaties voor Wetenschappelijk Onderzoek. Op hogere schaalniveaus kijken we naar de economische sectoren waar het echt om gaat. Een UNEP International Resource Panel rapport dat Ester, ikzelf en mijn vroegere NTNU collega Edgar Hertwich schreven maakt glashelder dat de economische clusters rond energie, materialen en landbouw de dominante milieuproblemen veroorzaken.⁹⁵

14

Hier gaat het er om heel scherp te krijgen wat nu de cruciale beleidsvragen zijn. Want, helaas, het lijkt erop dat ook de top-tijdschriften steeds meer op nieuwsprogramma's gaan lijken. Natuurlijk, je verhaal moet een degelijke methode als basis hebben. Maar zonder het op het juiste moment beantwoorden van die juist dan populaire sexy vraag kom je niet in dat top-blad.

Ik noem er een paar. Is een elektrische auto nu echt beter dan een kleine benzine-auto, zolang je elektriciteit uit kolen-centrales komt? Welke grondstoffen worden in de grootste hoeveelheden uit de aardkorst gehaald? Hoe verhoudt die jaarlijkse winning zich tot reserves? Welke materiaalstromen veroorzaken over de levensketen de hoogste milieudruk? Welke combinaties van milieudruk vormen echt een bedreiging voor het natuurlijk systeem en biodiversiteit? Wat zijn mogelijke verzadigingspunten voor het gebruik van ijzer, koper, cement etc. per hoofd van de bevolking in de economie, als ook China, India en Afrika zich hebben uitontwikkeld? Hoeveel cokes heb je eigenlijk nodig om die hoeveelheid staal te maken en hoeveel CO₂ stoot je daarbij eigenlijk uit? In welke stappen in de productie-consumptieketen heb je de grootste verliezen, en tot op welk niveau kunnen we onze steden en waardeketens circulair

maken via nieuwe technologie en businessmodellen? Hoe ziet het economische netwerk in een circulaire economie eruit, en wat zijn verschuivingen in handelstromen? Wat betekent dat weer voor havens als Rotterdam, die nog zo erg zijn gericht op overslag van fossiele brandstoffen? Bedenken wat nu de meest pregnante en interessante vragen zijn die we met onze toolbox kunnen oplossen is een vak apart. Maar dat gaat onder aanvoering van René Kleijn en Ester van der Voet, gezien hun lange ervaring in beleidsgericht onderzoek, vast lukken.

Het is duidelijk, we zijn nog lang niet klaar. Ons mooie vak Industrial Ecology heeft nog veel te doen, zowel qua methodische ontwikkeling en inhoudelijke ondersteuning van het beleid.

6 Dankwoord

Ik kom toe aan het slot van mijn rede. Ik heb al veel mensen met naam en toenaam in deze rede genoemd als dank voor de samenwerking in het verleden. Ik kijk met veel enthousiasme uit naar een voortzetting van ons gezamenlijke werk. Daarnaast dank ik het College van Bestuur en de Faculteit voor mijn aanstelling als hoogleraar bij het CML, en het in mij gestelde vertrouwen.

Ik noem ook graag Jacqueline Cramer, mijn promotor. Ruim 20 jaar geleden kwam ik na een van die TNO-reorganisaties in je groep. Ik vertelde vol trots over al het rekenwerk dat ik - toen al - met CML deed in studies voor de chloorcontroversie. Uit je reactie proefde ik een aarzeling. Maar wijs als je was, liet je mij toen mijn gang gaan. Twee jaar later had ik geleerd dat je met rekenwerk alleen controverses niet kon oplossen. Akzo Nobel en Greenpeace bleven ruzie maken, mijn mooie rapporten ten spijt. Toen we het plan smeeden voor mijn promotietraject stuurde jij me subtiel in de richting van conflict resolution, wetenschapsfilosofie, en beleidswetenschap. Dat was cruciaal voor de breedte die ik nu bestrijk. Je ziet, ik ben nu weer terug in het rekenwerk. Maar hopelijk inmiddels wel met de wijsheid waarvan jij 20 jaar terug al zag dat die nodig was.

Now a few words in English. Our team at CML grew tremendously in the last 2 years. For some reason we mainly hired people from abroad. For Dutch nationals it is normal to have this speech in Dutch. So it is unlikely you could follow it. Angelica, David, Valentina: Perdón. Joao, Alexandra: Perdão. Bernhard: Verzeihung. Mingming, Dong Liang and the many Chinese PhD students with us: duì bù qǐ. (对不起). Nabeel: māf kījīye (माफ़ कीजिये); Nadia: Izvinitye (Извините). Rachel: Sori. An English translation will be available soon.

Nu een punt wat mij zwaar valt. Mijn beide ouders maken dit geweldige moment helaas niet meer mee. Mijn oorspronkelijke oratie-datum stelde ik uit omdat net mijn vader overleden was. Je kunt natuurlijk zeggen dat zij vanaf boven meekijken. Maar het is iets wat droef stemt. Des te blijer ben ik dat een groot deel van de familie die ik wel heb - mijn broer André en zijn gezin, ooms en tantes, neven en nichten, inclusief Marlies uit Zwitserland en Tom uit de VS, hier wél zijn om dit feestelijk moment te delen.

Nu iets ongebruikelijks. Ik ga iets zeggen over de pedel, Willem van Beelen. Dat is de persoon met die mooie staf, die ceremonies als deze al 27 jaar in goede banen leidt. Misschien wel zo'n 10.000 promovendi hoorden zijn verlossend 'Hora est' in dit academiebouw. Op maandag 29 februari gaat hij met pensioen. Ik vind het een voorrecht dat iemand die jarenlang - misschien nog wel meer dan leden van het College - het markante gezicht van onze universiteit is geweest, mijn oratie als zijn laatste formele activiteit begeleidt.

Nog een woord over de Universiteit Leiden zelf. Ik ben aangenaam verrast door de bestuurscultuur. Een financieel verdeelmodel dat gestoeld is op heldere regels, wat energieverspillende interne strijd over geld uitsluit. Decanen en directeuren die tijdelijk zijn benoemd, dan teruggaan naar de wetenschap, en dus weinig baat hebben bij het opbouwen van een dure, bureaucratistische bestuurslaag. Een decaan die stuurt op verbinding. Een

College van Bestuur dat echt de mensen centraal stelt, en waar je veel contact mee hebt. Mede dankzij de geweldige steun die ik heb aan mijn Instituutsmanager, Paul de Hoog, betekent dit dat ik mij ook als directeur kan blijven richten op de inhoud: het uitvoeren en het managen van goed onderzoek en onderwijs.

Ik wil afsluiten in crescendo. In 28 jaar ontwikkelde CML zich onder leiding van zijn grondlegger, Helias Udo de Haes, tot een instituut van wereldfaam. De periode na zijn afscheid in 2006 was niet altijd makkelijk. Maar wat is er door iedereen hard gewerkt om de zaak op orde te krijgen. En wat staan we er inmiddels dankzij die inspanning goed voor. Een stevige verankering in de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen. Uitstekende en omvangrijke onderwijsprogramma's, die voor een goede 1^e geldstroomfinanciering zorgen. Een gestage stroom aan PhD studenten. Veel nieuwe, veelbelovende medewerkers. Heldere en coherente onderzoeksprogramma's binnen en tussen beide afdelingen. Grote successen in de vorm van externe financiering. De VIDI beurs voor Martina Vijver. Onze deelname aan dat massieve EIT KIC Raw materials. En een aantal grote Europese Horizon 2020 projecten, die we binnenhaalden door echt de gecombineerde kennis van beide CML-groepen in te zetten. Ik zie er naar uit om met alle CML-ers deze prima positie verder uit te bouwen via inspirerend onderwijs en geweldig onderzoek.

Ik heb gezegd.

Referenties

- 1 World Commission on Environment and Development (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- 2 Steffen, W., W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney en C. Ludwig (2015). The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* April 2015, vol. 2 no. 1, 81-98.
- 3 Zie bijvoorbeeld de drastische maatregelen voor de terugdringing van CO₂-uitstoot, die zijn voorgesteld in scenario's die zijn gepresenteerd door het Internationaal Energie Agentschap (2009). *World Energy Outlook*. IEA, Paris, France.
- 4 OECD (2008) *OECD Factbook 2008: Economic, Environmental en Social Statistics*. OECD, Paris, France, data available from: <http://oberon.sourceoecd.org/vl=822201/cl=57/nw=1/rpsv/fact2008/> (geraadpleegd 10 november 2015).
- 5 World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 2009). *Vision 2050. The new agenda for business*. WBCSD, Geneva, Switzerland.
- 6 Lutz, W., W.C. Sanderson en S. Scherbov, (eds., 2004). *The End of World Population Growth in the 21st Century. New Challenges for Human Capital Formation and Sustainable Development*. London: Earthscan; United Nations (2009) *World population to exceed 9 billion in 2050*. Press Release, UN Population Division/DESA, 11 March 2009, New York, US.
- 7 Jackson, T. (2009). *Prosperity without growth*. Earthscan, London/Sterling; Layard, R. (2005) *Happiness: Lessons from a New Science*. Penguin Press, London, UK.
- 8 UNEP (2011) *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. Fischer-Kowalski, M., M. Swilling, E.U. von Weizsäcker, Y. Ren, Y. Moriguchi, W. Crane, F. Krausmann, N. Eisenmenger, S. Giljum, P. Hennicke, P. Romero Lankao en A. Siriban Manalang. UNEP, Paris, France.
- 9 Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. Stuart Chapin III, E.F. Lambin, T.M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H.J. Schellnhuber, B. Nykvist, C.A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P.K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R.W. Corell, V.J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen en J.A. Foley. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472-475 (24 September 2009).
- 10 Sorrell, S., R. Miller, R. Bentley en J. Speirs (2010). *Oil futures: A comparison of global supply forecasts*. *Energy Policy* 38 (9): 4990-5003. doi:10.1016/j.enpol.2010.04.020. Wat niet noodzakelijkerwijs betekent dat we met een energietekort te maken gaan krijgen: er zit nog voor honderden jaren steenkool in de grond, en de grootschalige winning van schaliegas heeft in de VS het energielandschap al fors veranderd.
- 11 Water resources group (2009), *Charting Our Water Future. Economic frameworks to inform decision-making*. McKinsey & Company.
- 12 UNEP (2011). *Green Economy Report*. United Nations Environment Program, Geneva, Switzerland.
- 13 UNEP (2015). *The Emissions Gap Report 2015. A UNEP Synthesis Report*. Advance Copy. UNEP, Nairobi, Kenia, available from http://uneplive.org/media/docs/theme/13/EGR%202015_Technical%20Report.pdf.
- 14 Van Vuuren, D.P. en A. Faber (2009), *Growing within Limits - A Report to the Global Assembly 2009 of the Club of Rome*, Netherlands Environmental Assessment Agency, ISBN 978-90-6960-234-9.
- 15 Graedel, T.E. and E. van der Voet (eds., 2010), *Linkages of Sustainability*. Cambridge: MIT Press.
- 16 USGS (2011). *China's Rare Earth industry*. Open File Report 2011-1041. United States Geological Survey, Reston, VA.
- 17 Zo hard, dat de EU en de VS zelfs een zaak tegen China hebben aangespannen via de World Trade Organisation. Zie: *New York Times* (2012): *Obama Files A Complaint*

- Over China. Page B1, New York Edition, March 14, 2012. Beschikbaar via <http://www.nytimes.com/2012/03/14/business/obama-takes-up-trade-case-against-china.html> (geraadpleegd op 27 augustus 2012). Zie ook: EC (2010). Critical Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. EC, Brussels, Belgium.
- 18 Tukker, A. (2014), Rare earth elements supply restrictions: Market failures, not scarcity, hamper their current use in high-tech applications, *Environmental Science and Technology*, vol. 48, no. 17, pp. 9973-9974.
 - 19 UNFCCC (2105). Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Draft decision CP21, 12 December 2015.
 - 20 Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S.C.B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D.J. Frame en M.R. Allen (2009). Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature* 458, 1158e1162.
 - 21 Van Vuuren, D.P., M. van Sluisveld en A.F. Hof. (2015: 27), Implications of long-term scenarios for medium-term targets (2015). PBL, Netherlands Environmental Assessment Agency, Publication number 1871, Bilthoven/den Haag, Netherlands.
 - 22 Davis, S.J., K. Caldeira en H.D. Matthews (2010). Future CO2 emissions and climate change from existing infrastructure. *Science* 329, 1330-1333.
 - 23 McGlade, C. en P. Ekins (2015). The geographical distributions of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature* 517, 187-190. Circa 30% van de olie, 50% van het gas, en 80% van de kolen mag niet gebruikt.
 - 24 UNEP (2011) Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. Fischer-Kowalski, M., M. Swilling, E.U. von Weizsäcker, Y. Ren, Y. Moriguchi, W. Crane, F. Krausmann, N. Eisenmenger, S. Giljum, P. Hennicke, P. Romero Lankao en A. Siriban Manalang. UNEP, Paris, France.
 - 25 Van Vuuren, D.P. en A. Faber (2009), Growing within Limits - A Report to the Global Assembly 2009 of the Club of Rome, Netherlands Environmental Assessment Agency, ISBN 978-90-6960-234-9.
 - 26 Water resources group (2009), Charting Our Water Future. Economic frameworks to inform decision-making. McKinsey & Company.
 - 27 Meadows, D.H., D.L. Meadows, J. Randers en W.W. Behrens III (1972). The Limits to Growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind, Universe Books, ISBN 0-87663-165-0.
 - 28 De afgelopen jaren groeide de wereldeconomie met 3-3.5%, zie: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/xx.html>. Tussen 1950 en de crisis van 2008 was dit 4-5%, met uitschieters richting 6%. Zie https://en.wikipedia.org/wiki/Gross_world_product.
 - 29 Volgens <https://en.wikipedia.org/wiki/Earth> heeft de aarde een straal van 6371 km, een oppervlak van ruim 500 miljoen km², een volume van 1,08 10¹² km³ en een massa van 6*10²⁴ kg. De aardkorst van zo'n 20 km is dus ruwweg 1% van het aardvolume, zeg ook 1% van de massa: 6*10²² kg. Het huidige materiaalgebruik, mijnafval verwaarlozend, is ongeveer 60 miljard ton (6*10¹³ kg). Zeven procent groei per jaar is een factor 1000 groei in één eeuw plus 2-3 jaar. Na zo'n 3 eeuwen zit je dus op een grondstofwinning met het volume van de aardkorst. Voor water en olie is de berekening gebaseerd op het huidige grond- en rivierwater gebruik per jaar van 1660 km³ (zie noot 81), de hoeveelheid water op aarde van 1400 miljoen km³ (<http://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>), het al genoemde volume van de aarde en een gemiddelde olieproductie van 90 miljoen barrels per dag (<https://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=5&pid=5&aid=2&cid=ww,&syid=2010&keyid=2014&unit=TBPD>). Ik ben natuurlijk niet de enige die dit soort sommetjes maakt. Jeremy Grantham, een bekende directeur van een grote investeringsmaatschappij, vroeg zich af: stel de oude Egyptenaren bezaten 3000 jaar voor Christus 1 m³ aan goederen. Bij de 4,5 % groei die de wereld nu doormaakt,

- hoeveel materiaal zouden de Egyptenaren bezitten tegen de tijd dat zij rond het jaar 0 door de Romeinen veroverd werden? Het antwoord is een miljard zonnestelsels. Grant ham concludeert dat elke eeuwige groei van enig formaat, zeg boven de 0,1% per jaar, onmogelijk is. Zie <http://www.theoil drum.com/node/7853>. (geraadpleegd 23 januari 2016).
- 30 COM/2015/0614 final. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 2 December 2015.
- 31 <http://eitrawmaterials.eu/>. Geraadpleegd 23 januari 2016.
- 32 Ellen MacArthur Foundation and McKinsey (2012): Towards the Circular Economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition; (2013): Towards the Circular Economy Vol. 2: opportunities for the consumer goods sector; (2014): Towards the Circular Economy Vol. 3: Accelerating the scale-up across global supply chains. Zie: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>.
- 33 Zie: <http://hetgroenebrein.nl/wetenschappers/> en <http://hetgroenebrein.nl/kenniskaarten/> (geraadpleegd 23 januari 2016).
- 34 <http://www.centre-for-sustainability.nl/> (geraadpleegd 23 januari 2016).
- 35 Zie bijvoorbeeld: Haas, W., F. Krausmann, D. Wiedenhofer en M. Heinz (2015). How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, Volume 19, Issue 5, pages 765–777, October 2015.
- 36 Data van: <http://www.materialflows.net/data/datadownload/>, gebruikt bij het opstellen van EXIOBASE v2 (www.exio base.eu) (geraadpleegd 23 januari 2016).
- 37 Data van: <http://www.materialflows.net/data/datadownload/>, gebruikt bij het opstellen van EXIOBASE v2 (www.exio base.eu) (geraadpleegd 23 januari 2016).
- 38 Het is uiteraard wel mogelijk een landbouw- en voedingssysteem na te streven dat is gestoeld op organische principes en natuurlijke bemesting. Dan is er, in brede zin, wel sprake van circulariteit in dit systeem, en wordt alleen zonne-energie gebruikt om dit systeem aan te drijven. De realiteit is echter anders - onze huidige landbouw vergt een forse hoeveelheid niet-circulaire inputs zoals kunstmest, fossiele energie, en irrigatiewater.
- 39 FAO (2011). Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention. Rome.
- 40 Tukker, A., A. de Koning, O. Wolf, S. Bausch-Goldbohm, M. Verheijden, R. Kleijn, I. Pérez-Domínguez en J.M. Rueda-Cantuche (2011). Environmental Impacts of Changes to Healthier Diets in Europe. *Ecological Economics*, 70, 1776-1788.
- 41 Stehfest, E, L. Bouwman, D.P. van Vuuren, M.G.J. den Elzen, B. Eickhout and P. Kabat (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, 95 (41306), pp.83-102.
- 42 Zie voor onderliggende data: United States Geological Survey (2015), Mineral commodity summaries 2015. USGS, Reston, Virginia, US. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
- 43 China had in 2015 1,36 miljard inwoners, de wereld 7,25 miljard; het nominale GDP was 10,37 biljoen \$ voor China en 78.3 biljoen \$ voor de wereld; het GDP gecorrigeerd voor koopkracht was 18 biljoen \$ voor China en 109 biljoen \$ voor de wereld (data voor 2014). Zie <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ch.html> (geraadpleegd 16 januari 2016).
- 44 Hu, M., S. Pauliuk, T. Wang, G. Huppés, E. van der Voet en D.B. Müller (2010). Iron and steel in chinese residential buildings: a dynamic analysis, *Resources Conservation and Recycling* 54(9): 591-600.
- 45 Hu, M., H. Bergsdal, E. van der Voet, G. Huppés en D.B. Muller (2010). Dynamics of urban and rural housing stocks in China, *Building Research and Information* 38(3): 301-317.
- 46 Dit is natuurlijk een wat versimpelde voorstelling van

zaken. Als je veel materiaal weet te recyclen, mag je meer materiaal gebruiken voor de vervoersbehoefte. Maar in de EU zijn de recycling-targets voor afval van personenauto's al heel hoog, 90% of meer.

- 47 Tukker, A. en B. Jansen (2006). Environmental impacts of products *Journal of Industrial Ecology* 10 (3), 159-182.
- 48 Tukker A., G. Huppel, J.B. Guinée, R. Heijungs, A de Koning, L.F.C.M. van Oers, S. Suh, T. Geerken, M. van Holderbeke, B. Jansen en P. Nielsen (2006). Environmental impacts of products (EIPRO) - Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25, IPTS report (22284EN), DG JRC IPTS, Sevilla, Spain
- 49 <http://www.happyplanetindex.org/data/> (geraadpleegd 15 februari 2016).
- 50 Sommige landen, waaronder Nederland, hebben vanaf 1990 al een afvalbeleid ingezet wat tot veel recycling heeft geleid. Maar zelfs in de veel lidstaten van de huidige EU28 wordt het meeste afval nog gestort.
- 51 Tukker, A. en U. Tischner (eds., 2006). *New Business for Old Europe: Product-services as a means to enhance competitiveness and eco-efficiency*. Greenleaf Publishing, Sheffield, UK (400 p).
- 52 Tukker, A. en U. Tischner (2006), Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research, *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, no. 17, pp. 1552-1556.
- 53 Tukker, A., M. Charter, C. Vezzoli, E. Sto en M. Munch Andersen (eds., 2008). *System Innovation for Sustainability 1: Perspectives on Radical Changes to Sustainable Consumption and Production* Greenleaf Publishing, Sheffield, UK (480 p).
- 54 UNEP (2011). *Recycling rates of metals - A Status Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*. Graedel, T.E., J. Allwood, J.-P. Birat, B.K. Reck, S.Sf. Sibley, G. Sonnemann, M. Buchert en C. Hagelüken. UNEP, Paris, France.
- 55 Tukker, A. en U. Tischner (eds., 2006). *New Business for Old Europe: Product-services as a means to enhance competitiveness and eco-efficiency*. Greenleaf Publishing, Sheffield, UK (400 p).
- 56 Hamel, G. en C. Prahalad (1990). The Core Competence of the Corporation, *Harvard Business Review*, vol. 68, nr. 3, May-June 1990, p. 79-93.
- 57 Zie bijvoorbeeld: Baines, T.S., H.W. Lightfoot, O. Benedettini en J.M. Kay (2009). The servitization of manufacturing: a review of literature and reflection on future challenges. *J. Manuf. Technol. Manag.* 20 (5), 547-567; Baines, T.S., H.W. Lightfoot, S. Evans, A. Neely, R. Greenough, J. Peppard, R. Roy, E. Shehab, A. Braganza, A. Tiwari, J.R. Alcock, J.P. Angus, M. Basti, A. Cousins, P. Irving, M. Johnson, J. Kingston, H. Lockett, V. Martinez, P. Michele, D. Tranfield, I.M. Walton, en H. Wilson, H (2007). State-of-the-art in product-service systems. *Proc. Inst. Mech. Eng. J. Eng. Manuf.* 221 (10), 1543e1552.; Tukker, A. (2015), Product services for a resource-efficient and circular economy - A review, *Journal of Cleaner Production*, vol. 97, pp. 76-91.
- 58 Ook business modellen voor de 'deeleconomie', zoals Uberpop en Airbnb die gewone burgers in staat stellen hun auto als taxi en huis als hotelkamer te verhuren, ontvangen kritiek. 'Het biedt veel nieuwe kansen en innovatie, maar leidt ook tot weinig en geen inkomensbescherming...[H]et begint trekjes te krijgen van een moderne vorm van slavernij', aldus EUR hoogleraar Henk Volberda in het *Erasmus Magazine* van januari 2016 , p14.
- 59 Tukker, A. (2004). Eight types of product-service system: Eight ways to sustainability? *experiences from Suspronet. Business Strategy and the Environment*, 13(4), 246-260.
- 60 <https://www.edx.org/course/circular-economy-introduction-delftx-circularx-0> (geraadpleegd 16 januari 2016).
- 61 Shove, E. en G. Walker (2010). Governing transitions in the sustainability of everyday life. *Research Policy*, 39(4), 471-476.
- 62 Mokyr, J. (1990). *The lever of riches: technological creativity and economic progress*. New York: Oxford University Press.

- 63 Elzen, B., F.W. Geels en K. Green (eds., 2004). *System Innovation and the Transition to Sustainability: Theory, Evidence and Policy*, Cheltenham: Edward Elgar.
- 64 Geels, F.W. (2005). *Technological transitions and system innovations: A co-evolutionary and socio-technical analysis*. Cheltenham: Edward Elgar.
- 65 Grin, J., J. Rotmans en J. Schot, met F. Geels en D. Loorbach (2010). *Transitions to sustainable development. New directions in the study of long term transformative change*. Routledge, New York, NY, USA and Oxon, UK.
- 66 Tukker, A., S. Emmert, M. Charter, C. Vezzoli, E. Sto, M. Munch Andersen, T. Geerken, U. Tischner en S. Lahlou, S. (2008), *Fostering change to sustainable consumption and production: an evidence based view*, *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 11, pp. 1218-1225.
- 67 Hodgson, G.M. (2004). *The evolution of institutional economics*. London and New York: Routledge.
- 68 Internationaal wordt vaak het Apollo programma dat de mens op de maan zette als voorbeeld gebruikt. Zie bijvoorbeeld: <http://www.theguardian.com/environment/2015/jun/02/apollo-programme-for-clean-energy-needed-to-tackle-climate-change> (geraadpleegd 14 februari 2016).
- 69 Van Bueren, E. (2015). *The Great Urban Bake Off*. Oratie, 13 november 2015, TU Delft, Delft.
- 70 Hajer, M. (2011). *The energetic society. In search of a governance philosophy for a clean economy*. Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.
- 71 Vergelijk ook de oratie van Derk Loorbach (2014): *To Transition! Governance Panarchy in the New Transformation*. Erasmus Universiteit Rotterdam, 31 oktober 2014.
- 72 North, D.C. (1990). *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge university press; Olsen, Johan P. en James G. March (1989). *Rediscovering institutions: the organizational basis of politics*. New York: Free Press.; Ostrom, E., R. Gardner en J. Walker, J. (1994). *Rules, games, and common-pool resources*. University of Michigan Press.
- 73 Kingdon, J.W. en J.A. Thurber (1984). *Agendas, alternatives, and public policies* (Vol. 45). Boston: Little, Brown.
- 74 Tukker, A. en M. Butter (2007). *Transitions to Sustainability: About the 4(0) ways to change the world*. *Journal of Cleaner Production*, Volume 15, Issue 1, 2007, Pages 94-103.
- 75 DRIFT was penvoerder van het Nederlandse Kennisnetwerk Systeeminnovaties, waarin o.a. Jan Rotmans, Derk Loorbach, Marian Minnesma (DRIFT), John Grin (UvA), Johan Schot (TU Eindhoven, nu SPRU), Rene Kemp (MERIT) en Frank Geels (TU Eindhoven, nu University of Manchester) met nog een dozijn wetenschappers, waaronder ondergetekende, de theorie van transitie-management handen en voeten gaven. Zie b.v. de referenties in noot 63-65 en 71.
- 76 Heijungs, R., J.B. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin en H.P. de Goede (1992). *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds*. Novem, Utrecht. <https://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/8061>. Vertaald in o.a. het Japans.
- 77 Guinée, J.B., M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. Wegener Sleswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin en M.A.J. Huijbregts (2002). *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background*. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, , 692 pp.
- 78 Layke, C., E. Matthews, C. Amann, S. Bringezu, M. Fischer-Kowalski, W. Hüttler, R. Kleijn, Y. Moriguchi, E. Rodenburg, D. Rogich, H. Schandl, H. Schütz, E. van der Voet en H. Weisz (2000). *Weight of nations. Material outflows from industrial economies*. World Resources Institute, Washington DC, US, <http://www.wri.org/publication/weight-nations>.
- 79 UNEP (2013) *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*, A Report of the

- Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Van der Voet, E., R. Salminen, M. Eckelman, G. Mudd, T. Norgate en R. Hirschier, R. UNEP, Paris, France.
- 80 Tukker, A., A. de Koning, R. Wood, T. Hawkins, S. Lutter, J. Acosta J.M. Rueda Cantuche, M. Bouwmeester, J. Oosterhaven, T. Drosdowski en J. Kuenen (2013). EXIOPOL – Development and illustrative analysis of a detailed global MR EE SUT/IOT, *Economic Systems Research*, vol. 25, no. 1, pp. 50-70.
- 81 Tukker, A. en E. Dietzenbacher (2013). Global multi-regional input output frameworks: An introduction and outlook, *Economic Systems Research*, vol. 25, no. 1, pp. 1-19.
- 82 Tukker, A., T. Bulavskaya, S. Giljum, A. de Koning, S. Lutter, M. Simas, K. Stadler en R. Wood, R. (2014). The Global Resource Footprint of Nations. Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption calculated with EXIOBASE 2.1. Leiden/Delft/Vienna/Trondheim.
- 83 Heijungs, R. (1997), *Economic Drama and the Environmental Stage*. Dissertation, CML, Leiden University, <https://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/8056>.
- 84 Zie ook: Heijungs, R. en S. Suh. *The computational structure of life cycle assessment*. Kluwer Academic Publishers (ISBN 1-4020-0672-1), Dordrecht, 2002.
- 85 Mijn collega Manfred Lenzen van de University of Sydney werkt momenteel met Australische partners aan zo'n 'Industrial Ecology Lab'. De kracht van het concept is evident, maar het blijkt ook oppassen de gekoppelde data niet op een onmogelijk gedetailleerd schaalniveau te willen gebruiken. Zie: Lenzen, M., A. Geschke, T. Wiedmann, J. Lane, N. Anderson, T. Baynes, J. Boland, P. Daniels, C. Dey, J. Fry, M. Hadjikakou, S. Kenway, A. Malik, D. Moran, J. Murray, S. Nettleton, L. Poruschi, C. Reynolds, H. Rowley, J. Ugon, D. Webb en J. West, J. (2014). Compiling and using input-output frameworks through collaborative virtual laboratories. *Science of the Total Environment*, Vol. 485-486, pp. 241-251.
- 86 Dong Liang (2014). Research on an analytical methodology to plan and evaluate industrial symbiosis in steel plant industrial complexes. PhD Thesis, Graduate school of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, Japan.
- 87 Mijn vroegere collega's bij NTNU schreven hierover een aantal interessante artikelen. Zie b.v. Pauliuk, S., G. Majeau-Bettez en D.B. Müller (2015). A general system structure and accounting framework for socioeconomic metabolism. *Journal of Industrial Ecology*. vol. 19 (5); Pauliuk, S., G. Majeau-Bettez en D.B. Müller (2015) A general system structure and accounting framework for socioeconomic metabolism. *Journal of Industrial Ecology*. vol. 19 (5). Majeau-Bettez, G., R. Wood, E.G. Hertwich en A.H. Strømman (2015). When Do Allocations and Constructs Respect Material, Energy, Financial, and Production Balances in LCA and EEIO?. *Journal of Industrial Ecology*. DOI: 10.1111/jiec.12273.
- 88 Zie ook open-source software of freeware voor het analyseren van LCA en IOA databases, zoals Brightway (<https://brightwaylca.org/>), pymrio (<https://github.com/konstantinstadler/pymrio>) en CML's eigen CMLCA (<http://www.cmlca.eu/>) (geraadpleegd 16 januari 2016).
- 89 Zie: <http://www.camecon.com/EnergyEnvironment/EnergyEnvironmentEurope/ModellingCapability/E3ME.aspx>.
- 90 Stehfest, E., D. van Vuuren, T. Kram, L. Bouwman, R. Alkemade, M. Bakkenes, H. Biemans, A. Bouwman, M. den Elzen, J. Janse, P. Lucas, J. van Minnen, M. Muller en A.G. Prins (2014). Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0 - Model description and policy applications. PBL, Den Haag/Bilthoven.
- 91 <http://wiki.umd.edu/gcam/>.
- 92 Font Vivanco, D. (2016): The rebound effect through industrial ecology's eyes: The case of transport eco-innovation. Dissertation, CML, Leiden University, 3 March 2016.
- 93 De Koning, A., G. Huppes, S. Deetman en A. Tukker (2015). "Scenarios for a 2°C world: a trade-linked input-output model with high sector detail", *Climate Policy*, in press.

- 94 Zie: De Koning, A., R. Kleijn, G. van Engelen en G. Huppes (2015). Resource constraints in successful climate policy. Key constraints and bottlenecks. Deliverable 4.2, EU FP7 CECILIA 2050, CML, Leiden, Netherlands.
- 95 UNEP (2010) Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials, A Report of the Working Group on the Environmental Impacts of Products and Materials to the International Panel for Sustainable Resource Management. Hertwich, E., E. van der Voet, S. Suh, A. Tukker, M. Huijbregts, P. Kazmierczyk, M. Lenzen, J. McNeely en Y. Moriguchi. UNEP, Paris, France

