



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

Software and data for circular economy assessment

Donati, F.

Citation

Donati, F. (2023, April 26). *Software and data for circular economy assessment*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3594655>

Version: Publisher's Version

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3594655>

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

SAMENVATTING

De circulaire economie (CE) is een industrieel-economisch paradigma dat wordt gepromoot met het doel het absolute verbruik van hulpbronnen en de uitstoot van verontreinigende stoffen te minimaliseren en tegelijk optimale sociaaleconomische prestaties te garanderen. Dit doel wordt nagestreefd door middel van diverse technisch-bedrijfskundig (bv. verandering van business model en toepassing van nieuwe technologie en design) en beleidsbenaderingen (bv. wijziging van regelgeving om bepaalde activiteiten te bevorderen of te beperken). Er bestaat een grote verscheidenheid aan strategieën voor een circulaire economie en de specifieke uitvoering kan sterk variëren, afhankelijk van het type product, het productieproces, de acceptatie door huishoudens en de inzet van beleidsmakers. Enkele van de belangrijkste CE-strategieën zijn verlenging van de levensduur van producten, efficiënt gebruik van hulpbronnen, het hergebruik van producten, componenten en materialen door middel van ketensluiting en hoogwaardig verwerken van restafval. Daarnaast is het van belang hoe de lokale economie is ingebed in het mondiale productie- en consumptiesysteem. Zo kunnen strategieën voor een circulaire economie in Nederland weliswaar hier leiden tot langer gebruik van producten en meer werk ten aanzien van reparatie, maar tot verlies aan banen en toegevoegde waarde elders als die producten in het buitenland worden gemaakt. Het analyseren van de economische, sociale en milieuprestaties in exporterende landen is nuttig om de gevolgen van de uitvoering van strategieën voor een circulaire economie in het hele internationale consumptie- en productiesysteem te begrijpen. Dergelijke inzichten zijn nodig om de voor- en nadelen van circulaire strategieën volledig te begrijpen, aangezien veranderingen in één sector of regio onvermijdelijk een kettingreactie teweeg brengt in de mondiale toeleveringsketens. Tegelijkertijd is de geven productie-consumptieketens een heel diverse soorten van milieudruk. Vermindering van één type milieudruk leidt soms tot verhoging van een ander type, of andere onbedoelde effecten (zie hoofdstuk 2). Kortom, de economische, sociale en milieueffecten van CE-maatregelen in een specifiek land of een specifieke sector hebben een geografische doorwerking en zijn van uiteenlopende aard waarbij probleemafwenteling op de loer ligt. Dit proefschrift stelt zich daarom de vraag op welke manier de economische en

duurzaamheidseffecten van CE-strategieën in kaart kunnen worden gebracht en hoe de daarvoor benodigde gedetailleerde data verkregen kan worden.

In hoofdstuk 2 hebben wij laten zien hoe de analyse van economische en ecologische trade-offs kan worden uitgevoerd voor de landbouwsector. Multi-Regionale Milieukundige Input Output Analyse (in het Engels: Environmentally Extended Input-Output Analysis (MR EEIOA) is hiervoor een zeer geschikt instrument. De gegevens die ten grondslag liggen aan MR EEIOA (d.w.z. MR EEIO-tabellen) zijn gebaseerd op economische input-outputtabellen (IO-tabellen). Dergelijke tabellen verdelen de economie van een land in een aantal sectoren (of producten) en hun inputs (bv. diensten, goederen en werkgelegenheid) die nodig zijn voor de levering van goederen en diensten aan andere sectoren en eindverbruikers. Het verschil tussen het verbruik van alle producten en diensten door een industrie en haar output is de toegevoegde waarde (d.w.z. de som van lonen, belastingen en subsidies en winst). De som van alle toegevoegde waarde per bedrijfstak per land bepaalt het Bruto Binnenlands Product (BBP). Wanneer IO-tabellen van meerdere landen worden gecombineerd en met elkaar worden verbonden via hun handelsbetrekkingen, resulteert dit in een multiregionaal IO-systeem, dat in principe alle landen en alle sectoren in de wereldeconomie kan bestrijken (d.w.z. wereldwijde MRIO). Een mondiaal MRIO omvat dus mondiale waardeketens, sociale informatie zoals het aantal banen, economische informatie zoals toegevoegde waarde. Indien een MRIO-systeem (mondiaal, subnationaal of anderszins) vergezeld gaat van een reeks milieu-uitbreidingen, wordt het een MR EEIO-systeem genoemd. Deze structuur van MR EE IO tabellen maakt het mogelijk om de milieuoetadruk van productgroepen en delen van waardenketens vast te stellen, en ook in welke stappen van de keten de meeste milieudruk wordt gegenereerd (de zogenaamde hot spots). Dit vormt weer een geschikt uitgangspunt voor het ontwikkelen van verbeteropties zoals CE interventies

Het gebruik van MR EEIO voor het analyseren van de effecten van CE-strategieën is echter niet zonder problemen. Software voor scenariomodellering is bijvoorbeeld niet gemakkelijk toegankelijk. Scenariogegevens kunnen vaak niet worden hergebruikt vanwege de ondoorzichtigheid van de gebruikte inputs en de manier waarop deze

worden geïmplementeerd om zogenaamde 'counterfactual' scenario's te construeren. Deze punten waren aanleiding voor de tweede studie in dit proefschrift in hoofdstuk 3, waarin we software hebben ontwikkeld waarmee beleidsanalisten complexe CE scenario's kunnen maken en de resultaten ervan kunnen analyseren. De software is ontwikkeld in Python en noemden we 'pycirk'. Daarnaast is er een standaard protocol ontwikkeld voor de manier waarop CE-strategieën voor productlevensduurverlenging en hulpbronnefficiëntie kunnen worden geïmplementeerd in MR EEIO tabellen. Dit helpt bij het transparant construeren van dit type CE scenario's. Dankzij de gestandaardiseerde structuur kunnen de scenario-instellingen in de software gemakkelijk worden gedeeld met andere gebruikers en analisten en in publicaties. Voor deze studie hebben we ook een case studie uitgevoerd over verlenging van de levensduur van producten en maatregelen voor een efficiënt gebruik van hulpbronnen bij het gebruik en de vervaardiging van duurzame producten (d.w.z. machines en voertuigen) en constructies. Deze studie gaf ook de beperkingen van de aanpak aan. Zo moesten bepaalde productcategorieën handmatig worden gedisaggregeerd omdat de data in beschikbare MR EEIO databases te generiek bleken.

Hoewel de pycirk-software dus verschillende scenarioanalyses voor CE mogelijk maakte, was het onvoldoende gebruiksvriendelijk. Een grafische gebruikersinterface voor invoer van scenario-parameters en directe visualisatie van resultaten was gewenst om de toegankelijkheid voor voor praktijkmensen zonder een achtergrond in softwareontwikkeling. Daarom werd, zoals beschreven in hoofdstuk 4, de RaMa-Scene web-applicatie ontwikkeld (<https://www.ramascene.eu>). Dit hoofdstuk presenteert een web-applicatie met een grafische gebruikersinterface die toegankelijk is voor iedereen met een internetverbinding en waarmee het mogelijk is complexe scenario's te construeren en de resultaten ervan snel te visualiseren en te downloaden, waardoor het werken met MR EEIO-gegevens enorm vergemakkelijkt wordt. Sinds de invoering ervan is RaMa-Scene gebruikt in universitaire cursussen en door consultants om de sociaal-economische en milieueffecten van producten en mogelijke beleidsimplementaties te bestuderen.

Zowel in hoofdstuk 3 als in hoofdstuk 4 constateerden wij dat met MR EEIO-gegevens alleen CE-strategieën zoals verlenging van de productlevensduur

en strategieën voor efficiënt hulpbronnengebruik kunnen worden gemodelleerd. MR EEIO-tabellen zijn momenteel onvoldoende gedetailleerd om bijvoorbeeld hergebruik van producten, componenten of materialen (ofwel: ketensluiting) te modelleren, omdat het hier om zeer product- of zelfs component en materiaal-specifieke opties gaat. Het modelleren van deze CE strategie vereist dus vereist een zeer hoge resolutie op product- en zelfs component- en materiaalniveau. Bovendien beschrijft MR EEIO de economie in de eerste plaats in monetaire termen. Voor restafval geeft een geldwaarde vaak geen goede reflectie van het fysieke afvalvolume. Juist dit fysieke afvalvolume is van belang bij het doorrekenen van opties voor hoogwaardige verwerking van restafval, dus voor deze CE strategie zou een fysieke MR EEIO meer inzichtelijke resultaten zou geven. Productcategorieën in MR EEIO-gegevens zijn vaak aggregaten van verschillende producten (bv. mobiele telefoons, pc's enz. worden gecombineerd tot elektrische en elektronische producten). Dit is een detailniveau wat in MR EEIO tabellen, die de economie normaal in maximaal 100-150 productgroepen opdelen, onmogelijk kan worden gehaald. Zoals aangegeven hebben EEIO-tabellen echter het voordeel dat zij een volledig beeld geven van de onderlinge relaties van economieën en industrieën over de hele wereld, iets wat doorgaans niet mogelijk is met andere soorten databronnen zoals die welke voor Levenscyclusanalyse van producten (LCA) of handelsanalyse worden gebruikt. Met andere woorden, in de periode waarin dit proefschrift werd geschreven (2017-2022) was er qua keuze tussen databases voor economische en milieuanalyse altijd een afweging te maken tussen detail en volledigheid van de gegevens. Sommige auteurs hebben geprobeerd hybride methoden toe te passen om met de tekortkomingen van databases om te gaan. Dergelijke hybride LCA-methoden gebruiken de relatief geaggregeerde MR EEIO-gegevens als achtergrond, en gedetailleerde Life Cycle Inventory-gegevens als voorgrond. Dit type hybridisatie is handig omdat LCA- en IO-methoden de milieuvoetafdruk op een vergelijkbare manier berekenen, en LCI-gegevens in sommige gevallen worden gebruikt om MR EEIO-databases te detailleren of om milieu-extensies te schatten. Het verzamelen van gegevens op het detailniveau dat nodig is om de effecten CE strategieën zoals ketensluiting en hoogwaardige afvalverwerking te beoordelen, is echter tijdrovend. Verder zijn de mogelijkheid om data te verkrijgen vaak ook beperkt om redenen van betrouwbaarheid.

In het vijfde hoofdstuk van dit proefschrift hebben we daarom onderzocht hoe Computer-Aided Technologies (CAx) en Artificial Intelligence (AI) kunnen worden gebruikt om gegevens uit verschillende bronnen te converteren en/of LCI data te kunnen schatten. Dit werk helpt niet alleen bij de uitbreiding van LCI databases, maar bevordert ook een sterkere integratie van LCA met open source software die wordt gebruikt voor productontwerp, en draagt bij tot de ontwikkeling van 'digital twins' van productieprocessen in toeleveringsketens. Deze gegevens en systemen kunnen vervolgens worden gebruikt om het detail van EEIO databases qua producten en industrieën te verhogen, zodat zij steeds meer het niveau van detail van LCIs benaderen. Maar er is ook meer coördinatie nodig om optimaal gebruik te maken van de huidige digitale infrastructuur, expertise en automatiseringsmethoden om ons vermogen om de sociaaleconomische en milieueffecten van de circulaire economie te beoordelen, te verbeteren. Het laatste artikel van dit proefschrift beschrijft daarom hoe de gemeenschap van Industrieel Ecologen digitale technologieën in combinatie met AI-methoden kunnen worden gebruikt om de besluitvorming rond duurzaamheidsvraagstukken op alle niveaus te ondersteunen.

Er zijn verschillende beperkingen in het werk dat in dit proefschrift is gepresenteerd, die inspiratie bieden voor toekomstig onderzoek. Ten eerste is MR EEIO weliswaar een effectief instrument gebleken om CE-interventies te modelleren voor strategieën zoals levensduurverlenging en voor efficiënt gebruik van hulpbronnen. Zoals hierboven besproken is het echter nog niet goed geschikt voor het modelleren van ketensluiting of hoogwaardig verwerken van restafval. Ook schiet MR EEIO in praktijk tekort in het meten van veranderingen in materiaalvoorraden. Deze beperkingen komen voort uit het gebrek aan fysieke gegevens over productie en verbruik van producten, naast een gebrek aan detail in de resolutie van producten en productiesectoren. Hybride MR EEIO en fysieke MR EEIO kunnen het mogelijk maken de fysieke aspecten van de economie beter in kaart te brengen, en daarmee een betere basis bieden voor werk rond CE scenarios. Toekomstig onderzoek moet het gebruik van instrumenten voor de beoordeling van CE uitbreiden met hybride en meer gedetailleerde MR EEIO-gegevens. Ten tweede, hoewel vele soorten ecologische, sociale en economische effecten kunnen worden beoordeeld met MR EEIO-databases, is dit kader nog nauwelijks gekoppeld aan het concept van planetaire en

sociale grenzen. Dat is belangrijk om te begrijpen of CE-strategieën ons binnen een ecologisch veilige en sociaal-economisch rechtvaardige ruimte brengen. Toekomstig onderzoek zou kunnen nagaan hoe gekwantificeerde sociale en planetaire grenzen kunnen worden geïntegreerd in gebruiksvriendelijke instrumenten zoals RaMa-Scene.

Ten derde zijn de MR EEIO en LCI databases die aan de basis liggen van onze aanpak in essentie lineair. Wij weten echter dat de sociaal-economische en milieudynamiek complex en niet-lineair kan zijn. De hybridisatie van statische met dynamische modellen kan extra inzichten rond CE scenario's opleveren die voor lineaire modellen zoals het Leontief-model eenvoudigweg buiten bereik liggen. En ten vierde, ons onderzoek rond CAX- en AI-methoden om de beschikbaarheid van gegevens voor LCI en MR EEIO-gegevens te vergroten kent beperkingen. Potentieel nuttige methoden uit andere vakgebieden zijn niet meegenomen. Evenmin hebben wij manieren onderzocht om het regionale detail qua productie en gebruik van producten te vergroten.

Naarmate de behoefte aan inzicht in de duurzaamheid van onze economie in relatie tot de ecologische crisis toeneemt, zullen meer en effectievere instrumenten voor gegevens- en scenarioverkenning (bv. voor circulaire economie en duurzaamheidsbeoordeling) nodig zijn. Dit geldt ook voor data die nodig zijn voor CE beleid. In het kader van de digitale strategie van de EU, de Europese datastrategie en het EU Actieplan voor de Circulaire Economie is de Europese Commissie bijvoorbeeld van plan 'CE- dataspaces' te creëren waarin informatie over circulariteit, demontagemogelijkheden en duurzaamheid van producten wordt opgeslagen. Deze ambities schieten echter tekort als ze onvoldoende ondersteund worden in termen van governance en financiering. Idealiter worden nationale en internationale statistische organisaties betrokken bij een proces van harmonisatie en institutionalisatie van gegevensverzameling in verschillende globale regio's. Dit kan een veel beter beeld geven van de manier waarop wij natuurlijke hulpbronnen gebruiken en van de effecten gedurende de levenscyclus van producten en diensten. De weg voorwaarts is niet vrij van uitdagingen. Het in dit proefschrift gepresenteerde werk beoogt een bescheiden bijdrage te leveren aan het oplossen daarvan.