



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Regional LCA in a global perspective

Wegener Sleeswijk, A.

Citation

Wegener Sleeswijk, A. (2010, September 2). *Regional LCA in a global perspective*. Uitgeverij BOX Press, Oisterwijk. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/15921>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/15921>

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

Samenvatting

Levenscyclusanalyse van producten (LCA) is een methode waarmee de milieueffecten van producten kunnen worden beoordeeld. Drie begrippen staan daarbij centraal: de *levenscyclus* van het product, *karakterisatiefactoren* en de zogenaamde *functionele eenheid*. De *levenscyclus* of levensketen van het product omvat naast de productie en het gebruik van het product ook alle processen die daar direct of indirect mee samenhangen, zoals de winning van grondstoffen, de verwerking van het afgedankte product en de productie van energie en hulpstoffen die nodig zijn om het product te maken en/of te gebruiken. *Karakterisatiefactoren* zijn getallen die aangeven hoeveel een standaardhoeveelheid van een stof in het milieu bijdraagt aan een bepaald type milieueffect. De verschillende typen milieueffecten zijn ondergebracht in *effectcategorieën* zoals de uitputting van grondstoffen, landgebruik, het broeikas effect, verzuring, vermisting, humane toxiciteit en ecotoxiciteit. Een product dat met LCA wordt beoordeeld ontvangt per effectcategorie een *effectscore*. De *functionele eenheid*, tenslotte, is een maat voor de hoeveelheid product waarop de beoordeling betrekking heeft. Het functionele aspect is vooral van belang bij het vergelijken van verschillende producten met dezelfde functie: daarbij dient niet de fysieke hoeveelheid product als vergelijkingsbasis, maar de mate waarin een hoeveelheid product de benodigde functie kan vervullen. Zo is bij een milieuanalyse van melkverpakkingen ‘de verpakking van 1000 liter melk’ een mogelijke functionele eenheid, en zullen 1000 melkpakken daarbij vergeleken worden met 25 statiegeldflessen – gesteld dat zo’n fles 40 keer meegaat. De verpakkingen worden beoordeeld op de mate waarin ze bijdragen aan de verschillende effectcategorieën, gedurende de levenscyclus die loopt van de winning van grondstoffen via productie, vervoer en (voor flessen) retourtransport en schoonmaak tot en met afvalverbranding en/of verwerking tot herbruikbare grondstoffen.

De analyse gebeurt in drie stappen: *inventarisatie*, *effectbeoordeling* en *interpretatie*. In de inventarisatie worden de kwantitatieve gegevens verzameld: de directe en indirecte bijdragen van de functionele eenheid aan de onttrekking van grondstoffen, aan landgebruik en aan de uitstoot – of *emissie* – van schadelijke stoffen naar lucht, water en bodem. Emissies en onttrekkingen samen worden aangeduid als (*milieu*)-*ingrepen*. In de effectbeoordeling (ook wel aangeduid al *LCLA – life cycle impact assessment*) worden de effectscores voor iedere effectcategorie berekend en gecombineerd tot een zogenaamd *milieuprofiel*. Omdat de effectscores als zodanig moeilijk te interpreteren zijn worden deze vaak genormaliseerd, dat wil zeggen dat ze worden uitgedrukt als fractie van het totale milieueffect op wereldschaal, op conti-

mentale schaal of in een bepaald land. Zo kan worden bepaald aan welke effect-categorieën het product een relatief grote bijdrage levert.

LCA gaat over kwantificeerbare milieueffecten, met name effecten die het gevolg zijn van emissies van milieuschadelijke stoffen, onttrekkingen van grondstoffen en landgebruik. In dit proefschrift staan de emissies van toxische stoffen centraal: stoffen die giftig zijn voor de mens of voor planten, dieren of micro-organismen. Een belangrijk kenmerk van deze stofgroep is dat het om een zeer groot aantal stoffen gaat. Dit in tegenstelling tot de stofgroepen die verantwoordelijk zijn voor het broeikas-effect, verzuring en vermesting: daarbij speelt voornamelijk een klein aantal 'bulk' emissies een rol: koolstofdioxide, methaan, zwaveldioxide, stikstof-oxiden, ammoniak, nitraat en fosfaat.

Het aantal toxische stoffen dat in het milieu wordt geloosd bedraagt vele duizenden. Om het effect van deze stoffen te kunnen bepalen is het niet alleen nodig om te weten hoe toxisch ze zijn: ook de verspreiding en afbraak in het milieu en de mate waarin de mens deze stoffen via voedsel en drinkwater binnenkrijgt zal moeten worden gemeten of gemodelleerd. Het voordeel van meting is dat het meestal de nauwkeurigste manier is om concentraties in het milieu en in voedsel en drinkwater te bepalen. Modelleren heeft andere voordelen: het heeft een voorspellende waarde, het behoeft slechts eenmalig te gebeuren – waarna het model iedere keer opnieuw met emissiegegevens kan worden ingevuld – en het kan duidelijkheid bieden over de herkomst van de verontreiniging. De omvang van de bijdrage van een product met alle daaraan verbonden processen aan milieuverontreiniging kan niet worden gemeten. Voor LCA is modellering daarom de enige optie. In dit proefschrift staat de modellering van de verspreiding en afbraak van toxische stoffen en de blootstelling van mensen en ecosystemen aan die stoffen centraal.

Binnen de LCA vormt de toxiciteitsbeoordeling slechts een onderdeel van het geheel – naast de beoordeling op het gebied van milieuthema's zoals het broeikas-effect, de aantasting van de ozonlaag, verzuring, vermesting, landgebruik en de uitputting van grondstoffen. Een vakgebied waarin juist toxische stoffen in het milieu centraal staan is de risico-analyse van stoffen, ook wel *human and environmental risk assessment (HRA and ERA of HERA)* of *risk assessment of chemicals (RA)* genoemd.

De methoden die in de LC(I)A worden gebruikt voor de beoordeling van toxische effecten zijn meestal geënt op methoden uit de HERA. Omdat LCA andere eisen stelt dan HERA moeten deze methoden echter op bepaalde punten worden aangepast. Beide instrumenten leveren dan ook verschillende resultaten op. Omdat LCA en HERA beide worden gebruikt voor het maken van milieuverantwoorde keuzen kan het verwarrend zijn wanneer de resultaten van beide methoden tegenstrijdig zijn. Een nadere analyses van de verschillen tussen beide instrumen-

ten en van de mogelijkheden tot stroomlijning en integratie is daarom noodzakelijk.

Voor het modelleren van de verspreiding en afbraak van stoffen in het milieu zijn verschillende typen modellen in omloop. Binnen de LCA wordt vaak gebruik gemaakt van de zogenaamde *multimediamodellen*. In deze modellen – die oorspronkelijk zijn ontwikkeld door Don Mackay van de Canadese *Trent University* – zijn de fysisch-chemische transportprocessen tussen lucht, water en bodem, en afbraakprocessen binnen elk van deze milieucompartmenten, gemodelleerd als functie van enerzijds de chemische eigenschappen van de betrokken stoffen zoals vluchtigheid en oplosbaarheid en anderzijds de fysisch-chemische milieueigenschappen zoals de omgevingstemperatuur en het organische-stofgehalte van de bodem. Binnen lucht, water en bodem worden de concentraties in principe verondersteld homogeen te zijn. Wel kunnen diverse ‘eenheidswerelden’, met elk hun eigen lucht-, water- en bodemcompartiment, aaneengeschakeld worden. Dit leidt ertoe dat er binnen hetzelfde medium verschillende compartimenten worden gedefinieerd. Uiteraard dient in dit geval ook het transport tussen dergelijke gelijksoortige compartimenten te worden gemodelleerd – bijvoorbeeld het stromingstransport tussen twee luchtcompartimenten als functie van de windsnelheid. Binnen ieder compartiment kan afbraak plaatsvinden. Daarnaast kunnen stoffen ook worden getransporteerd naar compartimenten die verondersteld worden geen deel uit te maken van het ecologisch systeem – bijvoorbeeld diepere bodem- of sedimentlagen. Omdat de stoffen daarmee uit het gemodelleerde milieusysteem verdwijnen heeft dit modelmatig hetzelfde effect als afbraak.

De multimediamodellen zijn ontworpen voor organische stoffen. Het bijzondere van deze modellen is dat ze voor iedere organische stof kunnen worden toegepast: het invoeren van een klein aantal chemische eigenschappen en afbraaksnelheden bij een standaardtemperatuur volstaat voor het uitvoeren van de berekeningen. Anorganische stoffen passen echter niet zonder meer in deze modellen. Met name metalen zijn lastig in te voeren, enerzijds omdat de metaalspecifieke speciatieprocessen – waarbij metalen zich in het milieu uitsplitsen in verschillende chemische vormen – niet in de bestaande multimediamodellen zijn opgenomen, en anderzijds omdat metalen niet afbreekbaar zijn, en daarom in principe altijd in het milieu aanwezig blijven.

De basale modellen voor multimediatransport, menselijke blootstelling en de toxische potentie van stoffen vormen een waardevolle basis voor het modelleren van toxische effecten in LCA. Toch moeten daarnaast nog een aantal LCA-specifieke problemen worden opgelost. Eén van de meest bekritiseerde aspecten van de toxiciteitsbeoordeling in LCA is het gebruik van de zogenaamde *potentiële effecten* in LCA milieuprofielen, als tegenhanger van de *actuele effecten* of risico's die met HERA worden geschat. De tegenstelling in karakter tussen de uitkomsten van respectievelijk LCA en HERA worden ook wel aangeduid met de termen *algemene*

preventie versus *risicominimalisatie*, oftewel *minder is beter* versus *alleen boven de drempel*. In dit proefschrift worden de mogelijkheden en beperkingen verkend die betrekking hebben op de integratie van LCA en HERA. Aangetoond wordt dat de functionele eenheid – waarvan wordt beredeneerd dat deze het enige fundamentele verschil vormt tussen LCA en HERA – het onmogelijk maakt de beide instrumenten volledig met elkaar te integreren, dat wil zeggen: om LCA aan te vullen met een geïntegreerde risicobeoordeling. Wel wordt een methode voorgesteld voor het beoordelen van *risicobijdragen* van de productlevenscyclus in de context van LCA. Omdat de risico's afhankelijk zijn van de regionale verschillen voor wat betreft zowel de verspreiding en afbraak van als de menselijke blootstelling aan toxische stoffen, is zo'n beoordeling van risicobijdragen niet mogelijk zonder ruimtelijke differentiatie. Tegelijk is echter ook een wereldwijde dekking van alle milieumodelleringsaspecten een voorwaarde voor LCA, enerzijds omdat de productlevenscyclus zich willekeurig over de gehele wereld kan uitstrekken – ook voor producten die bijvoorbeeld in Nederland worden geproduceerd en gebruikt – en anderzijds omdat er steeds meer vraag komt naar methoden die geschikt zijn voor het beoordelen van producten die afkomstig zijn uit ieder willekeurig land. In het GLOBOX-model worden de beide genoemde principes verenigd: het is een wereldwijd model dat regionaal gedifferentieerd is op het niveau van individuele landen, territoria*, zeeën en oceanen. Deze basis voor differentiatie is gekozen omdat zowel emissiegegevens als gegevens die betrekking hebben op de parameters voor de modellering van multimediatransport en blootstelling vaak per land of regio beschikbaar zijn.

De kern van dit proefschrift wordt dus gevormd door het model GLOBOX: een speciaal voor LCA ontworpen combinatie van een multimediamodel, een blootstellingsmodel en een effectmodel, waarmee LCA-karakterisatiefactoren voor zowel de humaan-toxische als de eco-toxische effecten van stoffen kunnen worden berekend. GLOBOX onderscheidt zich van de reeds bestaande modellen doordat het ruimtelijk gedifferentieerd is en tegelijk de wereld als geheel bestrijkt.

Dit proefschrift heeft vijf doelen:

1. Het maken van een flexibel, redelijk fijnmazig model voor ruimtelijke differentiatie van de LCA toxiciteitsbeoordeling op wereldschaal, om daarmee bij te dragen aan een optimale betrouwbaarheid van de LCA toxiciteitsbeoordeling.
2. Het vergroten van de betrouwbaarheid van de LCA-modellering van het gedrag van metalen in het milieu.

* Deze omvatten overzeese gebiedsdelen (zoals Réunion) en onbewoonde gebieden (zoals Antarctica).

3. De introductie van een methode voor het beoordelen van bijdragen van de productlevenscyclus aan toxische risico's of actuele effecten, naast de gebruikelijke beoordeling van potentiële effecten.
4. Het toetsen van de invloed van ruimtelijke differentiatie op LCA karakterisatiefactoren voor humane toxiciteit en ecotoxiciteit door middel van modelberekeningen aan een voorbeeldstof.
5. Het opstellen van een geactualiseerd, wereldwijd normalisatiesysteem.

In tegenstelling tot de bestaande LCA multimedia- en blootstellingsmodellen, die hun parameters vaak impliciet ontleen aan de milieu- en blootstellingsgegevens in Europa, de Verenigde Staten en Japan, biedt het GLOBOX-model de mogelijkheid expliciet te kiezen voor emissies die plaatsvinden in gebieden buiten deze regio's. Daarmee wordt het mogelijk gemaakt om bij de beoordeling van producten die afkomstig zijn uit andere regio's – maar ook bij de beoordeling van niet-regionale processen binnen levenscycli van Europese, Amerikaanse en Japanse producten – recht te doen aan de ruimtelijke verschillen in milieu- en blootstellingsomstandigheden.

Naast het opstellen en aanpassen van modelvergelijkingen heeft ook het verzamelen en construeren van modelparameters een belangrijke rol gespeeld binnen het onderzoek dat aan dit proefschrift ten grondslag ligt. Het GLOBOX-model en de onderliggende parametersets (de GLOBACK achtergrondgegevens) zijn te vinden op <http://cml.leiden.edu/software/software-globox.html> en op <http://www.globright.nl>. Behalve een *executable* versie van model zelf zijn daar de volgende parametersets gepubliceerd:

- GLOBACK 2.0, deel 1 en 2
- aanvulling op deel 1 van GLOBACK 2.0, voor deelgebieden van de Verenigde Staten en Canada
- normalisatiegegevens

Deel 1 van GLOBACK 2.0 bevat alle ruimtelijk gedifferentieerde milieu- en blootstellingsparameters voor het GLOBOX-model, inclusief de parameters die de ruimtelijk gedifferentieerde hydrologische cyclus bepalen, en schattingen van het voedselconsumptiepatroon in de individuele landen. Deel 2 bevat parameters voor de grootte van de lucht- en waterstromingen tussen de verschillende gebieden. Voor een verdere opsplitsing van twee grote landen – de Verenigde Staten en Canada – is een groot deel van de parameters uit deel 1 van GLOBACK ook reeds verzameld. Na aanvulling met de nog ontbrekende parameters en de parameters uit deel 2 kunnen deze gebieden zonder meer in het GLOBOX-model worden opgenomen. De normalisatiegegevens vormen een verzameling schattingen van de emissies naar en onttrekkingen uit het milieu voor zo veel mogelijk stoffen op wereldschaal en op Europees niveau, veroorzaakt door de economische activiteiten

in het jaar 2000. Daarnaast is ook een schatting van de diverse vormen van landgebruik gemaakt. Tezamen vormen deze parametersets een basis die niet alleen voor het GLOBOX-model en LCA-normalisatie, maar ook voor andere modellen en modelberekeningen kan worden ingezet.

Dit proefschrift bestaat uit zeven hoofdstukken. De hoofdstukken 1 en 7 zijn respectievelijk een inleiding en een discussie over het document als geheel. De overige vijf hoofdstukken zijn als gereviewde artikelen verschenen in internationale tijdschriften of – in het geval van hoofdstuk 4 – verschenen als gereviewd hoofdstuk van een boek. De hoofdstukken 2 en 3 vormen een theoretische inleiding. De hoofdstukken 4, 5 en 6 vormen tezamen een praktische handleiding voor de LCA-effectbeoordeling van toxische stoffen en de normalisatie van LCA-effectscores voor alle LCA-effectcategorieën. Hoofdstuk 5 is geïmplementeerd als software-model (GLOBOX), dat als zodanig ook buiten de context van LCA bruikbaar is.

Hoofdstuk 2: Introductie van informatie over gevoeligheid en drempelwaarden in LCA

In hoofdstuk 2 wordt LCA beschouwd vanuit twee perspectieven: dat van de *algemene preventie* en dat van de *risicominimalisatie*. Het algemene-preventieprincipe berust op de overtuiging dat milieuverontreiniging altijd ongewenst is en dat het nastreven van een minimum aan milieuverontreiniging daarom als zodanig belangrijk is; dit wordt ook wel aangeduid met de term *minder is beter* ('less is better'). Het uitgangspunt van het risicominimalisatieprincipe is de overtuiging dat het minimaliseren van aantoonbare risico's bij het terugdringen van de milieuverontreiniging centraal zou moeten staan. Omdat vaak wordt aangenomen dat er voor veel toxische stoffen beneden bepaalde drempelwaarden niet of nauwelijks meer aantoonbare milieueffecten optreden wordt dit principe wel aangeduid met de term *alleen boven de drempel* ('only above threshold'). De algemene trend is dat de beoordelingsmethode in LCA geacht wordt te berusten op het algemene-preventieprincipe en die van de HERA op het risicominimalisatieprincipe.

Het feit dat de uitkomsten van LCA hiermee niet direct betrekking hebben op risico's is door critici wel gebruikt om de betrouwbaarheid van LCA als zodanig in twijfel te trekken. In dit hoofdstuk wordt aangetoond dat de beide principes niet tegenover elkaar behoeven te staan, maar dat ze goed te verenigen zijn. Ook binnen LCA is het mogelijk beide principes tot uitdrukking te laten komen. Bepleit wordt voor dit doel twee nieuwe variabelen te introduceren in de LCA-toxiciteitsmodellering: een *gevoeligheidsfactor* en een *drempelfactor*. Omdat het hier gaat om regio-specifieke variabelen is ruimtelijke differentiatie voor deze benadering wel een noodzakelijke voorwaarde. Met de gevoeligheidsfactor wordt aangeduid in hoeverre de ecosystemen in een gebied gevoelig zijn voor een bepaalde stof, terwijl de drempelfactor een maat vormt voor de fractie van het gebied waar de norm of het *no effect level* reeds wordt overschreden. Alhoewel met LCA geen risico's kunnen worden berekend zou op deze manier wel een kwantitatieve maat ontstaan voor de bijdrage van een product aan toxische risico's in het algemeen. Per effectcategorie

kan op deze manier een dubbele effectscore worden berekend: één volgens de traditionele methode in het kader van de algemene preventie en één volgens de nieuwe methode in het kader van de risicominimalisatie. Hiermee is het mogelijk LCA en HERA nader tot elkaar te brengen zonder dat dit ten koste gaat van de karakteristieke kenmerken van LCA.

Hoofdstuk 3: LCA versus HERA

In hoofdstuk 3 worden LCA en HERA naast elkaar gezet. In de bestaande literatuur beschouwen sommige auteurs deze twee modelbenaderingen als min of meer gelijk, terwijl anderen ze juist zien als twee totaal verschillende benaderingen. Om hierin meer helderheid te brengen worden LCA en HERA in dit hoofdstuk op drie niveaus met elkaar vergeleken.

Niveau 1 vertegenwoordigt de basisvergelijkingen die het gedrag van stoffen in het milieu en de dosis-responsrelaties beschrijft. Op dit gebied bestaat er nauwelijks verschil: in principe hebben beide instrumenten betrekking op dezelfde milieuprocessen, hanteren ze dezelfde wiskundige vergelijkingen om het verband tussen emissies enerzijds en concentraties in het milieu, menselijke inname, en milieueffecten anderzijds weer te geven en maken ze gebruik van dezelfde stof- en milieueigenschappen.

Niveau 2 vertegenwoordigt de globale modelstructuur van de beide instrumenten. Gesteld wordt dat LCA ten opzichte van HERA een tiental eigen karakteristieken bevat: het levenscyclusperspectief, het feit dat het onderwerp van de analyse wordt gevormd door producten in plaats van stoffen, het grote aantal betrokken economische processen, het grote aantal betrokken stoffen en effectcategorieën, de grote reikwijdte voor wat betreft de milieueffecten die in de beoordeling worden betrokken, het gebruik van karakterisatiefactoren, het sommeren van effecten van verschillende stoffen tot één gezamenlijke score, de onafhankelijkheid van plaats en tijd, de beoordeling van afzonderlijke emissiepulsen in plaats van continue fluxen, en het gebruik van een functionele eenheid als basis voor de beoordeling en het relatieve karakter van de beoordeling. Alhoewel LCA en HERA elk hun eigen modelstructuur hebben, zijn de meeste verschillen niet fundamenteel. De functionele eenheid vormt daarop echter een uitzondering. Dit blijkt cruciaal te zijn: de functionele eenheid maakt dat bij LCA de emissies van processen niet in hun volle omvang worden beoordeeld, maar uitsluitend met betrekking tot hun aandeel in de levenscyclus van een bepaalde hoeveelheid van een bepaalde 'functionele eenheid' product of dienst. Voor wat betreft de risico-analyse staat juist een beoordeling van processen in hun volle omvang centraal: alleen daarmee kunnen de veranderingen in milieuconcentraties in een bepaald gebied worden berekend, hetgeen nodig is voor toetsing aan een norm.

Niveau 3 is het toepassingsniveau, dat direct is verbonden met doelen en modelresultaten. Het centrale doel van LCA is het geven van een kwantitatieve beoordeling van de risico's die worden veroorzaakt door de emissie naar het milieu van

een bepaalde stof of stofgroep, in het kader van productbeoordeling of als basis voor de keuze van het minst milieubelastende productalternatief. Het toepassingsgebied van HERA is anders: HERA wordt meestal toegepast om de toxische risico's in een bepaalde regio onder controle te houden door toetsing van concentraties van verontreinigingen aan de geldende normen. LCA en HERA zijn hier dus complementair.

Ondanks de verschillen wordt bepleit LCA en HERA onder te brengen in een gemeenschappelijk computermiddel dat beide typen uitkomsten kan genereren. Een dergelijk model zou een optimale harmonisatie van LCA en HERA garanderen, met name voor wat betreft de gemeenschappelijke onderlinge modelstructuren en -parameters. Bovendien zou hiermee een breed instrument worden geschapen waarmee bedrijven hun milieuprestaties op diverse gebieden kunnen toetsen, als basis voor weloverwogen keuzes op het gebied van hun milieubeleid.

Hoofdstuk 4: metalen in multimediamodellen

Hoofdstuk 4 is gewijd aan de inpassing van metalen in de multimediamodellering. Oorspronkelijk zijn de multimediamodellen ontwikkeld ten behoeve van de modellering van het gedrag van organische stoffen. Voor metalen kunnen deze modellen niet zonder meer worden toegepast, omdat een aantal modelvergelijkingen niet van toepassing zijn op metalen en omdat sommige stoffeigenschappen die door de gebruiker van het model moeten worden ingevoerd voor metalen niet gedefinieerd zijn. Hiervoor zijn echter oplossingen bedacht waardoor bepaalde vergelijkingen omzeild kunnen worden en waarbij sommige parameters een kunstmatige waarde krijgen toegekend. Met behulp van deze oplossingen zijn binnen de LCA in het verleden ook voor metalen karakterisatiefactoren ontwikkeld. In de praktijk bleken deze karakterisatiefactoren ordes van grootte hoger uit te pakken dan de karakterisatiefactoren voor vrijwel alle organische stoffen, met name ten gevolge van het feit dat metalen niet afbreekbaar zijn. Hierdoor werden er grote vraagtekens gezet bij de betrouwbaarheid van deze factoren. In dit hoofdstuk wordt de hypothese gelanceerd dat de bestaande karakterisatiefactoren voor metalen inderdaad te hoog zijn, en wel vanwege het feit dat een aantal voor metalen belangrijke processen, die mogelijk een sleutelrol spelen, niet in de multimediamodellen voorkomen of tekortkomingen vertonen op het gebied van processen die juist voor metalen belangrijk zijn. Het gaat daarbij met name om speciatie en sedimentatie in het mariene milieu. De term speciatie heeft betrekking op het feit dat metalen in een waterig milieu in verschillende chemische vormen kunnen voorkomen, en dat die vormen met elkaar in een dynamisch evenwicht verkeren. Wanneer metalen in een bepaalde vorm naar het milieu worden uitgestoten betekent dit dus nog niet dat ze in die vorm zullen blijven bestaan. Dit is belangrijk in de context van de effectbeoordeling, omdat niet alle vormen biologisch beschikbaar (en dus schadelijk). In dit model is aangenomen dat voor metalen die in anorganische vorm worden geëmitteerd, alleen de fractie die in vrije ionvorm in het milieu verschijnt biologisch beschikbaar is. Alleen voor metallisch

kwik en methylkwik is een uitzondering gemaakt. Dit zijn beide zeer schadelijke vormen van kwik, de eerste met name in gasvorm en de tweede als een stof die regelmatig in het milieu ontstaat als omzettingsproduct van anorganische vormen van kwik.

Per metaal dient te worden ingevoerd welke fractie binnen het mariene milieu in deze vorm aanwezig is. Voor kwik is een geheel aparte benadering ontworpen, omdat niet alleen de vrije ionvorm, maar ook de organische en de metallische vorm van dit metaal zeer schadelijk zijn voor de gezondheid van zowel mensen als ecosystemen. Naast de speciatie is ook de sedimentatie aan een nadere analyse onderworpen. Voor een aantal bekende metalen is de berekening van de sedimentatiesnelheid in de bovenlaag van de oceanen vervangen door gemeten waarden in een vroege versie van het GLOBOX-model. Alhoewel deze waarden soms sterk afwijken van de gemodelleerde waarden is de belangrijkste toevoeging waarschijnlijk de modellering van twee lagen in de oceaan: een menglaag, die als deel van het milieusysteem wordt beschouwd, en een diepere laag, die verondersteld wordt geen deel uit te maken van het te beoordelen milieusysteem. Met deze diepere laag is een sink gecreëerd die de gemodelleerde verblijftijd van metalen in het milieusysteem sterk bekort. Door de ingevoerde verbeteringen is de kloof tussen de karakterisatiefactoren voor organische stoffen enerzijds en metalen anderzijds verdwenen, en kunnen de toxische effecten van metalen binnen de LCA op een meer geloofwaardige manier worden beoordeeld.

Hoofdstuk 5: Het GLOBOX model voor fate, blootstelling en beoordeling van toxische effecten

Hoofdstuk 5 vormt de kern van dit proefschrift. In dit hoofdstuk wordt het model GLOBOX besproken. GLOBOX is een model voor het berekenen van ruimtelijk gedifferentieerde LCA karakterisatiefactoren voor toxiciteit. GLOBOX onderscheidt zich van andere modellen op dit vlak door het feit dat het model sterk ruimtelijk gedifferentieerd is, doordat het een wereldwijde dekking heeft en doordat met dit model de bijdragen van een product aan actuele effecten of risico's beoordeeld kunnen worden, naast de gebruikelijk potentiële effecten. Het model als geheel bestaat uit drie submodellen of modules: een multimedia-*fate* module, een module voor menselijke blootstelling en een effectmodule. De multimedia-*fate* module en de module voor menselijke blootstelling zijn gebaseerd op het EUSES-model (versie 2.0), dat ontwikkeld is voor de risicobeoordeling van emissies van organische stoffen naar het Europese milieu. De aanpassingen aan de multimedia-module en de module voor menselijke blootstelling van EUSES 2.0 betreffen met name de reikwijdte en de ruimtelijke differentiatie. Omdat de productlevenscyclus zich willekeurig over de wereld kan uitstrekken heeft het GLOBOX-model een wereldwijde dekking. Het model is ruimtelijk gedifferentieerd op het niveau van landen/territoria en zeeën/oceanen. Voor dit niveau van ruimtelijke differentiatie is om twee redenen gekozen: ten eerste omdat de milieu- en blootstellingsparameters waarop het model is gebaseerd sterk locatie-afhankelijk zijn, en ten tweede omdat processen in de levenscyclus het gemakkelijkst per land geloka-

liseerd kunnen worden. Er worden 289 regio's onderscheiden: 239 landen/territoria en 50 zeeën/oceanen. Iedere regio is onderverdeeld in een aantal milieucompartimenten, waaronder lucht, rivieren, zoet- en zoutwatermeren, grondwater en een aantal bodem- en sedimentcompartimenten voor de landen en territoria en lucht, zeewater en zeesediment voor de zeeën en oceanen. Behalve transport tussen lucht-, water- en bodemcompartimenten vindt er ook transport plaats tussen gelijksoortige compartimenten van verschillende regio's, met name ten gevolge van de wind en van rivier- en zeestromingen. Ook is er transport tussen rivieren en zoetwatermeren, en van rivieren naar de zeeën en oceanen. De hydrologische cyclus – een bestaande, wereldwijde waterbalans – is ten behoeve van het GLOBOX-model regionaal gedifferentieerd, en is in het model geïntegreerd. Daarbij zijn ook de stromingen tussen de verschillende zeeën en oceanen in ogenschouw genomen. Behalve op het gebied van de parameters die aan waterstromingen zijn gerelateerd is de multimediamodule ruimtelijk gedifferentieerd op het gebied van geografische parameters (bijvoorbeeld het relatieve oppervlak van zoet- en zoutwatermeren, diverse bodemtypen en landijs per regio), geofysische parameters (bijvoorbeeld de gemiddelde diepte van meren), klimatologische parameters (bijvoorbeeld omgevingstemperatuur, windsnelheid, regenval en vorstperioden) en 'intermedia transfer' parameters (voor gebiedsafhankelijk multimedia-transport).

Veel parameters zijn verzameld uit de literatuur of berekend aan de hand van literatuurgegevens. Waar parameters voor bepaalde gebieden ontbraken zijn deze geschat uit equivalente parameters voor andere gebieden. De parameters die betrekking hebben op de hydrologische cyclus zijn zodanig aangepast dat een gesloten waterkringloop ontstond die zo goed mogelijk in overeenstemming is met de gegevens van de hydrologische cyclus als geheel. Aan de oorspronkelijke EUSES-multimediatransportmodule zijn diverse parameters en vergelijkingen toegevoegd, met name om naast organische stoffen ook metalen in de berekeningen te kunnen betrekken, om een onderscheid tussen zoet- en zoutwatermeren en rivieren te kunnen maken, alsmede om rekening te kunnen houden met tijdelijke of permanente bevrozing van bodem-, grond- en oppervlaktewater in koude gebieden.

Ook de module voor menselijke blootstelling is ruimtelijk gedifferentieerd. Voor ieder land of territorium is een schatting gemaakt van het voedselconsumptiepatroon en van de herkomst en de kwaliteit van het drinkwater. Tevens zijn het gemiddelde lichaamsgewicht en het aandeel kinderen in de populatie geschat en in de analyse betrokken. In de effectmodule zijn de gevoeligheidsfactor en de drempelfactor in de vergelijkingen geïntroduceerd.

Alle ruimtelijk gedifferentieerde parameters zijn verzameld in een tweetal spreadsheets. Deel 1 van GLOBACK 2.0 bevat alle multimedia- en blootstellingsparameters, behalve de lucht- en waterstromingen tussen de verschillende regio's,

die in deel 2 van deze parameterset worden weergegeven. De modelberekeningen van de multimediamodule resulteren uiteindelijk in een stelsel van circa 3000 vergelijkingen met evenzoveel onbekenden, die het wereldwijde multimedia-transport en de afbraak in elk van de 3000 compartimenten vertegenwoordigen. Deze vergelijkingen worden in het GLOBOX-model simultaan opgelost door middel van matrixinversie. De uitkomsten bestaan uit de over tijd en ruimte geïntegreerde concentraties in elk van de compartimenten ten gevolge van een standaardhoeveelheid van een stof die in één van de 3000 compartimenten is geloosd.

Voor het berekenen van karakterisatiefactoren voor ecotoxiciteit worden de geïntegreerde concentraties, die berekend zijn met de multimediamodule, vermenigvuldigd met de bijbehorende effectfactoren, die de output vormen van de effectmodule. Daarmee ontstaan per compartiment twee karakterisatiefactoren: één volgens het algemene preventieprincipe en één volgens het risicominimalisatieprincipe. De effectfactoren die betrekking hebben op het algemene-preventieprincipe bestaan uitsluitend uit een toxiciteitsmaat (bijvoorbeeld de EC_{50}) en zullen in het algemeen locatie-onafhankelijk zijn. Voor het verkrijgen van de effectfactoren volgens het risicominimalisatieprincipe wordt deze zelfde toxiciteitsmaat vermenigvuldigd met twee extra factoren: de gevoeligheidsfactor en de drempelfactor.

Voor de berekening van karakterisatiefactoren voor humane toxiciteit ligt het iets ingewikkelder: daarvoor moet de geïntegreerde concentratie ook nog worden vermenigvuldigd met een innamefactor, die per compartiment de relatie aangeeft tussen enerzijds de concentratie binnen dat compartiment en anderzijds de inname van de mens vanuit dat compartiment via voedsel, lucht of drinkwater.

Bij het uitvoeren van een LCA-productstudie wordt iedere emissie vermenigvuldigd met de bijbehorende karakterisatiefactoren. Daarbij ontstaan per effectcategorie voor elke emissie 3000 deeleffectscores per effectcategorie: één voor ieder compartiment. Deze deeleffectscores kunnen vervolgens voor alle stoffen samen per effectcategorie worden opgeteld tot één (totaal)effectscore, die de bijdrage van de levenscyclus aan betreffende type toxiciteit op wereldschaal vertegenwoordigt. Alhoewel het aantal karakterisatiefactoren ten gevolge van de ruimtelijke differentiatie dus sterk toeneemt, blijft het aantal effectscores uiteindelijk gelijk. De gebruiker van het GLOBOX-model behoeft voor iedere stof en voor iedere regio alleen maar de omvang van de emissies naar de diverse compartimenten op te geven, plus een beperkt aantal stoffeigenschappen, om voor iedere toxiciteit-gerelateerde effectcategorie tot een ruimtelijk gedifferentieerde beoordeling van de betreffende toxische effecten op wereldschaal te komen.

Ruimtelijk gedifferentieerd karakterisatiefactoren blijken een grote mate van variatie tussen landen te vertonen, met name voor emissies naar binnenlandse wateren en bodemcompartimenten. De geografische positie, de verdeling van

meren en rivieren en variaties in omgevingstemperatuur en regenval zijn parameters die bepalend blijken te zijn voor een aantal verschillende karakterisatiefactoren. Daarnaast spelen bevolkingsdichtheid en voedselinname een cruciale rol in de variatie van karakterisatiefactoren voor humane toxiciteit. De landen die opmerkelijke afwijkingen vertonen van de gemiddelde waarden van de karakterisatiefactoren vertegenwoordigen tezamen een belangrijk deel van het wereldwijde BNP. Geconcludeerd wordt dat ruimtelijke differentiatie tussen landen een belangrijke stap voorwaarts betekent bij de verbetering van de toxiciteit-gerelateerde LCA.

Hoofdstuk 6: LCA-normalisatie

Hoofdstuk 6 beschrijft de laatste, facultatieve stap binnen de LCA-effectbeoordeling: de normalisatie. Door normalisatie krijgen de effectscores betekenis, omdat ze daarmee van abstracte getallen veranderen in relatieve bijdragen aan de verschillende typen effecten in hun totaliteit. In de normalisatie wordt iedere effectscore gedeeld door de effectscore van het economisch systeem als geheel in een bepaald referentiegebied en een bepaald jaar. Dit kan op verschillende schalen gebeuren, op wereldschaal of bijvoorbeeld op de schaal van een bepaald continent of een bepaald land. Omdat de levenscyclus van een product meestal een vrij grote geografische reikwijdte heeft is het verstandig de schaal niet al te klein te kiezen. In principe ligt een normalisatie op wereldschaal het meest voor de hand, maar wanneer de effectscores in het kader van bepaalde beleidsdoelen moeten worden geëvolueerd wordt vaak gekozen voor een schaal die overeenkomt met die van het geformuleerde beleid. In dit document is gekozen voor het uitwerken van de emissies op wereldschaal en op de schaal van de Europese Unie in 2006, uitgebreid met de landen Zwitserland, Noorwegen en IJsland – de ‘EU25+3’. Als referentiejaar is het jaar 2000 gekozen.

Deze normalisatiestudie onderscheidt zich van eerdere normalisatiestudies doordat niet de emissies die *plaatsvonden* in het referentiejaar, maar de emissies die ten gevolge van de economische activiteiten in dat jaar zijn *veroorzaakt*, als uitgangspunt dienen. Dit betekent dat in deze benadering rekening wordt gehouden met de vertraging tussen productie en emissie, bijvoorbeeld in het geval van CFK's in koelkasten. Daarmee is de benadering in de normalisatie gelijk getrokken aan de benadering zoals die in het algemeen in LCA productstudies wordt toegepast, hetgeen van een echte referentie mag worden verwacht.

In tegenstelling tot de voorgaande hoofdstukken heeft hoofdstuk 6 niet alleen betrekking op de beoordeling van toxische effecten, maar op het gehele spectrum van effectcategorieën. De belangrijkste doelstelling van deze normalisatiestudie was het verzamelen van alle milieu-ingrepen – dat wil zeggen: de emissiegegevens van alle stoffen die door de mens in het milieu worden gebracht, de gegevens van de belangrijkste grondstofwinningen en de gegevens met betrekking tot landgebruik – zowel op wereldschaal als op de schaal van de EU25+3. Wanneer de

emissie- of onttrekkingsgegevens voor een belangrijke stof niet op het juiste niveau bekend waren is gebruik gemaakt van extrapolatie- en interpolatiemethoden. In totaal konden gegevens worden verzameld over 860 typen milieu-ingrepen (d.w.z. typen emissies, onttrekkingen en landgebruik tezamen). Slechts 48 typen ingrepen bleken gezamenlijk verantwoordelijk te zijn voor 75 procent van alle effectscores voor de vijftien beschouwde effectcategorieën. Alle niet-toxiciteitsgebonden, emissiegerelateerde effecten bleken volledig te worden gedomineerd door de bulkemissies van slechts tien stoffen of stofgroepen: emissies van koolstofdioxide, methaan, zwaveldioxide, stikstofoxiden, ammoniak, fijn stof, vluchtige organische koolwaterstoffen exclusief methaan (NMVOC's) en (H)CFK's naar lucht en emissies van stikstof- en fosforverbindingen naar zoet water. Voor wat betreft de toxische stoffen was de beschikbaarheid van emissiegegevens zeer beperkt. De onzekerheid van de uitkomsten was daardoor voor de toxiciteitgerelateerde effectcategorieën erg groot. Een betere registratie van toxische emissies lijkt dus van groot belang, in de eerste plaats vanwege het onder controle houden van de milieueffecten van de betreffende stoffen, maar ook voor LCA.

Alhoewel dit document met name is bedoeld als referentiekader voor de effectbeoordeling in LCA kan het tegelijk ook zelf als een LCA-studie worden beschouwd: een analyse waarmee de milieueffecten van het economisch systeem als geheel worden geïdentificeerd. Als zodanig benadrukt deze studie dat het bestrijden van een beperkt aantal bulkemissies een belangrijke stap voorwaarts zou vormen voor het Europese en mondiale milieubeleid.

Conclusies

Alhoewel LCA en HERA complementaire instrumenten zijn kan de nauwkeurigheid van LCA sterk worden vergroot door het implementeren van een aantal elementen uit de humane risico-analyse en de milieu-risico-analyse: regionale differentiatie en daaraan gekoppeld een onderscheid tussen boven- en onderdrempeleffecten. Omdat de productlevenscyclus zich willekeurig over de wereld uitstrekt is daarvoor een wereldwijd model nodig. Het GLOBOX-model voldoet aan deze voorwaarden. Bovendien voorziet het model in een grote parameterset, GLOBACK, die in de vorm van een losse module ook als basis voor andere modellen gebruikt kan worden. Deze parameterset is reeds uitgebreid met een verzameling parameters voor deelgebieden binnen de Verenigde Staten en Canada. Om de effectbeoordeling te volmaken is daarnaast een normalisatiemodel toegevoegd. Hiermee is het gegevensbestand van mondiale milieu- en blootstellingsparameters uitgebreid met een set mondiale emissie- en onttrekkingsgegevens. Met het GLOBOX-model kunnen specifieke karakterisatiefactoren voor toxische effecten worden berekend voor ieder land of territorium en iedere zee of oceaan op de wereld. Emissies die bijdragen aan actuele effecten of risico's zijn daarbij expliciet herkenbaar, als onderdeel van de voor LCA gebruikelijke potentiële effecten. Het model kan hiermee bijdragen aan de wereldwijde bruikbaarheid van

LCA en aan het terugdringen van de verontreiniging van het milieu, te beginnen bij de emissies met de hoogste risico's.