



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Life Cycle Assessment (LCA) You'll only see it when you understand it

Guinee, J.B.

Citation

Guinee, J. B. (2023). *Life Cycle Assessment (LCA): You'll only see it when you understand it*. Leiden.
Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3643758>

Version: Publisher's Version

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3643758>

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

Prof. dr. ir. Jeroen B. Guinée

Life Cycle Assessment (LCA):
‘You’ll only see it when you understand it’



**Universiteit
Leiden**

Bij ons leer je de wereld kennen

Life Cycle Assessment (LCA):
‘You’ll only see it when you understand it’

Inaugural lecture by

Prof. dr. ir. Jeroen B. Guinée

On the acceptance of his position of professor of

Life Cycle Assessment

at the Universiteit Leiden

on Friday November 3, 2023



Universiteit
Leiden

*Mevrouw de rector magnificus, mijnheer de decaan, zeer
gewaardeerde toehoorders,*

Introduction

In my childhood, my sister, two brothers and I went on an annual vacation to the Swiss Alps with our parents. In those days it was very common for the children to be sent out shopping. So too during the vacations. As the oldest, I was sent out to get milk and bread at the so-called 'Molkerei'. Getting milk at a 'Molkerei' was something special. The milk was fresh from the cow because those cows were behind the store in the stables and pastures. But what was also special was the packaging. We got milk in a little bucket. You had to clean that bucket yourself, you went to the store with it and there it was filled with the desired amount of milk. A truly circular system 'avant la lettre'. This system worked because it was small-scale, at village level, and people probably had more time, or took more time. At the same time, Switzerland was home to the famous retail giant, 'Migros'. Migros actively pursued environmental objectives despite being a sizable supermarket chain with a wide customer base. The bucket approach was no longer viable at this scale. Migros shifted to selling fresh milk in a plastic bag, meant to be placed in a reusable jug that could be purchased separately. It was an environmentally strong concept, particularly if we managed plastic waste effectively. Meanwhile, in the Netherlands during that period, we had the returnable glass bottle, the disposable cardboard packaging, and later, both single-use polyethylene and multi-use polycarbonate plastic bottles¹.

I first came to Leiden University in 1986. I was studying environmental sciences in Wageningen and was in the final phase of my studies. I found my studies in Wageningen very interesting but I still missed something. They offered that in Leiden. Helias Udo de Haes and Gjalt Huppes advertised in the Wageningen university journal for a study group on a Substance Deposit System at the Institute of Environmental

Sciences Leiden (CML). From the work of this study group came, among other things, the first substance flow diagram². My interest in Environmental Science was piqued. In 1987, I joined CML as a researcher with Gjalt and Helias as my tutors. From then on I have been working on the subject of my chair: environmental life cycle assessment of products (LCA). At that time it was not yet called LCA and there was actually no complete method. There was a beginning of a method and product policy was emerging³. In 1990 CML was assigned a project to elaborate a method in a Guide and in 2002 we released an update of that: the Handbook on LCA. We became and remained famous for that. Thirty years later, LCA is a widely accepted method, used worldwide in product and related policies, and mandatory in many EU "calls for proposals."

To explain what LCA is, I will go back to my example of milk packaging, which I also used in my very first LCA article from 1993⁴. Which is better for the environment: the jug with plastic bag, the glass return bottle, the single-use carton pack, or the single-use or multi-use plastic bottle. To understand this, we need to look at the environmental impacts of all processes necessary for fulfilling the function of the product throughout its entire lifecycle. Milk must be brought from the store to the consumer in some way, and we need packaging to do that. Behind that packaging is a life cycle of processes, from the extraction of the raw materials needed to produce the packaging, to the processing, recycling or reuse of the discarded packaging. For each process in that life cycle, we quantify the environmental impact. This starts by quantifying raw materials and energy consumption and all kinds of emissions such as CO₂ and nitrogen emissions, for example, terms we are all familiar with today. Then we link those emissions to models and so-called characterization factors that translate emissions into impacts on climate change, eutrophication, acidification, resource use and all kinds of other environmental problems. This approach allows us to generate results for each packaging alternative, enabling

meaningful comparisons. In a nutshell, LCA is a method to map the environmental impact of product systems over the entire life cycle and on all relevant environmental themes, and not just a 'carbon footprint'⁵. We can apply the method not only to packaging but in principle to any conceivable product or service, and also to complex technological symbiosis systems such as polyols produced from carbon from gases released during steel production⁶.

4 A 1984 Swiss LCA study⁷, which compared several of the previously mentioned milk packages with an LCA approach, found that the single-use cardboard pack scored relatively worst, and the bottle and plastic bag-can combination best. The cardboard pack weighed about 25 grams but consisted, and still consists, not only of cardboard, but also of a plastic closure. In addition, it has a thin plastic layer (laminate) on the inside to keep the cardboard from getting damp. The latter makes recycling virtually impossible. According to the same study, the glass bottle weighed 400 grams. Depending on how often we reuse the bottle, (say 20 or 40 times) the material weight per use is lower ($400/20=20$ grams) or much lower ($400/40=10$ grams) than the material weight of the cardboard pack. If we compare that with the weight assumed in the study for the plastic bag, only 7 grams, we can already see that the bag has a big advantage here and that the glass bottle must be reused many times before it can compete with that. Now if LCA was only about material weights, it would be a simple exercise, but also an incomplete one. In fact, the life cycles behind these packaging are much more complicated. For example, before reuse, the glass bottle must be taken back to the store by the consumer, who may stroll or use a bicycle or car to do so. Then the empty bottles are transported by trucks from the store to the factory to be thoroughly rinsed and then refilled. These processes should all be included in an LCA as well because they all have environmental impacts, but unfortunately that was not always done. LCA studies also tend to differ quite a bit in their assumptions about bottle weight, return rates, data sources used, and basis of comparison used.

We call that basis of comparison the "Functional Unit" (FU) in LCA. This is not about the product (or as in this case, the packaging) but about the function the product performs (protecting a product and/or facilitating transport). So we are not comparing 1 milk carton with 1 milk bottle, but we are comparing, for example, the packaging of 1000 liters of milk for transport from manufacturer and store to consumer; we need 1000 cartons for that, but at a reuse of 20 times not 1000, only 50 glass bottles.

I hope that with this introduction you all roughly understand what LCA actually is and what it is about. In the remainder of my lecture, I will first elaborate on the relationships between consumption, products, environmental problems and LCA, and then focus on 3 main lines of LCA-related research. The first line is that of LCA as a scientific method, how we have contributed to it and what challenges remain. The second line is about what I'll just call LCA-based future explorations. LCA is increasingly being used to assess future product systems which is sometimes referred to as ex-ante, prospective or explorative LCA. The third line is that of life cycles. The life cycle of a product is somewhat different from the life cycle of a chemical or a material. This may seem like a detail but is becoming increasingly important when we combine LCA, risk analysis (RA) and also Material Flow Analysis (MFA) in, for example, the so-called Safe and Sustainable by Design (SSbD) approach. But I start with relationships between consumption, products, environmental impact and LCA.

The relationships between consumption, products, environmental impacts and LCA

In 1987 my father gave me a copy of the book 'Zorgen voor Morgen' ('Concern for Tomorrow')⁸. It was one of the first publications in the world in which the state of all environmental problems known at the time were systematically listed for the Netherlands. By far the majority of these problems were not limited to the Netherlands, but had an

international character. The environmental problems that this book already addressed in 1987 have now become 'Concern for Today', with, for example, the consequences of extreme weather being in the news daily this past summer.

Today, the major environmental challenges are also referred to as the "Triple planetary crisis"⁹. This term refers to three, partly related, crises: climate change, pollution, and the loss of biodiversity. Our economy runs on consumption. Consumption of goods, products and services largely determine how well the economy is doing. As I have just shown, behind every product we consume is a whole system of processes. Each of those processes has an environmental backlash and thus contributes to the aforementioned "Triple planetary crisis. So the key to addressing this crisis is primarily in our consumption and the system of processes behind it. It is therefore crucial to improve those processes and change our consumption behavior by consuming less ('consuminderen' in Dutch), consuming more environmentally friendly, and where possible replacing 'consumption' with 'use', 'lease' and circular systems. Current environmental policy therefore focuses on the transition to more sustainable, circular patterns of production and consumption.

Generally we have a choice between several alternatives for a product, and the cost-quality ratio is the main driver of our final choice. Ideally, we should include sustainability in that. But how do you do that?

Well, you can of course simply claim it ... This happens on a large scale: products are marketed as being bio, organic, eco, ecological, green, recyclable, reusable, CO₂ neutral, etc. Even before a product or technology is on the market, it receives one or more of these labels, usually without a single, underlying piece of evidence. But of course, such claims must be substantiated, otherwise the chances of "greenwashing" are too high and that does not help us at all. The EU has recently responded to this with a new regulation¹⁰. The goals of the

new EU regulation are to make green claims more reliable, to help consumers make environmentally friendly choices, and to ensure an *equal methodological basis for comparing products on environmental aspects*. The latter is achieved through so-called 'product environmental footprint (PEF) methods', which are LCA-based methods.

We have now positioned LCA in relation to the environmental crisis we hear about almost daily on the news. While LCA is not the solution to that environmental crisis, it is a valuable method for quantitatively mapping the integral¹¹ environmental impacts of products and services to support a transition to *truly* more sustainable¹² production and consumption patterns¹³. However, the method can still be improved, developed and applied along several lines. Here, as indicated earlier, I distinguish three main lines: 1) LCA as a scientific method; 2) LCA to support future explorations; 3) LCA as part of broader approaches such as 'Safe and Sustainable by Design' (SSbD).

LCA as a scientific method

As CML, we have made important contributions to the development of LCA as a scientific method. I mention here the very well-known LCA framework from the International Organization for Standardization (ISO) standards; the introduction of multimedia models for the assessment of potentially toxic substances in LCA; the resource use assessment method; and the structuring and standardization of the multifunctionality approach. I briefly address each of these topics below.

The LCA framework included in ISO standards since 1996 consists of 4 phases: Goal and scope definition; Inventory analysis; Life cycle impact assessment; Interpretation^{14,15}. We published the basis of this framework in our very first LCA article on LCA in 1993^{4,16}. Also the term 'functional unit'¹⁷, which is very well known in the LCA world, and the name of

the widely used software SimaPro¹⁸ originate from Leiden. In addition, our LCA-Guide from 1992 and the LCA-Handbook from 2002 are true LCA classics. Still, this work is not finished with that, because various sectors are asking for further, customized guidelines. We are currently developing such guidelines for the mobility sector in the EU TranSensus LCA project with Hazem Elthohamy as PhD student.

CML became particularly famous in the 1990s with pioneering work on Life Cycle Impact Assessment (LCIA), based on the themes from ‘Zorgen voor Morgen’¹⁹. Together with my colleague Reinout Heijungs, we introduced several theoretically innovative concepts, including the ‘Toxicity Potentials’ (TPs) in 1993²⁰. Just as the IPCC published so-called Global Warming Potentials (GWPs) with which different emissions of greenhouse gases can be aggregated, we wanted to develop ‘Toxicity Potentials’ to be able to add up different emissions of potentially toxic substances in LCA. A ready-made method for this was lacking at that time, and so we had to develop our own proposal. The basis of our theoretical proposal was the risk quotient and multimedia models from risk assessment (RA)²¹. The problem to be solved was that risk assessment calculates concentrations based on emission fluxes (kg/t) and compares them with threshold values for those concentrations, whereas in LCA we only have emission data in mass units with no real time dimension. We introduced the reference substance as a solution, as used in global warming potentials. Our proposal was then further elaborated upon at the start of this century by Mark Huijbregts and colleagues²². Today, however, these characterization factors are expressed in ‘Comparative Toxic Units’ where unfortunately it is unclear how the flux-pulse problem is now solved. LCA and RA are fundamentally different methods, with different goals and applications²³, but with the reference substance concept we showed that one can apply knowledge and models from RA in adapted form, also in LCA. In this exchange of knowledge and models, however, the theoretical foundations of the LCA method must continue to be respected. We have demonstrated

the precise implications of this in our publications on ‘integration or combination of LCA and RA’²⁴, on ‘absolute LCA’²⁵, and hope to do so for ‘dynamic LCA’²⁶ in Amelie Müller’s PhD project.

For assessing resource use, we similarly designed a method in 1995 known as the ‘Abiotic Depletion Potential’ or the ‘ADP’²⁷. The method generated much debate, but despite this, the ADP is still part of the ‘Product Environmental Footprint’ (PEF)²⁸ and the ‘Environmental Product Declaration’²⁹ to this day. Over the years, my colleague Laurant van Oers has become the expert in this field and together we have recently developed an alternative to this ADP: the (long-term) ‘environmental dissipation potential’, the EDP³⁰. We have moved from the concept of ‘depletion’ to the more relevant concept of ‘dissipation’. Elementary raw materials do not disappear and are therefore not depleted in that sense, but through emissions we dissipate them throughout the environment in small quantities, making them increasingly difficult to recover³¹. We have recently also elaborated the EDP for a shorter time horizon³². The main challenge remaining now is to obtain the necessary data for both EDP-versions.

Through targeted expansion of the research staff at CML and collaboration between our departments of Industrial Ecology (IE) and Environmental Biology (EB), we have now actively resumed impact assessment work. Biodiversity and ecosystem services in particular are focal points here. A key challenge is to ensure that the sophisticated LCIA methods developed for this purpose are consistent with information available at the LCI level, as Elizabeth Migoni Alejandre has done in her thesis on modeling ecosystem services in LCIA³³. Furthermore, it makes sense to apply the knowledge gained in EB regarding the impact assessment of nanomaterials and microplastics in LCIA methods. Indeed, the fact that LCAs on nanomaterials, for example, still contain little or no impact assessment of emissions from those same nanomaterials, is a hard sell. Microplastics is another environmental problem

where focused collaboration between the two departments of our institute could also add value. I just mentioned in my introduction some examples of LCAs of plastic packaging. Unfortunately, these LCAs do not yet properly include the problem of litter leading to the “plastic soup” and microplastics that we find even on our sandy beaches³⁴. Global efforts are being made to improve that situation³⁵ and I expect that a collaboration of the two CML departments of Environmental Biology and Industrial Ecology can make a useful contribution also here.

Lastly, a significant portion of my previous work has been centered around the often overlooked yet critically important methodological subject of ‘Multifunctionality’. Many processes produce not one, but several economically valuable products or functions. In cogeneration, for example, heat is produced as a valuable product alongside electricity. Similarly, a recycling process is managing waste for one while producing a secondary valuable material for another. The question in LCA is then how to allocate the emissions from that process among those products; in other words, who gets the credits? This can be done in many ways, and “allocation” is one of them. The way you do that can have major implications for the outcome of an LCA study. It can even lead to negative environmental scores, giving the impression that more consumption of the product in question would lead to a better environment, when in fact that is incorrect³⁶. To bring some order to this chaos, we have published a 4-step method³⁷, which is also very important for the increasing number of LCAs on Circular Economy systems. But what we actually realize much less is that when we use an LCA database, for example ecoinvent, choices have already been made about how to solve multifunctionality in that database. In fact, such a database should not contain methodological choices that a user can no longer change. For quite some time, we have therefore set ourselves the goal of creating a multifunctional version of the ecoinvent database. We first took up this challenge in 2006³⁸. Recently, we collaborated with ecoinvent to create a multifunctional

version of ecoinvent 3.9.1. What turns out: out of the more than 21,000 processes in ecoinvent 3.9.1, more than 3,800 (18%) stem from originally more than 1,550 multifunctional processes. The performer of an LCA using the ecoinvent 3.9.1 database thus accepts the choices ecoinvent makes for these 1550 multifunctional processes. We are not certain yet if we will succeed in our mission, but ultimately, we hope to shift the choice and the analysis of its sensitivity back to the LCA practitioner.

LCA-based future explorations

This brings me to my second main line: LCA to support future explorations. The EU “Green Deal”³⁹ aims to invest in research, innovation, science and technology as part of Europe’s new growth strategy. Most of all studies on new technologies and innovations launched by the EU⁴⁰ require an LCA of that technology as well. By requiring LCAs of emerging technology systems (including technologies, products and materials), sustainability is not assessed only after they have come to market (ex-post), but already at the earliest possible stage of development in advance (ex-ante, prospective or explorative⁴¹). In this way, LCA outcomes can help guide the development of new technology systems. In my lecture, I now focus further on ex-ante LCA, which is particularly aiming at new technology systems in early stages of development; they have a so-called low technology readiness level (TRL)⁴². Improvements at an early stage of development can be very important for the future environmental performance of a technology system. However, the environmental impacts of a technology cannot be accurately predicted before that technology is widely used. But changing an already established technology is in turn extremely difficult and expensive. This dilemma is known as the “Collingridge dilemma”⁴³.

This dilemma makes an ex-ante LCA study different from a ‘conventional’ LCA. In 2016, Marco Villares pioneered this area in his Master thesis project⁴⁴. Building on this, Coen van

der Giesen later listed the challenges of ex-ante LCA⁴⁵. He argued that the basic methods and framework of ex-ante and conventional LCA are exactly the same. But ex-ante LCA has specific challenges for completing some of the steps of the conventional LCA method. For example, obtaining LCA data, especially emission data, for new technology systems is a major challenge. Also, the system specifications of the innovation are often incomplete and it may even be difficult to determine to which existing system we can compare the innovation. Finally, of course, uncertainties⁴⁶ are inherently large and lab-scale data are far from representative of the eventual commercial scale of a system. Scenarios will need to be formulated representing some of the most likely scale-up options. We have made progress on several of these topics in the meantime, as evidenced by the scenario work of Natalya Tsoy⁴⁷, the work on uncertainties by Carlos Felipe Blanco⁴⁸ and on prospective LCI databases by Bernhard Steubing⁴⁹ building on the dissertation by Angelica Mendoza Beltran⁵⁰.

But that is not all. Apart from the fact that we will have to continue working on all these topics, we especially need to build up more experience in doing such LCA-based future explorations. Recent EU projects have shown that it is crucial and highly instructive for LCA specialists in ex-ante studies to work directly with technology experts, from both industry (Research & Development) and academia. Thus, case studies are needed with a focus on the development of new technology systems. I therefore invite fellow researchers, from both inside and outside the university, to collaborate on these innovations. Our Industrial Ecology master students are also very eager to collaborate on these kinds of projects, and perhaps in this way we can create an “ex-ante lab,” where experience with ex-ante LCAs can be gained and technological innovations can be guided with sound environmental analyses. Because only together can we take steps toward truly more sustainable technologies.

Safe and Sustainable by Design (SSbD) and life cycles

The third and final line of my story is about Safe and Sustainable by Design (SSbD), which stems from Safe or Safer by Design (SbD). SbD focuses on including safety aspects in the early stages of the design of new chemicals, materials, products and technologies⁵¹. Safety is primarily concerned with human and environmental health. SbD is a relatively new concept that emerged from green chemistry. It aims, among other things, to “design safer chemicals at all stages of the chemical life cycle [...], from the earliest stage of the production process”⁵². The EU ‘Chemicals Strategy for Sustainability’ (CSS)⁵³ recently introduced the SSbD approach. SSbD aims not only to ensure safety but also to minimize all environmental impacts of new chemicals from the beginning of a design process⁵⁴. This should prevent unintended problem shifting. The CSS announced a framework for SSbD. That framework⁵⁵ has been developed in the meantime and is now being tested in practical cases. Besides Risk Assessment (RA), several Industrial Ecology methods appear in this framework including LCA and Material Flow Analysis (MFA). ‘By-design’ is interpreted as molecular, process and/or product design.

The knowledge and experience of SSbD are in an even earlier stage than that of ex-ante LCA. However, it is obvious that ex-ante LCA combined with ex-ante Risk Assessment (RA) will play a significant role in SSbD. On behalf of the Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management (IenW), we conducted a literature review in 2020 focusing on ex-ante LCA and RA as part of an SbD or SSbD approach⁵⁶.

Last year during my sabbatical in Barcelona at the Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), I delved a little deeper into that same literature⁵⁷. Indeed, I had noticed during a quick screening of this literature that the term ‘life cycle’ was loosely combined with both ‘product’, ‘material’ and ‘chemical’ without further explanation. At the same time, we know from Industrial Ecology that the ‘life cycle of a product’

means something different from the ‘life cycle of a material’ or the ‘life cycle of a chemical’. For example, the life cycle of a product includes all materials and chemicals required for that product to function, while the life cycle of a chemical includes all products in which that chemical is applied. I then did a brief literature review that examined what the term ‘life cycle’ referred to in the reviewed studies and what exactly they meant by ‘chemical’, ‘material’, and ‘product’.

My findings were fairly shocking. The term ‘life cycle’ was not defined by most studies while it can have different meanings even within one discipline. Also, it was often not specified which ‘life cycle’ was being referred to precisely: that of a ‘chemical’, ‘material’, ‘product’ or a ‘chemical in a product’. Moreover, even basic terms such as ‘chemical’, ‘material’ and ‘product’ were found to have different meanings in different scientific disciplines, or very similar ones as evidenced by combinations such as ‘chemical products’ and ‘chemical materials’, which were used interchangeably in the literature mentioned.

The simple conclusion of this work is that researchers need to better define what they mean by all these terms and to which life cycle they refer. For example, by using consistent definitions of the terms “product,” “material,” and chemical,” we arrived at three types of life cycles that can be distinguished: (1) the life cycle of a product or material; (2) the life cycle of a chemical in a specific product system; and (3) the life cycle of a chemical in all of its product applications. Each of these three life-cycle approaches can identify different problem trade-offs. So, these are complementary approaches that should ideally all be standard practice in SSbD studies. However, this has hardly been done yet, if at all, and also requires substantially more work.

What also struck me about the above work was that the SbD and SSbD literature was mainly about ‘Sustainable’ and ‘Safe’, but hardly about the ‘D’ of Design. We are going to change

this with and under the leadership of Ruud Balkenende from TU Delft in a recently started NWA project. The project aims to develop, test and implement a method for designing safe and circular products, addressing all aspects represented by the SSbD acronym. Nina van Dulmen is the PhD candidate on this subject for CML. Through this project, our recent projects on SbD and SSbD, and through joint guidance of students, I have intensified my collaboration with the Industrial Design Engineering faculty at TU Delft in recent years. However, this collaboration dates back to 1990 when Conny Bakker and I, among others, contemplated how we could use LCA in ecodesign. However, in 1990 the LCA and the ecodesign methods were still in an early stage of development, and investments had to be made primarily in improving these methods. We have come a long way since then. So, you could say this circle is now complete. Personally, I find the use of LCA for design and improvement of products and technology systems to be the most attractive application of LCA because it encourages continuous sustainability instead of static⁵⁸. However, there are also some very significant challenges to doing SSbD studies, including what might be termed the ‘dual data challenge’: LCA data is scarce⁵⁹, and unfortunately the same applies to RA data. In SSbD, these methods converge, presenting a dual data challenge⁶⁰.

Teaching LCA

Education cannot be omitted from an inaugural lecture on LCA. Teaching LCA to master students is a pleasure to do. However, it does require a lot of preparation, dedication and time investment. In my opinion, you can only really understand LCA if you first learn the theory well, and then apply that theory in practice, in an LCA study. I have sometimes compared that learning process to climbing the Mont Ventoux on a racing bike. I’ve done that four times now with my good cycling friend Hil, so I know what I’m talking about. Climbing this mountain requires a lot of training, focus, and perseverance. Students who have taken my course

will understand what I am talking about. First, you learn the theory and complete a few exercises, then the digestion process starts, where you apply the knowledge in case studies, and then you begin to understand it better and better. That reminded me of a famous quote by the Netherlands' greatest footballer and 'philosopher of the people', Johan Cruyff: "You'll only see it when you understand it" (je gaat het pas zien als je het doorhebt).⁶¹ It also applies in a more general sense: you will truly grasp the potentials and limitations of LCA when you thoroughly understand the foundations of the method and have applied it yourself, and that just takes some time and experience⁶².

The broader perspective

LCA is a scientifically grounded assessment method, but it does require a lot of data, unfortunately often scarce. In addition to extensive data, the method also requires making various choices and assumptions, some of which I have mentioned. Due to these data, choices and assumptions, the general outcome of an LCA study is often referred to as 'it depends'. But – as my colleague René Kleijn always says – at least we then know what it depends on, which can be a very valuable result. However, 'it depends' is also often used as criticism of LCA. It is true that the outcomes of an LCA depend on the chosen data, assumptions made, and methodological choices, but such choices and assumptions are unavoidable and partly attributable to the pervasive variability that one aims to capture. Furthermore, we cannot directly measure the integral environmental impacts of technology systems. We can only map this out using assessment methods such as LCA. Making assumptions and choices is inherent to an assessment method. There is no better alternative, we extensively discussed this in the past⁴. LCA is the only available method to *quantitatively and systematically* map the integral environmental pressure of technology systems⁶³.

But LCA alone will not get us there: it is not 'the Holy Grail'. So let's put it in a broader perspective. A well-known equation in Industrial Ecology is the so-called IPAT equation from 1971⁶⁴: $I = P \times A \times T$. The equation describes how environmental pressure (I=Impact) is the product of three variables: population size (P=Population), prosperity (A=Affluence) and technology (T=Technology). Put in simpler terms, the T expresses the environmental pressure per unit of consumption, while the A indicates how many units we consume per person, and the P indicates how many people there are on this earth. Despite innovations - whether or not supported by LCAs - contributing to the improvement of the environmental performance of some individual products (the T), the environmental gains have often been offset by an increase in global prosperity (A) and/or population (P)⁶⁵. Hence, we not only need to reduce the environmental pressure per consumption unit but also the consumption itself (consume less), and stop the ongoing population growth⁶⁶. While this in itself is not an easy task, we must simultaneously strive for better wealth distribution and prevent rebounds from consuming less, as consuming less leads to savings that we will likely spend elsewhere, with all possible environmental consequences. It's evident that in manipulating all these IPAT buttons, we need visionaries, whom we will soon be able to elect. To turn the T-button, we, as consumers, primarily need reliable information. Positive developments are on the horizon in this regard, with the EU, among other efforts, working on providing us, as consumers, with necessary information through the 'PEF'²⁸, the 'Directive on Green Claims'¹⁰, and the 'Digital Product Passport'⁶⁷. In our search for LCA-based, more sustainable and more circular technology systems, we may still find inspiration in the example of the 'milk bucket and the Molkerei', which, in hindsight, may have been far ahead of its time. This also makes my lecture circular.

Acknowledgments

I am reaching the end of my lecture and would like to express a brief word of thanks. First of all, I would like to thank the rector and the board of Leiden University for establishing this chair, and the faculty board and everyone else who contributed to my appointment. Special thanks go to our former CML director, Arnold Tukker, for initiating, and to our current CML director, Martina Vijver, for leading and managing my appointment process.

I also want to thank my colleagues from the 'ouwe hap' for always having open doors for each other, listening ears, collaborating not for ourselves but with each other, and the satisfaction that it brings.

My longtime office mate, Arjan, and former office mate, Ranan, for the many valuable conversations about various topics.

Reinout, our years of collaboration have resulted in a wonderful collection of scientific articles that I am proud of.

Gjalt, you are the great inspirer and intellectual father of all our IE methods; this cannot be said enough.

Helias, thank you for your tireless efforts to convey our Leiden LCA thinking to the rest of the world.

I have been working at CML for 36 years, and people have occasionally asked me why I've always stayed there. Of course, this has to do with what I just thanked the 'ouwe hap' for. I sincerely hope we can preserve this culture, even in the larger institution we are now.

Thanks also to all my former and current PhD candidates and Industrial Ecology students for their trust in me. You have been of immeasurable value to me and to this inaugural

lecture.

Thanks also to all the supporting staff at CML: what would we be without you?

Finally, thanks to all family, friends and colleagues present here today: I greatly appreciate this. Dear Hetty, Sanne and Bart, thank you for your unconditional love and support.

Ik heb gezegd.

Notes

- 1 <https://historiemelkvervoer.nl/zuivelverhalen/de-polycarbonaat-melkfiles-1>
- 2 Udo de Haes, H.A., G. Huppes, J.B. Guinée (1988). Stoffbalansen en stroomschema's: de accumulatie van stoffen in economie en milieu. *Milieu* 3(2), 51-55.
- 3 In 1987, the Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment published the Indicative Multi-Year Environmental Management Program (IMP) 1987-1991. That was the first IMP to include a section (4.8, p.87) on "Products": https://repository.overheid.nl/frbr/sgd/19861987/0000111100/1/pdf/SGD_19861987_0005049.pdf
- 4 Guinée, J.B., H.A. Udo de Haes, G. Huppes (1993). Quantitative Life Cycle Assessment of Products: Goal definition and Inventory. *J. Clean. Prod.* 1(1), 3-13.
- 5 By focusing only on the effects of climate change, we can no longer identify trade-offs to other impact categories and we pass them on to future generations. That cannot be the intention of a sustainability analysis.
- 6 Tsoy, N., B.R.P. Steubing, J.B. Guinée (2023). Ex-ante Life Cycle Assessment of polyols using carbon captured from industrial process gas. *Green Chem.* 25, 5526-5538.
- 7 Anonymous (1984). Ökobilanzen von Packstoffen. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 24. Bundesamt für Umweltschutz. Bern.
- 8 Langeweg, F. (1988). Zorgen voor Morgen – Nationale Milieuverkenning 1985-2010. Samson H.D. Tjeenk Willink, Alphen aan den Rijn.
- 9 <https://unfccc.int/blog/what-is-the-triple-planetary-crisis>
- 10 European Commission (2023). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive). COM(2023) 166 final, Brussels.
- 11 In the remainder of this story, integral is used to mean 'all relevant environmental effects over the entire life cycle of the analyzed system.'
- 12 I deliberately use the term 'more sustainable' and not 'sustainable', because every human activity comes with an environmental footprint. Or as the English say: "there's no such thing as a free lunch".
- 13 The so-called 'Sustainable Development Goals' (SDGs) and in particular SDG 12, 'responsible consumption and production' are aimed at the introduction of more sustainable consumption patterns by the year 2030; see <https://sdgs.un.org/goals>. However, product-oriented environmental policy is much older, as indicated above, see also for example: Sala, S., Amadei, A. M., Beylot, A., & Ardenne, F. (2021). The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades. *Int J Life Cycle Assess* 26(12), 2295–2314.
- 14 ISO (2006). International Standard ISO 14040, Environmental Management - Life Cycle Assessment — Principles and framework. Genève, Switzerland.
- 15 Gabathuler, H. (2006). The CML Story How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA. *Int J Life Cycle Ass. (Special Issue to Helias A. Udo de Haes)* 2(1), 127–132.
- 16 It was actually already a Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) framework 'avant la lettre'.
- 17 Van den Berg, M.M.H.E., D. Schmidt, M. van Kotten-Hertogs, G. Huppes, W.T. de Groot (1986). Potenties van produktbeleid. CML-mededelingen nr. 26. Centrum voor Milieukunde, Leiden.
- 18 In 1990, together with Ruben Huele, Paul Mulder and Laurant van Oers, I developed the first version of the LCA software SimaPro on behalf of Pré Consultants Amersfoort. SimaPro is now a global brand, for which the honor goes entirely to Pré, but the brand name comes from Leiden. Since few know what this acronym means, I would like to explain it one more time: SimaPro stands for 'Systeem voor de Integrale Milieu-Analyse van PROducten'.
- 19 Guinée, J.B., R. Heijungs, H.A. Udo de Haes, G. Huppes, 1993. Quantitative Life Cycle Assessment of Products:

- Classification Valuation and Improvement Analysis. *J. Clean. Prod.* **1**(2), 81-91.
- 20 Guinée, J.B., R. Heijungs (1993). A proposal for the classification of toxic substances within the framework of Life Cycle Assessment of Products. *Chemosphere* **26**(10), 1925-1944.
 - 21 Risk Assessment (RA) refers to the quantitative and qualitative evaluation of the risk posed to human health and/or the environment by the presence of a particular contaminant or by mixtures of contaminants.
 - 22 Huijbregts, M.A.J., J.B. Guinée, L. Reijnders (2001). Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part III: Export of potential impact over time and space. *Chemosphere* **44**, 59-65. Huijbregts, M.A.J., U. Thissen, J.B. Guinée, T. Jager, D. Kalf, D. van de Meent, A.M.J. Ragas, A. Wegener Sleswijk, L. Reijnders (2000). Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA. *Chemosphere* **41**, 541-573.
 - 23 Heijungs, R., J. Assies, J. Guinée (1994). Experts need ... experts' judgments. In: LCA news (a SETAC-Europe Publication), Vol. 4, No. 5, p. 9-10. Heijungs, R., J. Guinée (1993). CML on actual versus potential risks. In: SETAC Europe News (LCA News), Vol. 3, No. 4, p. 4.
 - 24 Guinée, J.B., R. Heijungs, M.G. Vijver, W.J.G.M. Peijnenburg (2017). Setting the stage for debating the roles of risk assessment and life-cycle assessment of engineered nanomaterials. *Nat. Nanotechnol.* **12**, 727-733.
 - 25 Guinée, J.B., A. de Koning, R. Heijungs (2022). LCA-based Absolute Environmental Sustainability Assessment is also relative. *J. Ind. Ecol.* **26**(3), 673-682.
 - 26 What do we actually mean by 'dynamic LCA' knowing that the basic data of an LCA has no real time dimension?
 - 27 Guinée, J.B., R. Heijungs (1995). A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product Life-Cycle Assessment. *Environ. Toxicol. Chem.* **14**(5), 917-925.
 - 28 European Commission (2018). PEFCR Guidance document, – guidance for the development of product environmental footprint category rules (PEFCRs), Version 6.3. May 2018. Brussels.
 - 29 EPD International (2018). General Programme Instructions for the International EPD® System - Version 3.01.
 - 30 'Long-term' refers to the time horizon over which the effects of the use of abiotic raw materials are evaluated.
 - 31 The EDP is based on a framework from the SUPRIM project (<https://eitrawmaterials.eu/project/suprim/>) where we start from a clear definition of the problem of raw material use and derive a consistent method.
 - 32 Van Oers, L., J.B. Guinée, R. Heijungs, R. Schulze, R.A.F. Alvarenga, J. Dewulf, J. Drielsma (*submitted*). Top-down characterization of resource use in LCA: from problem definition of resource use to operational characterization factors for resource inaccessibility of elements in a short-term time perspective.
 - 33 Migoni Alejandro, E. (2023). Expanding the coverage of ecosystem service impacts in Life Cycle Assessment - An interdisciplinary venture. PhD Thesis, Leiden University.
 - 34 Lots, F.A.E., P. Behrens, M.G. Vijver, A.A. Horton, T. Bosker (2017). A large-scale investigation of microplastic contamination: Abundance and characteristics of microplastics in European beach sediment. *Mar. Poll. Bull.* **123**(1-2), 219-226.
 - 35 Woods, J.S., F. Verones, O. Jolliet, I. Vazquez-Rowe, A.-M. Boulay (2021). A framework for the assessment of marine litter impacts in life cycle impact assessment. *Ecol. Indic.* **129**, 107918.
 - 36 Tanzer, S.E., A. Ramírez (2019). When are negative emissions negative emissions? *Energy Environ. Sci.* **12**, 1210.
 - 37 Guinée J.B., R. Heijungs, R. Frischknecht (2021). Multi-functionality in Life Cycle Inventory Analysis: Approaches and Solutions. Chapter 4 "Life Cycle Inventory Analysis" (Ciroth, A., R. Arvidsson (eds). In:

- LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment (Klöpffer, W., M.A. Curran, series eds). Springer, Cham.
- 38 Guinée, J.B., R. Heijungs (2007). Calculating the influence of allocation scenarios in fossil fuel chains. *Int J Life Cycle Assess* **12**(3), 173-180.
 - 39 European Commission (2023). The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2019) 640 final. Brussels.
 - 40 European Commission (2020). Strategic Plan 2020-2024. DG Research and Innovation. Brussels.
 - 41 Over the years, many variants of LCA have been developed, each with its own name. That has led to a soup of LCA variants, see Guinée, J. B., S. Cucurachi, P.J.G. Henriksson, R. Heijungs (2018). Digesting the alphabet soup of LCA. *Int J Life Cycle Assess* **23**(7), 1507-1511.
 - 42 Héder, M. (2017). From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *Innov. J.* **22**, 1–23.
 - 43 Collingridge, D. (1980). The social control of Technology. Pinter. London.
 - 44 Villares, M., Işildar, A., Mendoza Beltran, A. & Guinee, J. (2016). Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching. *J. Clean. Prod.* **129**, 315-328.
 - Villares, M., A. Işildar, C. van der Giesen, J. Guinée (2017). Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on bioleaching of e-waste for metal recovery. *Int J Life Cycle Assess* **22**(10), 1618-1633.
 - 45 Giesen, C. van der, S. Cucurachi, J. Guinée, G.J. Kramer, A. Tukker (2020). A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. *J. Clean. Prod.* **259**, 120904.
 - 46 We and others have published various methods for quantifying the uncertainties of LCAs. However, application of those methods in practice is problematic due to the lack of a good data basis for LCAs, see for example: Brömssen, C. von, E. Rös (2020). Why statistical testing and confidence intervals should not be used in comparative life cycle assessments based on Monte Carlo simulations. *Int J Life Cycle Assess* **25**(11), 2101-2105.
 - 47 Tsoy, N., B. Steubing, C. van der Giesen, J. Guinée (2020). Upscaling methods used in ex ante life cycle assessment of emerging technologies: a review. *Int J Life Cycle Assess* **25**(9), 1680-1692.
 - 48 Blanco Rocha, C.F., S. Cucurachi, J.B. Guinée, M.G. Vijver, W.J.G.M. Peijnenburg, R. Trattnig, R. Heijungs (2020), Assessing the sustainability of emerging technologies: A probabilistic LCA method applied to advanced photovoltaics. *J. Clean. Prod.* **259**, 120968.
 - 49 Steubing, B., A. Mendoza Beltran, R. Sacchi (2023). Conditions for the broad application of prospective life cycle inventory databases. *Int J Life Cycle Assess* **28**(9), 1092-1103.
 - 50 Mendoza Beltran M.A. (2018). Deepening the uncertainty dimension of environmental Life Cycle Assessment: addressing choice, future and interpretation uncertainties. PhD-thesis. Leiden University.
 - 51 From here on, design is used as the collective name for the design of chemicals, materials, products and technologies.
 - 52 Anastas, P., N. Eghbali (2010). Green Chemistry: Principles and Practice. *Chem. Soc. Rev.* **39**, 301–312.
 - 53 European Commission (2020). Chemicals Strategy for Sustainability – Towards a Toxic-Free Environment. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2020) 667 final, Brussels.
 - 54 The literal quote from the CSS reads: “overall sustainability should be ensured by minimizing the environmental footprint of chemicals in particular on

- climate change, resource use, ecosystems and biodiversity from a lifecycle perspective”.
- 55 Caldeira, C., R. Farcal, C. Moretti, L. Mancini, H. Rauscher, K. Rasmussen, J. Riego, S. Sala (2022). Safe and Sustainable chemicals by design chemicals and materials – Framework for the definition of criteria and evaluation procedure for chemicals and materials. Joint Research Centre (JRC), Ispra.
 - 56 Subramanian, Vrishali, Willie J.G.M. Peijnenburg, Martina G. Vijver, Carlos F. Blanco, Stefano Cucurachi, Jeroen B. Guinée (2022). Approaches to implement Safe by Design in early product development through combining risk assessment and life cycle assessment. *Chemosphere* **311**, 137080.
 - 57 Guinée, Jeroen B., Reinout Heijungs, Martina G. Vijver, Willie J. G. M. Peijnenburg, Gara Villalba Mendez (2022). The meaning of life ... cycles: lessons from and for safe by design studies. *Green Chem.* **24**, 7787 – 7800.
 - 58 In my 1995 PhD thesis I already concluded that “With mathematical procedures for the identification of improvement options and the inclusion of expertise from process technologists and designers, LCA might become an analytic tool for eco-design supporting a continuous environmental improvement of products”. Looking backwards, one can either conclude that it took a long time for this to become true, and/or that I had foresight
 - 59 Data is crucial for LCAs because the quality and completeness of the data that you put into the method is also reflected in the quality and completeness of the results of the LCA. Data will mainly have to come from the industry. Since this still happens far too little, government regulation seems indispensable. At the same time, we as an academic community can also do something. For example, far too many LCA case studies are published without reporting the underlying data. In addition, the elementary mass balances of process data and mass balances over the life cycle will also have to be improved, because many errors are still made with them. For example, in ecoinvent, metals absorbed from the soil by the roots of a crop are modeled as negative emissions, but in LCA case studies those negative emissions are generally not offset by positive emissions elsewhere in the crop's life cycle. We need to find ways to better communicate information about the elementary composition of flows between processes.
 - 60 Bolaños Arriola, J., V. Subramanian, C. Bakker, R. Balkenende, S. Cucurachi (2022). Safe by Design – A design approach for dealing with hazardous substances in products. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/12/22/safe-by-design>
 - 61 Winsemius, P. (2017). Je gaat het pas zien als je het doorhebt. Over Cruijff en leiderschap. Uitgeverij Balans, Amsterdam.
 - 62 At the suggestion of colleague Ranran Wang, I recently put large parts of the teaching material online so that interested parties from outside Leiden University can now also take note of it: <https://rise.articulate.com/share/Gx0ZK3GHgAYU-BSaboqXRHN0f6SjC4de#/>
 - 63 Or as Jasper van Kuijk put it in his column about Coldplay's 'Dance Floor' in the Volkskrant of February 18, 2023: “But the big advantage is that an LCA forces data, principles and assumptions to be made explicit. [...] Then it helps to quantify. With the National Budget we also don't say: ‘Well, this feels about as balanced as this, let's do it’”
 - 64 Ehrlich P.R., J.P. Holdren (1971). Impact of population growth. *Science* **171**, 1212-1217.
Chertow, M.R. (2008). The IPAT equation and its variants; changing views of technology and environmental impact. *J. Ind. Ecol.* **4**(4), 13-29.
 - 65 See, for example, the increase in global greenhouse gas emissions over recent decades, described in the IPCC Sixth Assessment Report: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/?_ga=2.180981858.491392194.1689495555-570006871.1689495554

- 66 Which, according to the demographic transition model (https://en.wikipedia.org/wiki/Demographic_transition), should ultimately happen automatically.
- 67 European Council (2022). Establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council. COM(2022) 142 final. Brussels.

Levenscyclusanalyse (LCA): ‘Je gaat het pas zien als je het doorhebt’

Oratie uitgesproken door

17

Prof. dr. ir. Jeroen B. Guinée

bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar

op het gebied van Levenscyclusanalyse

aan de Universiteit Leiden

op vrijdag 3 November 2023



Universiteit
Leiden

Mevrouw de rector magnificus, mijnheer de decaan, zeer gewaardeerde toehoorders,

1. Inleiding

In mijn kinderjaren gingen wij – mijn zus, twee broers en ik – met onze ouders jaarlijks op vakantie naar de Zwitserse Alpen. Het was in die tijd zeer gebruikelijk dat de kinderen er op uitgestuurd werden om boodschappen te doen. Zo ook tijdens de vakantie. Als oudste werd ik er op uitgestuurd om melk en brood te gaan halen bij de zogeheten ‘Molkerei’. Melk halen bij een ‘Molkerei’ was iets speciaals. De melk was vers van de koe want die koeien stonden achter de winkel in de stal en de weilanden. Maar wat ook speciaal was, was de verpakking. Wij haalden melk in een emmertje. Dat emmertje moest je zelf schoonmaken, daarmee ging je naar de winkel en daar werd hij dan gevuld met de gewenste hoeveelheid melk. ‘A truly circular system’ ‘avant la lettre’. Dit systeem werkte omdat het kleinschalig was, op dorpsniveau en mensen wellicht ook wat meer tijd hadden, of namen. In Zwitserland zat in diezelfde tijd ook al de beroemde winkelketen de ‘Migros’. Migros streefde milieudoelstellingen na maar tegelijkertijd was het wel een grote supermarktketen met een groot publiek. Het emmertjes-concept werkte op dat niveau niet meer. Migros verkocht in plaats daarvan een plastic zak met verse melk, die in een al dan niet eenmalig aan te schaffen kan geplaatst moest worden. Een in milieuzin sterk concept, althans als we het plastic afval netjes verwerken. In Nederland hadden we in die tijd de glazen retourfles, het eenmalige kartonnen pak en later ook nog een eenmalige HDPE en meermalige polycarbonaat plastic fles⁶⁸.

In 1986 kwam ik voor het eerst naar de universiteit Leiden. Ik studeerde milieuhygiëne in Wageningen en zat in de afsluitende fase van mijn studie. Mijn studie in Wageningen vond ik heel interessant maar toch miste ik iets. Dat boden ze in Leiden aan. Helias Udo de Haes en Gjalt Huppes adverteerde in het Wageningse universiteitsblad voor een studiegroep over Stofstatiegeld aan het toenmalige Centrum

voor Milieukunde Leiden (CML). Uit het werk van deze studiegroep is onder andere het eerste stofstroomschema voortgekomen. Mijn belangstelling voor de Milieukunde was gewekt. In 1987 ben ik vervolgens als onderzoeker bij het CML gaan werken met Gjalt en Helias als leermeesters. Vanaf dat moment heb ik mij bezig gehouden met het onderwerp van mijn leerstoel: milieugerichte levenscyclusanalyse van producten (hierna afgekort tot LCA). Het heette in die tijd nog geen LCA en er was eigenlijk ook nog geen volledige methode. Er was een begin van een methode en het productenbeleid was in opkomst. In 1990 kreeg het CML een project toegewezen om de methode in een Handleiding uit te werken en in 2002 hebben we daar een update van uitgebracht; daar zijn we beroemd om geworden en gebleven. Dertig jaar later is LCA een breed geaccepteerde methode die wereldwijd wordt toegepast in het producten- en aanverwant beleid en een verplichte methode is in vele EU “calls for proposals”.

19

Om uit te leggen wat LCA is, ga ik weer terug naar mijn voorbeeld van de melkverpakking, dat ik ook in mijn allereerste LCA artikel uit 1993 gebruikt heb. Wat is nu beter voor het milieu: de kan met plastic zak, de glazen retourfles, het eenmalige kartonnen pak, of de eenmalige of meermalige plastic fles. Om dit te weten te komen moeten we kijken naar de milieueffecten van alle processen, die over de gehele levenscyclus van een product, nodig zijn voor het vervullen van de functie van dat product. Melk moet op één of andere wijze van de winkel naar de consument gebracht worden en daar hebben we een verpakking voor nodig. Achter die verpakking schuilt een levenscyclus aan processen, van het winnen van de grondstoffen benodigd voor de productie van de verpakking tot de verwerking, recycling of hergebruik van de afgedankte verpakking. Van elk proces in die levenscyclus brengen we de milieueffecten kwantitatief in kaart. Dat begint met het kwantificeren van grondstoffen en energieverbruik en allerlei emissies zoals de uitstoot van CO₂ en bijvoorbeeld stikstof, termen die we vandaag de dag allemaal kennen. Vervolgens koppelen we die emissies aan modellen en

zogeheten karakteriseringsfactoren die emissies vertalen in effecten op klimaatverandering, vermesting, verzuring, grondstoffengebruik en allerlei andere milieuproblemen. Op die manier krijgen we voor elk verpakkingsalternatief uitkomsten die we onderling kunnen vergelijken. In een notendop is LCA dus een methode om de milieubelasting van product systemen in kaart te brengen over de gehele levenscyclus en op alle relevante milieuthema's, en niet alleen een 'carbon footprint' dus. We kunnen de methode niet alleen op verpakkingen toepassen maar in principe op elk denkbaar product of dienst, en ook op complexe technologische symbiose systemen zoals polyolen geproduceerd uit koolstof van gasen die vrijkomen bij de staalproductie.

Uit een Zwitserse LCA studie uit 1984, die meerdere van de eerder genoemde melkverpakkingen met een LCA benadering vergeleek, bleek dat het eenmalige kartonnen pak relatief het slechtste scoorde, en de fles en plastic zak-kan combinatie het beste. Het kartonnen pak woog ongeveer 25 gram maar bestond, en bestaat nog steeds, niet alleen uit karton, maar ook uit een plastic sluiting. Daarnaast heeft het een dunne plastic laag (laminaat) aan de binnenkant, om te zorgen dat het karton niet vochtig wordt. Dat laatste maakt recycling zo goed als onmogelijk. Volgens dezelfde studie woog de glazen fles 400 gram. Afhankelijk van hoe vaak we de fles hergebruiken, (bijvoorbeeld 20 of 40 keer) is het per gebruik toe te rekenen materiaalgewicht lager ($400/20=20$ gram) of veel lager ($400/40=10$ gram) dan het materiaalgewicht van het pak. Als we dat vergelijken met het in de studie aangenomen gewicht voor de plastic zak, slechts 7 gram, dan kunnen we al direct zien dat de zak hier een groot voordeel heeft en dat de glazen fles wel heel vaak moet worden hergebruikt alvorens daar tegenop te kunnen. Als LCA nu alleen over materiaalgewichten ging, dan zou het een eenvoudige exercitie zijn, maar ook een incomplete. De levenscycli achter deze verpakkingen zijn namelijk veel ingewikkelder. Zo moet bijvoorbeeld de glazen fles voor hergebruik door de consument terug naar de winkel gebracht worden, die daar de benenwagen, de fiets of de auto

voor kan gebruiken. Vervolgens worden de lege flessen met vrachtwagens van de winkel naar de fabriek getransporteerd om grondig gespoeld en vervolgens opnieuw gevuld te worden. Deze processen moeten in een LCA ook allemaal meegenomen worden want ze hebben stuk voor stuk allemaal milieueffecten, maar dat gebeurde helaas niet altijd. LCA studies willen ook nogal eens verschillen in hun aannamen over het gewicht van de fles, retourpercentages, gebruikte databronnen, en gehanteerde vergelijkingsbasis. Die vergelijkingsbasis noemen we in LCA de 'Functionele eenheid' (FU). Het gaat daarbij niet om het product (of zoals in dit geval de verpakking) maar om de functie die het product vervult (bescherming van een product en/of faciliteren van transport). We vergelijken dus niet 1 melkpak met 1 melkfles, maar we vergelijken bijvoorbeeld het verpakken van 1000 liter melk voor transport van fabrikant en winkel naar consument; daar hebben we 1000 kartonnen verpakkingen voor nodig, maar bij een hergebruik van 20 keer niet 1000, maar slechts 50 glazen flessen.

Ik hoop dat met deze introductie u allemaal ongeveer begrijpt wat LCA nu eigenlijk is en waar het over gaat. In mijn verdere verhaal zal ik eerst nog wat dieper ingaan op de relaties tussen consumptie, producten, milieuproblemen en LCA, en dan op 3 hoofdlijnen van LCA-gerelateerd onderzoek focussen. De eerste lijn is die van de LCA als wetenschappelijke methode, hoe wij daar aan bijgedragen hebben en welke uitdagingen er nog liggen. De tweede lijn gaat over wat ik maar even LCA-gebaseerde toekomstverkenningen noem. LCA wordt steeds vaker gebruikt voor het beoordelen van toekomstige productsystemen wat wel wordt aangeduid met de termen ex-ante en prospectieve LCA. De derde lijn is die van de levenscycli. De levenscyclus van een product is wat anders dan de levenscyclus van een stof of van een materiaal. Dat lijkt wellicht een detail maar wordt steeds belangrijker omdat we LCA, risico-analyse (RA) en ook MFA steeds vaker combineren in bijvoorbeeld de zogeheten 'Safe and Sustainable by Design'-benadering. Maar ik begin met relaties tussen consumptie, producten, milieuproblemen en LCA.

2. De relaties tussen consumptie, producten, milieuproblemen en LCA

Van mijn vader kreeg ik in 1987 een exemplaar van het boek 'Zorgen voor Morgen'. Het was één van de eerste publicaties ter wereld waar de stand van alle milieuproblemen die we toen kenden, systematisch op een rijtje werden gezet voor Nederland. Verreweg de meeste van die problemen beperkten zich overigens niet tot Nederland maar hadden een internationaal karakter. De milieuproblemen die dit boek in 1987 al aankaartte, zijn inmiddels 'Zorgen voor vandaag' geworden met afgelopen zomer bijvoorbeeld de gevolgen van extreem weer dagelijks in het nieuws.

Tegenwoordig worden de grote milieu uitdagingen ook wel aangeduid als de "Triple planetary crisis". Deze term refereert naar drie, deels samenhangende, crises: klimaatverandering, vervuiling, en het verlies aan biodiversiteit. Onze economie draait op consumptie. Consumptie van goederen, producten en diensten bepalen grotendeels hoe goed het gaat met de economie. Zoals ik net heb laten zien zit achter elk product dat wij consumeren een heel systeem van processen. Elk van die processen heeft een milieurugzak en draagt daarmee bij aan de genoemde 'Triple planetary crisis'. De sleutel voor het aanpakken van deze crisis zit dus vooral in onze consumptie en het systeem van processen daarachter. Het is dus van cruciaal belang om die processen te verbeteren en ons consumptiegedrag te veranderen door minder consumptie (consuminderen noem ik het maar even), milieuvriendelijkere consumptie, en waar mogelijk verbruik te vervangen door 'gebruik' en circulaire systemen. Het huidige milieubeleid richt zich dan ook op de transitie naar dergelijke duurzame, circulaire productie- en consumptiepatronen.

Over het algemeen hebben we de keuze tussen verschillende alternatieven voor een product, en is de kostprijs-kwaliteit verhouding de belangrijkste drijfveer voor onze uiteindelijke keuze. Idealiter zouden we duurzaamheid daar ook bij mee moeten laten wegen. Maar hoe doe je dat?

Nou ja, je kunt het natuurlijk simpelweg claimen ... Dat gebeurt dan ook op grote schaal: producten worden in de markt gezet als zijnde bio, biologisch, eco, ecologisch, groen, recyclebaar, herbruikbaar, CO₂-neutraal etc. Zelfs voordat een product of technologie op de markt is, krijgt het al één of meerdere van deze etiketten opgeplakt, meestal zonder een enkel, onderliggend bewijs. Maar zulke claims moeten natuurlijk wel onderbouwd worden, anders is de kans op 'greenwashing' te groot en daar schieten we niets mee op. Daar heeft de EU recent op ingespeeld met nieuwe regelgeving. De doelen van de nieuwe EU regelgeving zijn om groene claims betrouwbaarder te maken, consumenten te helpen in het maken van milieuvriendelijke keuzen, en te zorgen voor een *gelijke methodische basis voor de vergelijking van producten op milieuaspecten*. Dat laatste wordt bereikt middels de zogeheten '(product) environmental footprint methods', gebaseerd op LCA.

We hebben nu LCA gepositioneerd in relatie tot de milieucrisis waar we bijna dagelijks op het nieuws over te horen krijgen. LCA is weliswaar niet de oplossing voor die milieucrisis, maar wel een waardevolle methode om de integrale milieueffecten van producten en diensten kwantitatief in kaart te brengen en zo een transitie naar *daadwerkelijk* duurzamere productie- en consumptiepatronen te ondersteunen. De methode kan echter nog wel langs meerdere lijnen verbeterd, ontwikkeld en toegepast worden. Hierbij onderscheid ik, zoals eerder aangegeven, drie hoofdlijnen: 1) LCA als wetenschappelijke methode; 2) LCA voor het ondersteunen van toekomstverkenningen; 3) LCA als onderdeel van bredere benaderingen zoals 'Safe and Sustainable by Design' (SSbD).

3. LCA als wetenschappelijke methode

Als CML hebben we belangrijke bijdragen geleverd aan de ontwikkeling van de LCA als wetenschappelijke methode. Ik noem daarbij het zeer bekende LCA-raamwerk uit de standaarden van de International Organization for Standardization (ISO); de introductie van multimedia modellen voor de beoordeling van potentieel toxische stoffen

21

in LCA; de beoordelingsmethode voor het gebruik van grondstoffen; en de structurering en standaardisering van de aanpak van multifunctionaliteit. Ik ga hieronder kort op elk van deze onderwerpen in.

Het in de ISO-standaarden opgenomen LCA raamwerk bestaat sinds 1996 uit 4 fasen: Vaststelling van doel en reikwijdte; Inventarisatie; Effectbeoordeling; Interpretatie. De basis van dit raamwerk hebben wij gepubliceerd in ons allereerste LCA-artikel over de LCA-methode uit 1993⁶. Ook de in de LCA-wereld zeer bekende term 'functional unit', en de *naam* van de veelgebruikte software SimaPro komen uit Leiden. Daarnaast zijn onze LCA-Guide uit 1992 en het LCA-Handbook uit 2002 echte LCA-klassiekers. Toch is dit werk daarmee niet af want diverse sectoren vragen om verdere, op maat gesneden richtlijnen. Momenteel werken we dergelijke richtlijnen uit voor de EV sector in het EU TranSensus LCA-project met Hazem Elthohamy als promovendus.

Het CML is in de jaren 90 met name beroemd geworden met pionierswerk op het gebied van de Effectbeoordeling fase, gebaseerd op de thema's uit 'Zorgen voor Morgen'. Samen met mijn collega Reinout Heijungs, hebben we toen verschillende theoretisch vernieuwende concepten geïntroduceerd, waaronder de 'Toxicity Potentials' (TPs) in 1993. Net zoals de IPCC zogeheten Global Warming Potentials (GWPs) publiceerde waarmee verschillende emissies van broeikasgassen opgeteld kunnen worden, zo wilden wij 'Toxicity Potentials' ontwikkelen om verschillende emissies van potentieel toxische stoffen op te kunnen tellen in LCA. Een kant en klare methode daarvoor ontbrak op dat moment, en dus moesten we zelf een voorstel ontwikkelen. De basis van ons theoretische voorstel vormde het risico-quotiënt en de multimedia modellen uit de risico-analyse (RA). Het op te lossen probleem was dat RA op basis van emissiefluxen (kg/t) concentraties berekent en die vergelijkt met drempelwaarden voor die concentraties, terwijl we in LCA alleen emissiegegevens in massa-eenheden hebben zonder

echte tijdsdimensie. Wij introduceerden de referentiestof als oplossing, zoals dat ook in de GWP gehanteerd wordt. Ons voorstel is daarna in het begin van deze eeuw verder uitgewerkt door Mark Huijbregts en collega's. Vandaag de dag echter worden deze karakteriseringsfactoren uitgedrukt in 'Comparative Toxic Units' waarbij het helaas onduidelijk is hoe het flux-pulse probleem nu is opgelost. LCA en RA zijn fundamenteel verschillende methoden, met andere doelen en toepassingen, maar met het referentiestof concept toonden wij aan dat je kennis en modellen uit de RA in aangepaste vorm ook kan toepassen in LCA. Bij deze uitwisseling van kennis en modellen moeten echter wel de theoretische fundamenteen van de LCA methode gerespecteerd blijven worden. Wat dat precies betekent hebben we laten zien in publicaties over 'integratie of combinatie' van LCA en RA, over absolute LCA, en hopen we ook te laten zien voor 'dynamische LCA' in het promotieproject van Amelie Müller.

Voor de beoordeling van grondstoffengebruik hebben we in 1995 op een vergelijkbare wijze een methode ontworpen die bekend staat onder de naam 'Abiotic Depletion Potential' oftewel de 'ADP'. De methode heeft veel discussie te weeg gebracht, maar desondanks is de ADP tot op de dag van vandaag nog steeds onderdeel van de 'Product Environmental Footprint' (PEF) en de 'Environmental Product Declaration'. Mijn collega Laurant van Oers is in de loop van de jaren dé expert op dit gebied geworden en samen hebben we recent een alternatief voor deze ADP ontwikkeld: de (lange-termijn) 'environmental dissipation potential', de EDP. We zijn daarbij overgestapt van het concept 'uitputting' naar het meer relevante concept 'dissipatie'. Elementaire grondstoffen verdwijnen namelijk niet en raken dus in die zin niet uitgeput, maar door emissies verspreiden we ze in kleine hoeveelheden door het milieu waardoor ze steeds moeilijker herwinbaar worden. We hebben zeer recent de EDP ook voor een kortere tijdshorizon uitgewerkt. Nu moeten we vooral nog stappen maken in het beschikbaar krijgen van de voor beide EDP-versies benodigde gegevens.

Door gerichte uitbreiding van de onderzoekstaf op het CML en samenwerking tussen de CML afdelingen Industrial Ecology (IE) en Environmental Biology (EB) hebben we het impact assessment werk inmiddels weer actief opgepakt. Met name biodiversiteit en ecosysteemdiensten zijn daarbij focuspunten. Een belangrijke uitdaging is er voor te zorgen dat de verfijnde LCIA methoden die hiervoor ontwikkeld worden, aansluiten bij informatie die op LCI niveau aanwezig is, zoals Elizabeth Migoni Alejandre heeft gedaan in haar proefschrift over het modelleren van ecosysteemdiensten in LCIA. Daarnaast ligt het voor de hand de in EB opgedane kennis over de effectbeoordeling van nanomaterialen en microplastics ook te gaan gebruiken in LCIA-methoden. Het feit dat LCAs over nanomaterialen bijvoorbeeld nog steeds geen of nauwelijks effectbeoordelingen bevatten van emissies van diezelfde nanomaterialen, is namelijk moeilijk te verkopen. Microplastics is een ander milieuprobleem waar gerichte samenwerking tussen de twee afdelingen van ons instituut ook een meerwaarde zou kunnen opleveren. Ik noemde in mijn inleiding net enkele voorbeelden van LCAs van plastic verpakkingen. Helaas wordt in deze LCAs het probleem van zwerfafval dat leidt tot de 'plastic soup' en tot microplastics die we zelfs op onze zandstranden terugvinden, nog niet goed meegenomen. Er worden mondiale inspanningen verricht om die situatie te verbeteren en ik verwacht dat het CML vanuit een samenwerking van de twee afdelingen Environmental Biology en Industrial Ecology hier ook een nuttige bijdrage aan kan leveren.

Tenslotte, veel van mijn werk in het verleden is gegaan over het vaak vergeten maar o zo belangrijke methodische onderwerp 'Multifunctionaliteit'. Veel processen produceren niet één, maar meerdere economisch waardevolle producten of functies. Bij warmte-krachtkoppeling wordt bijvoorbeeld warmte als waardevol product naast elektriciteit geproduceerd. Op dezelfde manier zorgt een recyclingproces ervoor dat afval wordt verwerkt voor de ene partij terwijl er tegelijkertijd een secundair waardevol materiaal wordt geproduceerd voor een

andere partij. De vraag in LCA is dan hoe de emissies van dat proces verdeeld moeten worden over die producten; in andere woorden, wie krijgt de credits? Dat kan op vele manieren en 'allocatie' is er daar één van. De manier waarop je dat doet, kan grote gevolgen hebben voor het resultaat van een LCA studie. Het kan zelfs kan leiden tot negatieve milieuscores die de indruk wekken dat meer consumptie van het betreffende product tot een beter milieu zou leiden, terwijl dat feitelijk onjuist is. Om enige orde in deze chaos te brengen, hebben we een 4-stapsmethode gepubliceerd, die ook voor de toenemende hoeveelheid LCAs over Circulaire Economie systemen van groot belang is. Maar wat we ons eigenlijk veel minder realiseren is dat wanneer we een LCA database gebruiken, bijvoorbeeld ecoinvent, in die database al keuzen zijn gemaakt over hoe multifunctionaliteit op te lossen. Eigenlijk zou zo'n database geen methodische keuzen moeten bevatten, die een gebruiker niet meer kan wijzigen. Al langere tijd hebben wij ons daarom als doel gesteld om een multifunctionele versie van de ecoinvent-database te maken. Deze uitdaging hebben we in 2006 voor het eerst opgepakt. Recent zijn we in overleg met ecoinvent zelf aan de slag gegaan om van de ecoinvent 3.9.1 versie een multifunctionele variant te ontwikkelen. Wat blijkt: van de ruim 21000 processen in ecoinvent 3.9.1 komen er ruim 3800 (18%) uit oorspronkelijk meer dan 1550 multifunctionele processen voort. De uitvoerder van een LCA die dus de ecoinvent 3.9.1 versie gebruikt accepteert daarmee de keuzen die ecoinvent maakt voor deze 1550 multifunctionele processen. We weten nog niet zeker of we gaan slagen in onze missie, maar uiteindelijk hopen we de keuze, en de analyse van de gevoeligheid van die keuze over dit belangrijke methodische probleem terug te brengen bij de uitvoerder van een LCA zelf.

4. LCA-gebaseerde toekomstverkenningen

Daarmee kom ik bij mijn tweede hoofdlijn: LCA voor het ondersteunen van toekomstverkenningen. De EU 'Green Deal' wil investeren in onderzoek, innovatie, wetenschap en technologie als onderdeel van Europa's nieuwe groeistrategie.

In de meeste van alle door de EU uitgezette studies naar nieuwe technologieën en innovaties wordt vereist dat er ook een LCA van die technologie wordt gemaakt. Door LCA's te eisen van opkomende technologieën, producten en materialen - ik zal dat vanaf nu aanduiden met 'technologiesystemen' -, wordt duurzaamheid niet pas beoordeeld nadat ze op de markt zijn gekomen (ex-post), maar al in een zo vroeg mogelijk ontwikkelingsstadium vooraf (ex-ante, prospectief of explorerend). Op die manier kunnen LCA uitkomsten de ontwikkeling van nieuwe technologiesystemen mede gaan sturen. Ik focus me in mijn verhaal nu verder op ex-ante LCA dat zich met name richt op nieuwe technologiesystemen die zich in een vroeg stadium van ontwikkeling bevinden; een zogeheten lage 'technology readiness level' (TRL) hebben. Verbeteringen in een vroege ontwikkelingsfase kunnen van groot belang zijn voor de toekomstige milieuprestaties van een technologiesysteem. De milieueffecten van een technologie kunnen echter niet goed voorspeld worden vóórdat die technologie op grote schaal gebruikt wordt. Maar verandering van een reeds ingeburgerde technologie is op zijn beurt weer uiterst lastig en duur. Dit dilemma staat bekend als het 'Collingridge dilemma'.

Dit dilemma maakt een ex-ante LCA studie anders dan een 'gewone' LCA. In 2016 heeft Marco Villares in zijn afstudeerproject baanbrekend werk op dit gebied gedaan. Voortbouwend hierop heeft Coen van der Giesen later de uitdagingen van ex-ante LCA op een rijtje gezet. Hij stelde dat de basismethoden en het raamwerk van ex-ante en de gewone LCA precies hetzelfde. Maar ex-ante LCA kent specifieke uitdagingen voor de invulling van een aantal stappen van de gewone LCA methode. Zo is het verkrijgen van LCA gegevens, met name emissiegegevens, voor nieuwe technologiesystemen een grote uitdaging. Tevens zijn de systeemspecificaties van de innovatie vaak nog onvolledig en kan het lastig zijn te bepalen met welk bestaande systeem we de innovatie kunnen vergelijken. Tenslotte, zijn de onzekerheden natuurlijk inherent groot en zijn gegevens voor een lab-schaal verre van

representatief voor de uiteindelijke commerciële schaal van een systeem en zullen er scenario's moeten worden geformuleerd die een aantal meest waarschijnlijke opschalingsopties representeren. Op diverse van deze onderwerpen hebben we inmiddels vorderingen gemaakt zoals blijkt uit het scenariowerk van Natalya Tsoy, het werk aan onzekerheden door Carlos Felipe Blanco en aan prospectieve LCI databases van Bernhard Steubing dat voortborduurde op de dissertatie van Angelica Mendoza Beltran.

Maar daarmee zijn we er nog niet. Los van het feit dat we op al deze onderwerpen verder zullen moeten werken, moeten we vooral ook meer ervaring opbouwen met het doen van dergelijke LCA-toekomstverkenningen. Recente EU projecten hebben geleerd dat het cruciaal en uiterst leerzaam is dat LCA-specialisten in ex-ante studies direct samenwerken met technologie-experts, uit zowel het bedrijfsleven als de academie. Er zijn dus casestudies nodig met een focus op de ontwikkeling van nieuwe technologiesystemen. Ik nodig daarom collega-onderzoekers uit, van zowel binnen als buiten de universiteit, om samen te werken aan deze innovaties. Ook onze Industrial Ecology master studenten willen heel graag aan dit soort projecten meewerken, en misschien kunnen we zo een 'ex-ante lab' creëren, waar ervaring met ex-ante LCA's opgedaan kan worden en technologische innovaties begeleid kunnen worden met gedegen milieuanalyses. Want alleen samen kunnen we stappen naar echt duurzamere technologieën zetten.

5. SSbD en levenscycli

De derde en laatste lijn van mijn verhaal gaat over Safe and Sustainable by Design (SSbD) dat voortkomt uit Safe of Safer by Design (SbD). SbD richt zich op het meenemen van veiligheidsaspecten in de vroege stadia van het ontwerp van nieuwe chemicaliën, materialen, producten en technologieën. Veiligheid heeft daarbij in de eerste plaats betrekking op de gezondheid van mens en milieu. SbD is een relatief nieuw

concept en is voortgekomen uit de groene chemie, dat onder andere tot doel heeft “veiligere chemicaliën te ontwerpen in alle stadia van de *chemische levenscyclus* [...], vanaf de vroegste fase van het productieproces”. De EU ‘Chemicals Strategy for Sustainability’ (CSS) introduceerde recent de SSbD benadering. SSbD heeft tot doel niet alleen veiligheid te garanderen maar ook alle milieueffecten van nieuwe chemicaliën te minimaliseren vanaf het begin van een ontwerptraject. Zo moet ongewenste probleemafwenteling worden voorkomen. De CSS kondigde een raamwerk voor SSbD aan. Dat raamwerk is inmiddels ontwikkeld en wordt nu getest in praktijkcases. In dit raamwerk komen naast Risicoanalyse (RA) meerdere Industriële Ecologie methoden voor waaronder LCA en ‘Material Flow Analysis’ (MFA), en wordt ‘by-design’ geïnterpreteerd als moleculair, proces en/of productontwerp.

De kennis van en ervaring met SSbD is in een nog vroeger stadium dan die met ex-ante LCA, maar het ligt voor de hand dat ex-ante LCA gecombineerd met ex-ante Risk Assessment (RA) een belangrijke rol gaan spelen in SSbD. In opdracht van het Nederlandse Ministerie van IenW, hebben wij in 2020 de literatuur gereviewd die ex-ante LCA en RA als onderdeel van een SbD of SSbD-benadering toepasten.

Vorig jaar tijdens mijn sabbatical in Barcelona aan de Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) ben ik diezelfde literatuur nog wat dieper ingedoken. Het was mij bij een vlugge screening van deze literatuur namelijk opgevallen dat de term ‘levenscyclus’ zonder verdere uitleg losjes gecombineerd werd met zowel ‘product’, ‘materiaal’ als ‘chemische stof’. Tegelijkertijd weten we uit de Industriële Ecologie dat de ‘levenscyclus van een product’ iets anders betekent dan de ‘levenscyclus van een materiaal’ of de ‘levenscyclus van een chemische stof’. Zo omvat de levenscyclus van een product bijvoorbeeld alle materialen en stoffen die benodigd zijn voor het functioneren van dat product, terwijl de levenscyclus van een stof alle producten omvat waarin die stof toegepast wordt.

Ik heb toen een korte literatuur review gedaan waarbij ik ben nagegaan waar de term ‘levenscyclus’ in de gereviewde studies naar refereerde en wat men precies met ‘stof’, ‘materiaal’ en ‘product’ bedoelde. Mijn bevindingen waren redelijk schokkend. De term ‘levenscyclus’ werd door de meeste studies niet gedefinieerd terwijl het zelfs binnen één discipline al verschillende betekenissen kan hebben. Ook werd vaak niet gespecificeerd over welke ‘levenscyclus’ men het precies had: die van een ‘stof’, ‘materiaal’, ‘product’ of een ‘stof in een product’. Bovendien bleken ook basale begrippen als ‘stof’, ‘materiaal’ en ‘product’ in de verschillende wetenschappelijk disciplines verschillende betekenissen te hebben, of juist heel vergelijkbare zoals blijkt uit combinaties als ‘chemische producten’ en ‘chemische materialen’, die door elkaar werden gebruikt in de genoemde literatuur.

De eenvoudige conclusie van dit werk is dat onderzoekers beter moeten definiëren wat ze met al deze termen bedoelen en welke levenscyclus ze bedoelen. Door bijvoorbeeld consistente definities te gebruiken van de termen ‘product’, ‘materiaal’ en ‘chemische stof’, kwamen wij tot drie typen levenscycli die onderscheiden kunnen worden: 1) de levenscyclus van een product of een materiaal; (2) de levenscyclus van een chemische stof in een specifiek product systeem; en (3) de levenscyclus van een chemische stof in al zijn product toepassingen. Ieder van deze drie levenscyclus benaderingen kan andere probleemafwentelingen in kaart brengen. Het zijn dus complementaire benaderingen die eigenlijk alle drie standaard in SSbD studies zouden moeten worden toegepast. Dat is echter nog nauwelijks of niet gedaan en vergt ook substantieel meer werk.

Wat me bij bovenstaand werk ook opviel was dat de SbD en SSbD literatuur vooral over ‘Sustainable’ en ‘Safe’ ging maar nog nauwelijks over de ‘D’ van Design. Daar gaan wij met en onder leiding van Ruud Balkenende van de TU Delft in een recent gestart NWA project verandering in brengen. Het project beoogt een methode te ontwikkelen, testen en

25

implementeren waarmee veilige en circulaire producten ontworpen kunnen worden en waarbij alle letters van het SSbD acroniem geadresseerd worden. Voor het CML is Nina van Dulmen de promovenda op dit onderwerp. Door dit project, onze recente projecten over SbD en SSbD, en door gezamenlijke begeleiding van studenten heb ik de afgelopen jaren mijn samenwerking met de faculteit Industrieel Ontwerpen van de TU Delft geïntensiveerd. Deze samenwerking gaat echter al terug naar 1990 toen onder andere Conny Bakker en ik nadachten hoe we LCA konden gebruiken bij milieugericht ontwerpen (ecodesign). Echter, in 1990 waren de LCA en ook de ecodesign methoden nog in een pril stadium van ontwikkeling, en moest er eerst vooral in het verbeteren van deze methoden geïnvesteerd worden. Inmiddels zijn we een stuk verder. Je kunt dus zeggen dat deze cirkel nu rond is. Persoonlijk vind ik het gebruik van LCA voor design en verbeteren van producten en technologiesystemen ook de meest aantrekkelijke toepassing van LCA omdat het aanzet tot continue verduurzaming in plaats van statische. Echter er zijn ook nog een aantal zeer grote uitdagingen voor het doen van SSbD studies, waaronder wat men zou kunnen aanduiden als het 'dubbele gegevensprobleem': LCA gegevens zijn schaars, en helaas geldt hetzelfde voor RA gegevens. In SSbD komen deze methoden bij elkaar, en hebben we dus een dubbele gegevensuitdaging.

6. LCA onderwijs

In een oratie over LCA kan ook onderwijs niet ontbreken. Het lesgeven in LCA aan master studenten is een plezier om te doen. Het vergt echter wel veel voorbereiding, toewijding en tijdsinvestering. Mijns inziens kun je LCA pas echt goed doorgronden als je eerst de theorie goed leert, en vervolgens die theorie in de praktijk, in een LCA studie toepast. Ik heb dat leertraject wel eens vergeleken met het beklimmen van de Mont Ventoux met de racefiets. Dat heb ik inmiddels vier keer gedaan met mijn goede wielervriend Hil, dus ik weet waar ik het over heb. Het beklimmen van deze berg vergt heel veel

training, focus, en doorzettingsvermogen. Studenten die mijn cursus hebben gevolgd zullen begrijpen waar ik het over heb. Eerst leer je de theorie en doe je een aantal oefeningen, dan begint het verteringsproces, ga je het geleerde in casestudies toepassen, en dan begin je het steeds beter te begrijpen. Dat deed mij denken aan een beroemde uitspraak van Nederlands' grootste voetballer en 'volksfilosoof', Johan Cruijff: "Je gaat het pas zien als je het doorhebt". Het geldt ook in algemenere zin: je gaat de potenties en beperkingen van LCA pas goed zien als je de fundamenteën van de methode goed begrijpt en zelf toegepast hebt, en dat kost nou eenmaal wat tijd en ervaring.

7. Het bredere perspectief

LCA is een wetenschappelijk gefundeerde evaluatiemethode maar er zijn wel heel veel, helaas nog vaak schaarse, gegevens voor nodig. Naast vele gegevens, vergt de methode ook het maken van verschillende keuzen en aannamen, waarvan ik er een paar genoemd heb. Vanwege die gegevens, keuzen en aannamen wordt de algemene uitkomst van een LCA studie vaak aangeduid als 'it depends' ('het hangt er van af'). Maar – zoals mijn collega René Kleijn altijd zegt – in ieder geval weten we dan wáár het van afhangt, wat een zeer waardevol resultaat kan zijn. Echter, 'it depends' wordt ook vaak als kritiek op LCA gebruikt. Het klopt dat de uitkomsten van een LCA afhangen van gekozen gegevens, gemaakte aannamen en gemaakte methodische keuzen, maar dergelijke keuzen en aannamen zijn niet te vermijden en deels te wijten aan alom aanwezige variabiliteit die je juist in kaart wilt brengen. Bovendien kunnen we de integrale milieueffecten van technologiesystemen niet direct meten. We kunnen dat alleen maar in kaart brengen middels evaluatiemethoden zoals LCA. Het maken van aannamen en keuzen is inherent aan een evaluatiemethode. Er is geen beter alternatief, daar hebben we het in het verleden uitgebreid over gehad⁶. LCA is de enig beschikbare methode om de integrale milieudruk van technologiesystemen *kwantitatief* en *systematisch* in kaart te brengen.

Maar met LCA alleen komen we er niet: het is niet 'the Holy Grail'. Laten we het daarom in een breder perspectief plaatsen. Een in de Industriële Ecologie zeer bekende vergelijking is de zogeheten IPAT vergelijking uit 1971: . De vergelijking beschrijft hoe de milieudruk ($I=Impact$) het product is van drie variabelen: bevolkingsomvang ($P=Population$), welvaart ($A=Affluence$) en technologie ($T=Technology$). Iets versimpeld gesteld drukt de T de milieudruk per consumptie-eenheid uit terwijl de A aangeeft hoeveel eenheden we per persoon consumeren en de P aangeeft met hoeveel personen we zijn op deze aarde. Ondanks dat innovaties – al dan niet ondersteund door LCA's - hebben bijgedragen aan de verbetering van de milieuprestaties van sommige individuele producten (de T), is de milieuwinst daarvan veelal teniet gedaan door een toename van de globale welvaart (A) en/of bevolking (P). We zullen dus niet alleen de milieudruk per eenheid consumptie maar ook de consumptie zelf naar beneden moeten brengen (consuminderen), en de almaar doorgaande bevolkingsgroei moeten stoppen. Terwijl dit op zich al geen eenvoudige opdracht is, moeten we tegelijkertijd ook de welvaart beter verdelen en rebounds van consuminderen voorkomen: want consuminderen leidt tot besparingen die we vervolgens weer ergens aan gaan uitgeven met alle mogelijke milieugevolgen van dien. Het is duidelijk dat we bij het draaien aan al deze IPAT knoppen behoefte hebben aan visionairen; die kunnen we binnenkort gaan kiezen. Voor het draaien aan de T -knop hebben wij als consumenten vooral betrouwbare informatie nodig. En daar zijn positieve ontwikkelingen te melden. Zo is de EU onder andere via de 'PEF'²⁷, de 'Directive on Green Claims'¹⁰, en het 'Digital Product Passport' bezig om ons als consumenten van de benodigde informatie te voorzien. Bij onze zoektocht naar met LCA onderbouwde, duurzamere en meer circulaire technologiesystemen kunnen we ons wellicht nog laten inspireren door het voorbeeld van het 'melkemmertje en de Molkerei', dat achteraf bekeken zijn tijd wellicht ver vooruit was. Daarmee is mijn verhaal ook circulair.

8. Dankwoord

Ik kom aan het slot van mijn rede en wil graag een kort dankwoord uitspreken. Allereerst dank ik de rector en het bestuur van Universiteit Leiden voor het instellen van deze leerstoel, en het faculteitsbestuur en alle anderen die aan de totstandkoming van mijn benoeming hebben bijgedragen. Speciale dank gaat uit naar onze voormalige CML-directeur Arnold Tukker voor het initiëren, en naar onze huidige CML directeur Martina Vijver voor het leiding geven en managen van mijn benoemingsprocedure.

Ook wil ik mijn collega's van de 'ouwe hap' bedanken voor de altijd voor elkaar openstaande deuren, luisterende oren, samenwerking met elkaar en niet voor onszelf, en de genoegdoening die dat geeft.

Mijn langstzittende kamergenoot Arjan en voormalig kamergenoot Ranran, voor de vele waardevolle gesprekken over van alles en nog wat.

Reinout, onze jarenlange samenwerking heeft geresulteerd in een prachtige verzameling wetenschappelijke artikelen waar ik trots op ben.

Gjalt, jij bent de grote inspirator en geestelijk vader van al onze IE-methoden; dat kan niet vaak genoeg gezegd worden. Helias, dank voor je tomeloze inzet om ons Leidse LCA-denken over te brengen aan de rest van de wereld.

Ik werk al 36 jaar op het CML en mensen hebben mij wel eens gevraagd waarom ik daar altijd ben gebleven. Dat heeft natuurlijk te maken met waar ik de 'ouwe hap' net voor bedankte. Ik hoop oprecht dat we deze cultuur kunnen behouden, ook in het grotere instituut dat we nu zijn.

Dank ook aan al mijn voormalige en huidige promovendi en Industrial Ecology studenten voor het in mij gestelde

27

vertrouwen. Jullie zijn van onschatbare waarde voor mij en deze oratie geweest.

Dank ook aan al het ondersteunend personeel van het CML: wat zouden wij zonder jullie zijn.

Tenslotte, dank aan alle familie, vrienden en kennissen, hier vandaag aanwezig: ik waardeer dit zeer. Lieve Hetty, Sanne en Bart, dank voor jullie onvoorwaardelijke liefde en steun.

Ik heb gezegd.

Noten

1. <https://historiemelkvervoer.nl/zuivelverhalen/de-polycarbonaat-melkfles-1>
2. Udo de Haes, H.A., G. Huppes, J.B. Guinée (1988). Stofbalansen en stroomschema's: de accumulatie van stoffen in economie en milieu. *Milieu* 3(2), 51-55.
3. In 1987 bracht het Ministerie van VROM het Indicatief Meerjaren Programma Milieubeheer (IMP) 1987-1991 uit. Dat was het eerste IMP dat een sectie (4.8, p.87) over "Producten" bevatte: https://repository.overheid.nl/frbr/sgd/19861987/0000111100/1/pdf/SGD_19861987_0005049.pdf
4. Guinée, J.B., H.A. Udo de Haes, G. Huppes (1993). Quantitative Life Cycle Assessment of Products: Goal definition and Inventory. *J. Clean. Prod.* 1(1), 3-13.
5. Door alleen te focussen op effecten op klimaatverandering, kunnen we afwenteling op andere problemen niet meer in kaart brengen en schuiven we die naar toekomstige generaties door. Dat kan niet de bedoeling zijn van een duurzaamheidsanalyse.
6. Tsoy, N., B.R.P. Steubing, J.B. Guinée (2023). Ex-ante Life Cycle Assessment of polyols using carbon captured from industrial process gas. *Green Chem.* 25, 5526-5538.
7. Anonymous (1984). Ökobilanzen von Packstoffen. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 24. Bundesamt für Umweltschutz. Bern.
8. Langeweg, F. (1988). Zorgen voor Morgen – Nationale Milieuverkenning 1985-2010. Samson H.D. Tjeenk Wilink, Alphen aan den Rijn.
9. <https://unfccc.int/blog/what-is-the-triple-planetary-crisis>
10. European Commission (2023). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive). COM(2023) 166 final, Brussels.
11. Integraal wordt in het vervolg van dit verhaal gebruikt in de betekenis van 'alle relevante milieueffecten over de gehele levenscyclus van het geanalyseerde systeem'.
12. Ik gebruik bewust de term 'duurzamere' en niet 'duurzaam', want elke menselijke activiteit komt met een milieu footprint. Of zoals de Engelsen zeggen: "there's no such thing as a free lunch".
13. De zogeheten 'Sustainable Development Goals' (SDGs) en met name SDG 12, 'verantwoorde consumptie en productie' zijn gericht op de invoering van duurzamere consumptiepatronen tegen het jaar 2030; zie <https://sdgs.un.org/goals>. Productgericht milieubeleid is echter al veel ouder zoals hierboven aangegeven, maar zie bijvoorbeeld ook: Sala, S., Amadei, A. M., Beylot, A., & Ardente, F. (2021). The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades. *Int J Life Cycle Assess* 26(12), 2295–2314.
14. ISO (2006). International Standard ISO 14040, Environmental Management - Life Cycle Assessment — Principles and framework. Genève, Switzerland.
15. Gabathuler, H. (2006). The CML Story How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA. *Int J Life Cycle Assess (Special Issue to Helias A. Udo de Haes)* 2(1), 127–132.
16. Het was eigenlijk al een Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) raamwerk 'avant la lettre'.
17. Van den Berg, M.M.H.E., D. Schmidt, M. van Koten-Hertogs, G. Huppes, W.T. de Groot (1986). Potenties van produktbeleid. CML-mededelingen nr. 26. Centrum voor Milieukunde, Leiden.
18. In 1990 heb ik samen met Ruben Huele, Paul Mulder en Laurant van Oers in opdracht van Pré Consultants Amersfoort de eerste versie van de LCA software SimaPro ontwikkeld. SimaPro is nu een wereldmerk, waarvoor de eer geheel Pré gaat, maar de merknaam komt uit Leiden. Aangezien slechts weinigen weten wat dit acroniem betekent, leg ik het graag nog één keer uit: SimaPro staat voor 'Systeem voor de Integrale Milieu-Analyse van PROducten'.
19. Guinée, J.B., R. Heijungs, H.A. Udo de Haes, G. Huppes, 1993. Quantitative Life Cycle Assessment of Products: Classification Valuation and Improvement Analysis. *J. Clean. Prod.* 1(2), 81-91.
20. Guinée, J.B., R. Heijungs (1993). A proposal for the classification of toxic substances within the framework of Life Cycle Assessment of Products. *Chemosphere* 26(10), 1925-1944.
21. Risk Assessment (RA) refers to the quantitative and qualitative evaluation of the risk posed to human health

and/or the environment by the presence of a particular contaminant or by mixtures of contaminants.

22. Huijbregts, M.A.J., J.B. Guinée, L. Reijnders (2001). Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part III: Export of potential impact over time and space. *Chemosphere* **44**, 59-65.
- Huijbregts, M.A.J., U. Thissen, J.B. Guinée, T. Jager, D. Kalf, D. van de Meent, A.M.J. Ragas, A. Wegener Sleeswijk, L. Reijnders (2000). Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with nested multimedia fate, exposure and effects model USES-LCA. *Chemosphere* **41**, 541-573.
23. Heijungs, R., J. Assies, J. Guinée (1994). Experts need ... experts' judgments. In: LCA news (a SETAC-Europe Publication), Vol. 4, No. 5, p. 9-10.
- Heijungs, R., J. Guinée (1993). CML on actual versus potential risks. In: SETAC Europe News (LCA News), Vol. 3, No. 4, p. 4.
24. Guinée, J.B., R. Heijungs, M.G. Vijver, W.J.G.M. Peijnenburg (2017). Setting the stage for debating the roles of risk assessment and life-cycle assessment of engineered nanomaterials. *Nat. Nanotechnol.* **12**, 727-733.
25. Guinée, J.B., A. de Koning, R. Heijungs (2022). LCA-based Absolute Environmental Sustainability Assessment is also relative. *J. Ind. Ecol.* **26**(3), 673-682.
26. Wat bedoelen we eigenlijk met 'dynamische LCA' wetende dat de basisgegevens van een LCA geen echte tijdsdimensie hebben?
27. Guinée, J.B., R. Heijungs (1995). A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product Life-Cycle Assessment. *Environ. Toxicol. Chem.* **14**(5), 917-925.
28. European Commission (2018). PEFCR Guidance document, – guidance for the development of product environmental footprint category rules (PEFCRs), Version 6.3. May 2018. Brussels.
29. EPD International (2018). General Programme Instructions for the International EPD® System - Version 3.01.
30. 'Lange-termijn' verwijst naar de tijdshorizon waarover de effecten van het gebruik van abiotische grondstoffen geëvalueerd worden.
31. De EDP is gebaseerd op raamwerk uit het SUPRIM project (<https://eitrawmaterials.eu/project/suprim/>) waarbij we starten vanuit een duidelijke definitie van het probleem van grondstoffengebruik, en een daarmee consistente methode afleiden.
32. Van Oers, L., J.B. Guinée, R. Heijungs, R. Schulze, R.A.F. Alvarenga, J. Dewulf, J. Drielsma (*submitted*). Top-down characterization of resource use in LCA: from problem definition of resource use to operational characterization factors for resource inaccessibility of elements in a short-term time perspective.
33. Migoni Alejandre, E. (2023). Expanding the coverage of ecosystem service impacts in Life Cycle Assessment - An interdisciplinary venture. PhD Thesis, Leiden University.
34. Lots, F.A.E., P. Behrens, M.G. Vijver, A.A. Horton, T. Bosker (2017). A large-scale investigation of microplastic contamination: Abundance and characteristics of microplastics in European beach sediment. *Mar. Poll. Bull.* **123**(1-2), 219-226.
35. Woods, J.S., F. Verones, O. Jolliet, I. Vazquez-Rowe, A.-M. Boulay (2021). A framework for the assessment of marine litter impacts in life cycle impact assessment. *Ecol. Indic.* **129**, 107918.
36. Tanzer, S.E., A. Ramírez (2019). When are negative emissions negative emissions? *Energy Environ. Sci.* **12**, 1210.
37. Guinée J.B., R. Heijungs, R. Frischknecht (2021). Multifunctionality in Life Cycle Inventory Analysis: Approaches and Solutions. Chapter 4 "Life Cycle Inventory Analysis" (Ciroth, A., R. Arvidsson (eds). In: LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment (Klöppfer, W., M.A. Curran, series eds). Springer, Cham.
38. Guinée, J.B., R. Heijungs (2007). Calculating the influence of allocation scenarios in fossil fuel chains. *Int J Life Cycle Assess* **12**(3), 173-180.
39. European Commission (2023). The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2019) 640 final. Brussels.
40. European Commission (2020). Strategic Plan 2020-2024. DG Research and Innovation. Brussels.
41. In de loop de jaren zijn er vele varianten van LCA ont-

- wikkeld die allemaal een eigen naam kregen. Dat heeft geleid tot een soep van LCA-varianten, zie Guinée, J. B., S. Cucurachi, P.J.G. Henriksson, R. Heijungs (2018). Digesting the alphabet soup of LCA. *Int J Life Cycle Assess* **23**(7), 1507-1511.
42. Héder, M. (2017). From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *Innov. J.* **22**, 1–23.
 43. Collingridge, D. (1980). The social control of Technology. Pinter. London.
 44. Villares, M., Işildar, A., Mendoza Beltran, A. & Guinée, J. (2016). Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching. *J. Clean. Prod.* **129**, 315-328.
 - Villares, M., A. Işildar, C. van der Giesen, J. Guinée (2017). Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on bioleaching of e-waste for metal recovery. *Int J Life Cycle Assess* **22**(10), 1618-1633.
 45. Giesen, C. van der, S. Cucurachi, J. Guinée, G.J. Kramer, A. Tukker (2020). A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. *J. Clean. Prod.* **259**, 120904.
 46. Voor het kwantificeren van de onzekerheden van LCA's hebben wij en anderen diverse methoden gepubliceerd. Toepassing van die methoden in de praktijk is echter problematisch door het ontbreken van een goede gegevensbasis voor LCA's, zie bijvoorbeeld: Brömssen, C. von, E. Rös (2020). Why statistical testing and confidence intervals should not be used in comparative life cycle assessments based on Monte Carlo simulations. *Int J Life Cycle Assess* **25**(11), 2101-2105.
 47. Tsoy, N., B. Steubing, C. van der Giesen, J. Guinée (2020). Upscaling methods used in ex ante life cycle assessment of emerging technologies: a review. *Int J Life Cycle Assess* **25**(9), 1680-1692.
 48. Blanco Rocha, C.F., S. Cucurachi, J.B. Guinée, M.G. Vijver, W.J.G.M. Peijnenburg, R. Tractnig, R. Heijungs (2020). Assessing the sustainability of emerging technologies: A probabilistic LCA method applied to advanced photovoltaics. *J. Clean. Prod.* **259**, 120968.
 49. Steubing, B., A. Mendoza Beltran, R. Sacchi (2023). Conditions for the broad application of prospective life cycle inventory databases. *Int J Life Cycle Assess* **28**(9), 1092-1103.
 50. Mendoza Beltran M.A. (2018). Deepening the uncertainty dimension of environmental Life Cycle Assessment: addressing choice, future and interpretation uncertainties. PhD-thesis. Leiden University.
 51. Ontwerpen wordt vanaf hier gebruikt als de verzamelnaam voor het ontwerpen van chemicaliën, materialen, producten en technologieën.
 52. Anastas, P., N. Eghbali (2010). Green Chemistry: Principles and Practice. *Chem. Soc. Rev.* **39**, 301–312.
 53. European Commission (2020). Chemicals Strategy for Sustainability – Towards a Toxic-Free Environment. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2020) 667 final, Brussels.
 54. Het letterlijke citaat uit het CSS luidt: “overall sustainability should be ensured by minimizing the environmental footprint of *chemicals* in particular on climate change, resource use, ecosystems and biodiversity from a *lifecycle perspective*”.
 55. Caldeira, C., R. Farcal, C. Moretti, L. Mancini, H. Rauscher, K. Rasmussen, J. Riego, S. Sala (2022). Safe and Sustainable chemicals by design chemicals and materials – Framework for the definition of criteria and evaluation procedure for chemicals and materials. Joint Research Centre (JRC), Ispra.
 56. Subramanian, Vrishali, Willie J.G.M. Peijnenburg, Martina G. Vijver, Carlos F. Blanco, Stefano Cucurachi, Jeroen B. Guinée (2022). Approaches to implement Safe by Design in early product development through combining risk assessment and life cycle assessment. *Chemosphere* **311**, 137080.
 57. Guinée, Jeroen B., Reinout Heijungs, Martina G. Vijver, Willie J. G. M. Peijnenburg, Gara Villalba Mendez (2022). The meaning of life ... cycles: lessons from and for safe by design studies. *Green Chem.* **24**, 7787 – 7800.
 58. In mijn proefschrift uit 1995 concludeerde ik al dat “Met wiskundige procedures voor het identificeren van verbeteringsopties en het opnemen van expertise van procestechnologen en ontwerpers, LCA een analytisch instrument voor eco-ontwerp zou kunnen worden ter ondersteuning van een voortdurende verbetering van het

milieu van producten”. Terugkijkend kan je concluderen dat het lang heeft geduurd voordat dit waarheid werd, en/of dat ik een vooruitziende blik had....

59. Gegevens zijn cruciaal zijn voor LCA's want de kwaliteit en compleetheid van gegevens die je in de methode stopt zie je ook weer terug in de kwaliteit en compleetheid van de resultaten van de LCA. Gegevens zullen met name van de industrie moeten komen. Aangezien dat nog veel te weinig gebeurt, lijkt overheidsregulering onmisbaar. Tegelijkertijd kunnen we als academische gemeenschap ook iets doen. Er worden bijvoorbeeld nog veel te veel LCA casestudies gepubliceerd zonder rapportage van de onderliggende gegevens. Daarnaast zullen ook de elementaire massabalansen van procesgegevens en massabalansen over de levenscyclus moeten verbeteren want daar worden ook nog veel fouten mee gemaakt. In ecoinvent worden bijvoorbeeld metalen die door de wortels van een gewas uit de bodem worden opgenomen, gemodelleerd als negatieve emissies, maar in LCA-casestudies worden die negatieve emissies over het algemeen nergens anders in de levenscyclus van het gewas gecompenseerd door positieve emissies. We moeten wegen vinden om informatie over de elementaire samenstelling van stromen tussen processen beter door te geven.
60. Bolaños Arriola, J., V. Subramanian, C. Bakker, R. Balkenende, S. Cucurachi (2022). Safe by Design – A design approach for dealing with hazardous substances in products. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/12/22/safe-by-design>
61. Winsemius, P. (2017). Je gaat het pas zien als je het doorhebt. Over Cruijff en leiderschap. Uitgeverij Balans, Amsterdam.
62. Op voorstel van collega Ranran Wang heb ik grote delen van het lesmateriaal recent online gezet zodat ook geïnteresseerden van buiten de Universiteit Leiden er nu kennis van kunnen nemen: <https://rise.articulate.com/share/Gx0ZK3GHgAYU-BSaboqXRHN0f6SjC4de#/>
63. Of zoals Jasper van Kuijk het in zijn column over de 'Dansvloer van Coldplay' in de Volkskrant van 18 februari 2023 verwoordde: “Maar het grote voordeel is dat een LCA dwingt om data, uitgangspunten en aannamen expliciet te maken. [...] Dan helpt het om te kwantificeren. Bij de Rijksbegroting zeggen we ook niet: 'Nou, dit voelt wel ongeveer in balans zo, laten we het maar doen.'”
64. Ehrlich P.R., J.P. Holdren (1971). Impact of population growth. *Science* **171**, 1212-1217.
- Chertow, M.R. (2008). The IPAT equation and its variants; changing views of technology and environmental impact. *J. Ind. Ecol.* **4**(4), 13-29.
65. Zie bijvoorbeeld de toename van de wereldwijde emissies van broeikasgassen over de afgelopen decennia, beschreven in het IPCC Sixth Assessment Report: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/?_ga=2.180981858.491392194.1689495555-570006871.1689495554
66. Wat volgens het demografisch transitie-model (https://nl.wikipedia.org/wiki/Demografische_transitie) uiteindelijk vanzelf zou moeten gebeuren.
67. European Council (2022). Establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council. COM(2022) 142 final. Brussels.

PROF. DR. IR. JEROEN B. GUINÉE



Prof. Dr. Ir. Jeroen Guinée is a Professor of Life Cycle Assessment (LCA) at Leiden University in the Netherlands. He obtained his MSc in Environmental Sciences at Wageningen University and successfully defended his PhD in LCA in 1995 at Leiden University. His doctoral research focused on the development of an environmental LCA method and contributed significantly to the first LCA Guide in 1992. In 2002, he served as the project leader and editor for a seminal publication in the field of LCA, the “Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards,” which stands as one of the most respected works in this domain. He has (co-)authored over 100 scientific papers and contributed to various books. He imparts his extensive knowledge by teaching a course on LCA to second-year master’s students. Additionally, he dedicates his time to supervising master and PhD students as well as Postdocs. Throughout his academic career, he has actively participated in numerous large EU-funded research consortia. In recent years, his research has been devoted to ex-ante LCA and Safe and Sustainable by Design (SSbD), aimed at supporting the development of more sustainable and innovative products and technologies. Having played a foundational role in shaping LCA to its current form, he possesses an impressive 35+ year career in the global LCA arena.



Universiteit
Leiden