

Invloed van de eindelevensduurbehandeling op de milieu-impact van betonnen constructies

Suzanne Kelem

Studentennummer: 01708066

Promotoren: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. Nele De Belie
Begeleiders: dr. ir. Philip Van den Heede, Lisa Van Gulck

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2021-2022

Invloed van de eindelevensduurbehandeling op de milieu-impact van betonnen constructies

Suzanne Kelem

Studentennummer: 01708066

Promotoren: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. Nele De Belie
Begeleiders: dr. ir. Philip Van den Heede, Lisa Van Gulck

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2021-2022

Voorwoord

Het is niet onbekend dat de bouwindustrie een aanzienlijke invloed heeft op het milieu. Daarom vind ik het van groot belang dat iedereen die zich bezighoudt met gebouwen, van de meest ervaren deskundige tot de nog onwetende student, zich bewust is van de milieu-impact, die ermee gepaard gaat. Hoewel het milieu vaak centraal staat, is dit in de studierichting slechts beperkt aanwezig. Dit is net de reden waarom ik me erin wou verdiepen. Nog voor de thesisonderwerpen werden vrijgegeven wist ik dus al in welke richting ik een onderwerp zocht, en ik heb geen spijt gehad van mijn keuze.

Hoewel ik met veel trots kan zeggen dat dit mijn thesis is, zijn er toch verschillende mensen die ik wil bedanken, die het resultaat mede mogelijk hebben gemaakt. Allereerst wil ik mijn twee promotoren, prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman en prof. dr. Nele De Belie, bedanken voor het interessante onderwerp, waarbij ik mij moest verdiepen in twee uiteenlopende aspecten. Naast het onderwerp wil ik hen ook bedanken voor de begeleiding, waarbij hun ervaring een extra dimensie gaf aan het onderzoek. Daarnaast wil ik ook mijn twee begeleiders, dr. ir. Philip Van den Heede en Lisa Van Gulck, bedanken voor hun hulp om mijn weg te vinden in het onderwerp, hun snelle en nuttige feedback en tips en hun betrokkenheid, wat me motiveerde om het onderzoek steeds verder te trekken.

Afgelopen jaar heb ik een behoorlijke tijd achter mijn computer gezeten; onderzoek gedaan, berekeningen gemaakt en veel uitgeschreven. Dit alles heeft geleid tot waar ik nu sta, op het punt waar het student zijn stopt. Hoewel ik nog niet helemaal klaar ben om het student zijn volledig achter mij te laten, hebben de voorbije vijf jaar me er wel volledig op voorbereid. Door de verschillende uitdagingen van deze studie, de vele groepswerken, etc. heb ik mezelf steeds verder ontwikkeld en ben ik klaar voor de studententijd af te ronden, met als hoogtepunt mijn masterproef.

Suzanne Kelem
Juni 2022

Deze masterproef vormt een onderdeel van een examen. Eventuele opmerkingen die door de beoordelingscommissie tijdens de mondelinge uiteenzetting van de masterproef werden geformuleerd, werden niet verwerkt in deze tekst.

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

{03/06/2022}

Abstract

Invloed van de eindelevensduurbehandeling op de milieu-impact van betonnen constructies

Student: Suzanne Kelem (01708066)

Promotoren: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. Nele De Belie

Begeleiders: dr. ir. Philip Van den Heede, Lisa Van Gulck

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw - Voorzitter: prof. dr. ir.-arch. Johan Lagae

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur - Universiteit Gent

Academiejaar 2021-2022

Beschrijving werk

De bouwindustrie is verantwoordelijk voor een gigantische hoeveelheid bouw- en sloopafval en het uitputten van primaire grondstoffen. Door meer in te zetten op het milieu en de voordelen van recyclage te kwantificeren kunnen beide problemen opgelost worden. Bij staal zijn deze materiaalvoordelen al duidelijk bepaald en algemeen geweten. Bij andere constructiematerialen, zoals beton, staan ze nog niet zo ver. De eindelevensduurbehandeling van gebouwen wordt nog te vaak achterwege gelaten bij een levenscyclusanalyse, i.e. de methode om de milieu-impact van een materiaal of gebouw(element) te bepalen. Hierdoor is het onzeker of de lasten van het recyclageproces van beton kunnen opgeheven worden door de voordelen van betonrecyclage. Deze masterproef onderzoekt de invloed van de eindelevensduurbehandeling op de milieu-impact van betonnen constructies, gebruik makend van een levenscyclusanalyse waarbij de focus ligt op module C en D. In een eerste onderzoek op materiaalniveau wordt het belang van de eindelevensduurbehandeling van beton op de milieu-impact meteen duidelijk door de vergelijking tussen het *best-case scenario*, namelijk hoogwaardige recyclage, en het *worst-case scenario*, namelijk storten. Daarnaast worden er enkele theoretische aannames getoetst die het proces kunnen optimaliseren. Zo kan aangetoond worden welke technieken een positief effect hebben op het milieu en waar dus meer onderzoek nodig is, zodat deze technieken opgenomen kunnen worden in de norm NBN B 15-001. Een tweede onderzoek wordt gedaan op gebouwniveau, met als doel het optimale eindelevensduur scenario van een case study naar voor te schuiven. Zo wordt er geconcludeerd dat het volledig hoogwaardige recycleren van de betonnen structuur de beste eindelevensduurbehandeling is. Hierbij worden er dus gerecycleerde granulaten ontwikkeld, die kunnen toegepast worden in structureel beton. Het resultaat van de case study kan doorgetrokken worden naar de verschillende oude betonnen gebouwen die in de jaren 60 werden gebouwd.

Trefwoorden

levenscyclusanalyse, eindelevensduur, betonpuin, gerecycleerd beton, gerecycleerde granulaten

Influence of the end-of-life treatment on the environmental impact of concrete constructions

Suzanne Kelem

Supervisors: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. Nele De Belie, dr. ir. Philip Van den Heede, Lisa Van Gulck

Abstract – What is the importance of comprehensively including the end-of-life impact in the calculation of the environmental impact of the building? Are there methods to optimise the recycling process of concrete in order to reduce the environmental impact? Which end-of-life treatment can be put forward as an optimal scenario for a concrete structure? This research examines the influence of the end-of-life treatment on the environmental impact of concrete constructions, using a life cycle assessment with a focus on module C and D. It is a well-known problem that there is an enormous amount of concrete and demolition waste, along with a risk of depletion of the raw materials. By quantifying the benefits of recycled concrete, both problems can be tackled. A first study on material level confirmed the importance of the end-of-life treatment on the environmental impact. To reduce the environmental impact score even more, several optimisation techniques can be applied, but more investigation is needed. Afterwards, in order to propose an optimal end-of-life scenario, the acquired results are implemented in a case study of the University of Ghent. It appears that the most favourable end-of-life scenario, for the many outdated concrete buildings of the 1960s, is high-grade recycling.

Keywords – life cycle assessment, end-of-life, concrete debris, recycling concrete, recycled aggregate

I. INTRODUCTION

Concrete is one of the most used construction materials in the entire world. To deal with the significant amount of construction and demolition waste (CDW), it is necessary to define what will happen to the concrete debris after the demolition of dwellings. Landfill will put an extra burden on the environment, low-grade recycling will have a limited profit and high-grade recycling can imply a significant amount of avoided primary materials.

Currently, the majority of concrete waste in Belgium is recycled and used in low-grade applications, such as road construction. Although, the advantage of high-grade recycling is twofold. On the one hand, it uses a considerable amount of CDW for further use, just as low-grade recycling does. On the other hand, it reduces the extraction of non-renewable primary materials and thus prevents the depletion of raw materials. Therefore, the use of concrete debris in high-grade applications has a significant influence on the environmental impact of the end-of-life (EOL) of a building. Nevertheless, the EOL is only taken into account to a limited extent nowadays. As a result, it is impossible to indicate whether or not the benefits of recycling can outweigh the burdens of high-grade recycling processes and thus present an optimal environmental EOL scenario.

The high-grade recycling process of concrete has three main stages, as shown in Figure 1. When concrete is low-grade recycled, the last phase of washing is not necessary due to

the lower required technical performance. The crusher, screener and washing plant each require different auxiliary equipment and entail a certain amount of material losses, marked in blue and red respectively. All machines consume diesel, except for the electric washing plant.

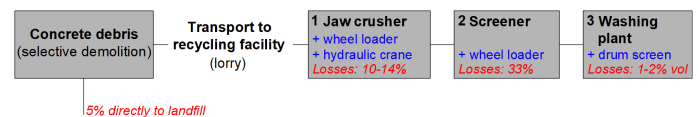


Fig. 1. Recycling process, according to the recycling company Degotec.

After the recycling process, recycled aggregates (RA's) are obtained. These consist of natural coarse aggregates and attached mortar. The amount of mortar attached to the aggregates can vary in function of the dimensions of the primary aggregates and can be between 30 and 60% of the RA's volume [3]. The ageing mortar is the main reason for the lower quality of RA's. It causes an overall lower density and strength, but also a higher porosity, permeability and water absorption [1]. This results in a limited substitution ratio of 20%, which ensures the production of high quality recycled aggregate concrete (RAC) [4].

To counterbalance the lower quality of RA's, more cement is required in a RAC compared to primary concrete [2]. This implies an increase of about 5%, which raises the environmental impact of RAC due to the high CO₂ emissions from cement production.

II. LCA METHODOLOGY

A. Goal and scope

What is the importance of comprehensively including the EOL impact in the calculation of the environmental impact of the building? To find an answer to this research question, a life cycle assessment (LCA) is executed to determine the environmental impact of different EOL scenarios. The study is executed on two different levels, i.e. material level and building level. The used functional units (FU) are one cubic metre of concrete and a case study of the University of Ghent, the S4 building on Campus Sterre.

The boundary conditions include module A, C and D, with a focus on the EOL. Through allocation, namely the cut-off system model with the addition of module D, the potential benefits and burdens can be taken into account in the first life cycle. Figure 2 shows all the phases involved in the LCA.

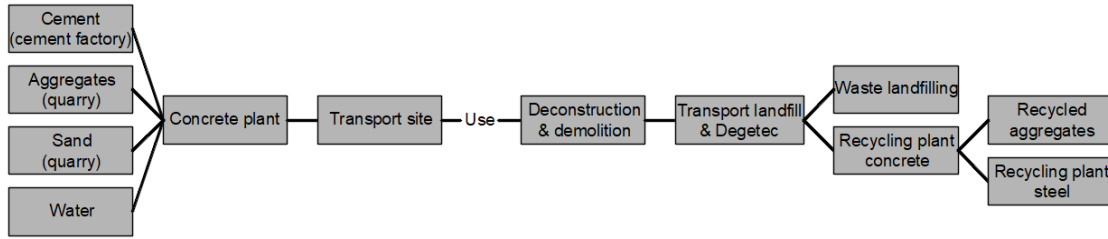


Fig. 2. Boundary conditions LCA – The use phase (module B) falls beyond the system boundaries.

B. Life cycle inventory (LCI)

All input and output flows of the life cycle are defined in the SimaPro 9.1.1.1 software, using the Ecoinvent 3.6 database. Due to the choice of transformation processes, all the transport distances were added based on site-specific data, except for steel, which is not the focus of this research, wherefore generic data are used. The assumption for the positions of the End-of-Waste (EOW) and functional equivalence are shown in Figure 3. The assumed division of module D in different submodules is also indicated.

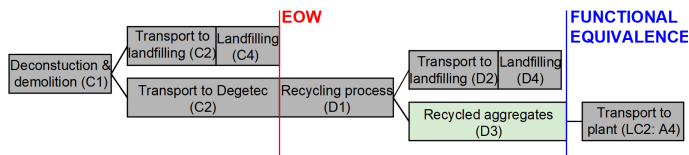


Fig. 3. EOL: assumption of the EOW and functional equivalence and the division of module D in submodules – The green colour indicates an environmental benefit of recycling.

C. Life cycle impact assessment (LCIA)

This study utilises the ReCiPe 2016 method for the impact assessment, which considers both the midpoint and endpoint categories. This method allows for the computing of a single score. Although this is a rather subjective value, it is a good basis to make comparisons.

D. Scenarios

For the material level, three EOL treatments are considered, namely high-grade recycling, low-grade recycling and landfilling. The first scenario is rather optimistic, the second realistic and the third pessimistic. In addition, some theoretical assumptions are evaluated as an attempt to optimise the recycling process. A first research is based on the reuse of material losses from the recycling machines, more specifically crushing sand. This scenario will reduce the amount of CDW even more. A second opportunity is to spread out the crushed concrete debris to induce carbon dioxide (CO₂) capture through carbonation. In a last analysis, it is assumed that the recycling process completely runs on electricity instead of diesel.

On the building level, a case study of the University of Ghent is examined using six possible EOL treatments: complete high-grade recycling, complete low-grade recycling, landfilling, and three different combinations of high-grade and low-grade recycling. The goal is to propose an optimal EOL scenario from an environmental perspective. The outcome could be

generalised in order to provide an answer to the question ” what to do with the many outdated concrete buildings of the 1960s?”. The case study thus has not only a relevance for the S4 building itself.

III. RESULTS

A. Material level

The results of the first examination, based on one cubic metre of concrete, are presented in Figure 4. A comparison is made between the EOL of high-grade recycling, low-grade recycling and landfilling. The environmental impact of module A is therefore identical for the three scenarios, as well as the benefits of steel, which are not the main focus of the study and are merely shown in the graph for completeness.

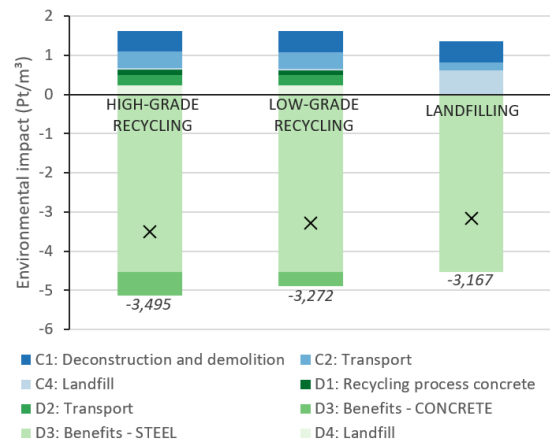


Fig. 4. EOL of high-grade recycling, low-grade recycling and landfilling

Because low-grade recycling does not require a washing plant, its process (D1) and landfill (D4) impact are slightly lower compared to high-grade recycling. Due to the lower required quality of low-grade aggregates, the concrete benefits are 40% lower than the high-grade recycling scenario.

The total transport impact (submodules C2 and D2) is 3.5 times bigger for the recycling scenarios than for landfilling. This is on the one hand caused by the distance from the S4 to Degetec, which is twice as long as the distance to the landfill site. On the other hand, the material losses need to be transported twice, both to Degetec and to the landfill site.

Disregarding steel recycling, the environmental impact of the EOL can be reduced by 25% and 8% if the concrete is respectively high-grade and low-grade recycled instead of being

dumped. The benefits of the recycling process can therefore outweigh the burdens.

Today, it is common practice to recycle concrete and reuse it in low-grade applications. However, due to the limited environmental benefit of low-grade recycling, together with a comparable burden to the high-grade recycling process, the net environmental impact of low-grade recycling is 20% higher than that of high-grade recycling.

It must be taken into account that the RA's have a reduced technical performance, requiring an additional 5% of cement in the second life cycle to guarantee the same strength class. As a result, the environmental impact of module A will increase by 2.5% in the second life cycle. When looking at the global warming potential (GWP), i.e. kilograms of CO₂ equivalent per cubic metre, it is even an increase of 4.23%.

In addition, some theoretical assumptions were considered in order to optimise the recycling process. A possible improvement in the environmental impact can stimulate further research. When crushed sand is reused, the additional avoided primary materials reduce the environmental impact by 74%. Compared with the disposal of concrete, this reduction is even 80%. As a second optimisation, the concrete debris can be spread out after crushing to induce carbonation and thus CO₂ intake. An average intake of 25 kg CO₂ eq/m³ can cause a reduction of 20% compared to high-grade recycling. The last theoretical assumption, where the recycling process is powered by wind energy, can reduce the process burden by 35% (D1). However, the burden of the recycling process is only 20% of the total burden of module D and will thus not have a major impact on the total environmental impact.

B. Building level - Case study

The aim of this sub-research at building level is to propose an optimal EOL treatment for the case study from an environmental point of view. Six possible scenarios were considered, all with different shares for landfill, high-grade and low-grade recycling. The results of the EOL are shown in Figure 5, ordered from highest to lowest environmental impact.

From this study, it can be concluded that the assumed worst-case scenario, i.e. landfilling, indeed has the highest net environmental impact. Subsequently, low-grade recycling has the second-highest impact. In addition, the scenario in which the entire concrete volume is high-grade recycled has the lowest environmental impact score and is therefore the most favourable. However, given that the concrete debris must have a certain strength, high-grade recycling is not always possible. But generally speaking, the greater the volume of high-grade recycled concrete, the more beneficial it is for the environment.

Via the sub-module C2 transport, it is clear that the location of the recycling site is very determining for the environmental impact. Although the same mass of concrete debris is transported in C2, the scenarios with recycling have over twice as much impact. This can be explained by the twice as large distance from the S4 building to the recycling company Degetec as to the landfilling. This aspect is thus highly site-specific and will lead to different conclusions in other case studies. However, if the distance would differ less, this would imply an additional benefit for the recycling scenarios.

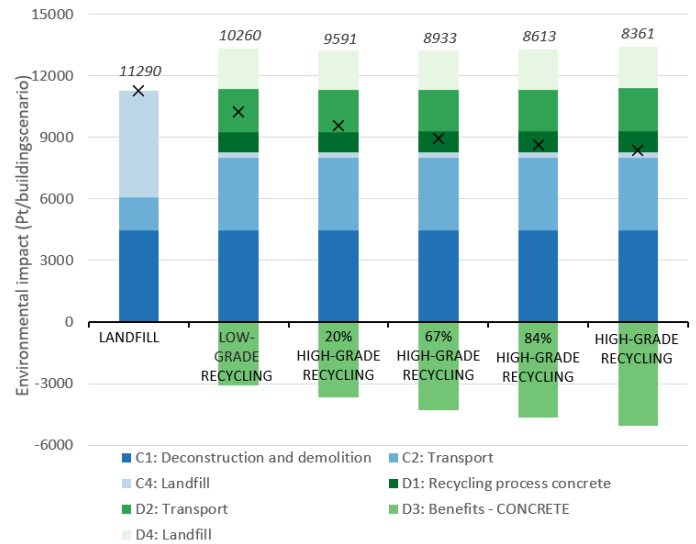


Fig. 5. Case study: six different EOL scenarios for the S4 building

IV. CONCLUSION

The results indicate the importance of comprehensively including the EOL impact in a LCA. Although module A has the highest impact in a LCA, there are clear differences between the assumed EOL treatments of concrete. The environmental impact can be significantly reduced by considering high-grade recycling as common practice.

The difference can be further highlighted by optimising the recycling process. Although the reuse of crushed sand is not yet permitted in concrete, the results show that it has a significant beneficial effect on the environmental impact. Hence, it is worthwhile to investigate this further to permit the use of crushed sand in concrete in the standard NBN B 15-001 [4] as a replacement for primary sand.

At the building level, it is also clear that the optimal scenario from an environmental point of view is to high-grade recycle the building completely. If this is not possible due to low strengths, the best option is always to high-grade recycle as much of the concrete as possible.

REFERENCES

- [1] Casuccio, M., Torrijos, M., Giaccio, G., and Zerbino, R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, 22:1500–1506.
- [2] Fraj, A. and Rachida, I. (2017). Concrete based on recycled aggregates – recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. *Construction and Building Materials*, 157:952–964.
- [3] Hansen, T. C. and Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, 5(1):79–83.
- [4] ISO (2012). *Beton-Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit - Nationale aanvulling bij NBN EN 206-1:2001*. International Organization for Standardization, NBN B 15-001 edition.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Literatuurstudie	3
2.1	Betonfractie	3
2.1.1	Recyclageproces beton	4
	Proces gerecycleerde granulaten	4
	Mobiele en stationaire recyclage-installaties	6
2.1.2	Problematieken en aandachtspunten	7
	Selectieve sloop	7
	Kwaliteit	7
	Transport	8
	Fysische en mechanische eigenschappen	8
2.1.3	Optimalisatie	10
	Verschillende brekers	10
	Gebruik brekerzand	11
	Koolstofdioxide-captatie via carbonatatie	11
	Elektriciteit versus diesel	12
	Verbetering eigenschappen	12
2.2	Levenscyclusanalyse	14
2.2.1	Methode en levenscyclusfasen	14
	1. Doel en reikwijdte	14
	2. Inventarisatie	15
	3. Impactanalyse	15
	4. Interpretatie van de resultaten	16
2.2.2	Eindelevensduurbehandeling	16
	Module C	16
	Module D	17
	End-of-waste en functionele equivalentie	18
	Materiaalstromen	19
	Allocatie eindelevensduur	19
	Toekomstig gebruik	20

2.2.3	Gevoeligheidsanalyse	20
3	Methodologie	21
3.1	Onderzoeksvraag	21
3.1.1	Theoretische aannames - Materiaalniveau	21
3.1.2	Case study - Gebouwniveau	22
3.2	Onderzoek via levenscyclusanalyse (LCA)	24
3.2.1	Doel en reikwijdte	24
3.2.2	Levenscyclusinventarisatie (LCI)	25
	Module A	25
	Module B	26
	Eindelevensduurbehandeling	26
	Module C	27
	Module D	27
3.2.3	Levenscyclusimpactanalyse (LCIA)	29
4	Resultaten eindelevensduur	31
4.1	Vooronderzoek	31
4.1.1	Wapeningsaandeel	31
4.1.2	Verwaarlozing landbezit in D1	33
4.1.3	Verwaarlozing machine-impact in D1	34
4.2	Hoogwaardige recyclage versus storten	35
4.2.1	Middelpuntcategorie: Global Warming Potential	37
4.2.2	Extra cementgebruik	37
4.2.3	Laagwaardige recyclage	41
4.3	Hergebruik breekzand	43
4.4	Koolstofdioxide-captatie	44
4.5	Elektriciteit versus diesel	46
5	Case study S4	48
5.1	Scenario's	49
5.1.1	Hoogwaardige recyclage	49
5.1.2	Laagwaardige recyclage	49
5.1.3	Storten	50
5.1.4	Combinatie hoogwaardige en laagwaardige recyclage	50
5.1.5	Hoogwaardige recyclage van vloerplaten	50
5.1.6	Hoogwaardige recyclage van vloerplaten en kolommen	51
5.2	Resultaten	52
5.2.1	Eindelevensduur	52
5.2.2	Module C - D - A	53

6 Conclusie	55
6.1 Onderzoek	55
6.1.1 Materiaalniveau	55
6.1.2 Gebouwniveau	56
6.1.3 Besluit	56
6.2 Beperkingen	57
6.3 Verder onderzoek	58
Referenties	59
Bijlagen	64
A Werkelijke machines Degetec	65
B Materiaallijst SimaPro	67
C Verwaarlozing landbezit	71
D Windenergie versus zonne-energie	72
E Case study	73

Lijst van figuren

2.1	Recyclageproces, volgens Degetec	4
2.2	Werking Jaw Crusher MOBICAT MC 100(i) EVO	5
2.3	Werking Screener MOBISCREEN MS 12 Z	5
2.4	Werking Trommelzeef PHOENIX 1600T	6
2.5	Proces mobiele en stationaire recyclage	7
2.6	Structuur RAC	9
2.7	Werking verschillende brekers	10
2.8	Werking Impact Crusher MOBIREX MR 130(i) EVO2	11
2.9	Mogelijke mengprocessen beton	13
2.10	Vier stappen van LCA zoals gedefinieerd in ISO 14040	14
2.11	Levenscyclusfasen en systeemgrenzen LCA zoals gedefinieerd in EN 15084 en EN 15978	15
2.12	Stappen LCIA	15
2.13	End-of-waste en functionele equivalentie ten opzichte van module D	18
2.14	Allocatie via cut-off methode	19
3.1	Plan campus Sterre	22
3.2	Betonnen draagstructuur niveau 0	23
3.3	Afbakening van de systeemgrenzen	25
3.4	Grenzen eindelevensduur: EOW en functionele equivalentie	26
3.5	De twee routes van staalproductie	28
3.6	Afvaltransport eindelevensduur beton en staal	29
4.1	Invloed van de hoeveelheid wapening op de milieu-impact	32
4.2	Materiaalaandelen productiefase (A1-A3)	33
4.3	EOL: Hoogwaardige recyclage (CASE 1) versus Storten (CASE 2)	36
4.4	Levenscyclus hoogwaardige recyclage - <i>Global Warming Potential</i>	37
4.5	Eindelevensduur hoogwaardige recyclage - <i>Global Warming Potential</i>	38
4.6	Productiefase: basisbeton, beton met 5% meer cement en beton met 10% meer cement	40
4.7	Productiefase: basisbeton, beton met 5% meer cement en beton met 10% meer cement - <i>Global Warming Potential</i>	40
4.8	EOL: Hoogwaardige recyclage, laagwaardige recyclage en storten van betonpuin	42
4.9	EOL: Hoogwaardige recyclage van granulaten zonder en met hergebruik breekzand	44
4.10	Module D: Hoogwaardige recyclage van granulaten en koolstofdioxide (CO ₂)-captatie	46

4.11	Module D1: Diesel, zonne-energie en windenergie	47
5.1	Betonnen draagstructuur niveau 0	48
5.2	Scenario 1: Hoogwaardige recyclage	49
5.3	Scenario 2: Laagwaardige recyclage	49
5.4	Scenario 3: Storten	50
5.5	Scenario 4: Combinatie hoogwaardige en laagwaardige recyclage	50
5.6	Scenario 5: Hoogwaardige recyclage van vloerplaten	51
5.7	Scenario 6: Hoogwaardige recyclage van vloerplaten en kolommen	51
5.8	Eindelevensduur: Scenario's case study	52
5.9	Eindelevensduur en tweede levenscyclus: Scenario's case study	54
A.1	Jaw crusher Degetec	65
A.2	Zeefmachine Degetec	66
A.3	Trommelzeef Degetec	66
B.1	Processen SimaPro voor LCA	67
D.1	Netwerk elektriciteit door zonne-energie en windenergie in SimaPro	72
E.1	Eindelevensduur met staalimpact: Scenario's case study	73
E.2	Eindelevensduur en tweede levenscyclus met staalimpact: Scenario's case study	74

Lijst van tabellen

3.1	Betonsamenstelling voor 1 m ³ beton	24
3.2	Opsplitsing module D	26
3.3	Verbruik recyclage-installatie, volgens Degetec	28
3.4	Milieu-impact recyclage staal	30
4.1	Invloed hoeveelheid wapening	31
4.2	Machine-impact productie recyclage (D1)	34
4.3	EOL: Hoogwaardige recyclage (CASE 1) versus Storten (CASE 2)	35
4.4	Betonsamenstelling secundair beton	38
4.5	Betonsamenstelling tertiair beton	39
4.6	Productiefase: basisbeton, beton met 5% meer cement en beton met 10% meer cement	39
4.7	EOL: Hoogwaardige recyclage, laagwaardige recyclage en storten van betonpuin	41
4.8	EOL: Hoogwaardige recyclage van granulaten zonder en met hergebruik breeksand	43
4.9	Module D: Hoogwaardige recyclage van granulaten en CO ₂ -captatie	45
4.10	Module D1: Diesel, zonne-energie en windenergie	46
5.1	Betonvolume S4	48
B.1	A1-A3: Milieu-impact en transportafstanden van de productiematerialen	68
B.2	Berekening materiaalverliezen recyclageproces Degetec	69
C.1	Gegevens landbezit SimaPro	71

Afkortingen

BOF *basic oxygen furnace*, hoogoven

Ca(OH)₂ calciumhydroxide

CaCO₃ calciumcarbonaat

CaO calciumoxide

CO₂ koolstofdioxide

EAF *electric arc furnace*, vlamboogoven

EOL *end-of-life*

EOW *end-of-waste*

FE functionele eenheid

GIS *geographic information system*

GWP *global warming potential*

ITZ *interfacial transition zone*

LCA levenscyclusanalyse

LCI levenscyclusinventaris

LCIA levenscyclusimpactanalyse

NA natuurlijke aggregaten

NAC *natural aggregate concrete*

RA gerecycleerde aggregaten

RAC *recycled aggregate concrete*

TLD totale levensduur

TSMA *two-stage mixing approach*

W/C water/cementfactor

1

Inleiding

Context

Beton is een van de meest gebruikte constructiematerialen over de hele wereld, en wordt gezien als een materiaal dat resistent is tegen weersinvloeden, relatief brandveilig is en een lange levensduur kent. Het heeft zijn populariteit te danken aan de hoge druksterkte, stijfheid en verwerkbaarheid. Dit laatste leidde tot nieuwe vormelijke mogelijkheden in de constructiewereld. Een nadeel van beton is de treksterkte, die slechts 10% van de druksterkte is. Dit wordt ontkracht door een stalen wapening in het beton te gebruiken, die gekenmerkt wordt door een hoge treksterkte. Bij een correcte uitvoering is het constructiemateriaal waterdicht, waardoor het in vele toepassingen, waar ander constructiematerialen tekort komen, kan gebruikt worden zoals in kelders, sluisen, etc.

De samenstelling van cement, granulaten, water en eventueel andere toevoegingen maakt het echter de grootste verbruiker van primaire grondstoffen (Behera et al., 2014). De granulaten zijn het grootste bestanddeel van beton, namelijk 60-75% van het volume, en hebben zo een grote invloed op de eigenschappen (Kosmatka and Wilson, 2011). Daarnaast vergt het productieproces een behoorlijke hoeveelheid water. De combinatie van de CO₂-uitstoot van de productie van portlandcement en de aanzienlijke hoeveelheid nodige grondstoffen resulteert in een grote ecologische voetafdruk. De cementindustrie is dan ook verantwoordelijk voor 8% van de wereldwijde CO₂-uitstoot (Miller et al., 2018). Gezien de steeds stijgende vraag naar beton, door onder andere de populatiegroei en urbanisatie, is het vanzelfsprekend dat er meer onderzoek nodig is om er een duurzaam materiaal van te maken. Zeker omdat betonpuin één van de grootste vrijkomende afvalfracties is bij het slopen van een gebouw (Sapuay, 2016).

Om met de aanzienlijke hoeveelheid bouw- en sloopafval om te gaan, is het noodzakelijk om te definiëren wat er met het betonpuin zal gebeuren na het slopen van de constructies. Hoe materialen aan hun eindelevensduur behandeld worden, kan namelijk een beduidende milieu-impact met zich meebrengen. Storten zal het milieu extra belasten, laagwaardige recyclage zal een beperkte winst inhouden en hoogwaardige recyclage kan een voordeel impliceren. Momenteel wordt het merendeel van het betonpuin in België gerecycleerd en gebruikt in laagwaardige toepassingen zoals wegenbouw. Hierdoor wordt het gebruik van de primaire grondstoffen minimaal gereduceerd.

Onderzoek

Vandaag de dag wordt de milieu-impact van de eindelevensduur van een gebouw slechts in beperkte mate meegenomen in een levenscyclusanalyse (LCA). Hierdoor is het onmogelijk om een optimale eindelevensduurbehandeling voor te leggen op milieuvlak. Door de eindelevensduur uitvoerig te betrekken in de berekening van de milieu-impact, kunnen de voordelige scenario's voor een betonnen constructie meer naar voor geschoven worden in de maatschappij en zo uiteindelijk de norm worden. Om een oplossing te bieden aan de problematiek, wordt er onderzoek gedaan voor beton op twee niveaus. Als eerste het materiaalniveau, waarbij de milieu-impact van verschillende eindelevensduurbehandelingen wordt geschat voor één kubieke meter beton via een levenscyclusanalyse. Zo kan er een antwoord gevonden worden op volgende vragen.

- Wat is het belang om de eindelevensduur impact uitgebreid mee te nemen in de berekening van de milieu-impact van betonnen constructies?
- Zijn er methoden om het recyclageproces van beton te optimaliseren en zo de milieu-impact te verlagen?

Daarnaast zal de milieu-impact van verschillende mogelijke eindelevensduurbehandelingen bepaald worden voor een case study. Zo kan een optimaal scenario voor de eindelevensduurbehandeling van een gebouw naar voor geschoven worden. Dit kan een antwoord bieden op de vraag wat er moet gebeuren met de vele verouderde betonnen gebouwen van de jaren 60.

2

Literatuurstudie

Het volgende hoofdstuk gaat eerst in op de recyclage van beton aan de *end-of-life* (EOL) van een gebouw, inclusief de problematieken en mogelijkheden van gerecycleerde granulaten van vandaag de dag. Daarna wordt de methodiek van een LCA kort geschetst, waarin de theorie wordt toegepast op de betonfractie. Het belang van een gevoeligheidsanalyse voor de robuustheid zal ook duidelijk worden door de vele aannames die gemaakt moeten worden.

2.1 Betonfractie

Beton is één van de grootste gebruikers van primaire materialen in de constructiewereld. De milieu-impact van recyclage aan de EOL van een gebouw is dus van groot belang om de primaire consumptie te reduceren en zo ook de uitputting van de grondstoffen tegen te gaan. In dit onderdeel wordt er gekeken naar het proces, de moeilijkheden en de mogelijkheden van gerecycleerde betongranulaten. Hoewel momenteel bouw- en sloopmateriaal voornamelijk wordt gezien als afval, moet het meer beschouwd worden als een grondstof voor productie en hergebruik. Deze focusverandering kan zowel het milieu, de economie, als de gemeenschap ten goede komen.

In verschillende landen gaat het inerte bouw- en sloopafval vaak legaal of illegaal naar stortplaatsen. Storten is, afhankelijk van landschaarste, soms verboden of heeft een hoge kostprijs doordat het gepaard gaat met een hoge milieu-impact. Het laatstgenoemde kan verklaard worden door enerzijds een inname van gronden die niet meer gebruikt kunnen worden, en anderzijds mogelijke bedreigingen van omliggende grond, water en lucht. In functie van het milieurisico worden er drie categorieën van stortplaatsen onderscheiden. Betonpuin valt onder categorie 3, wat inerte afvalstoffen inhoudt. In België wordt echter het merendeel van het bouw- en sloopafval reeds gerecycleerd en gebruikt in laagwaardige toepassingen. Storten gebeurt nog zeldzaam als laatste 'oplossing', indien verbranding niet mogelijk is (OVAM, 2022).

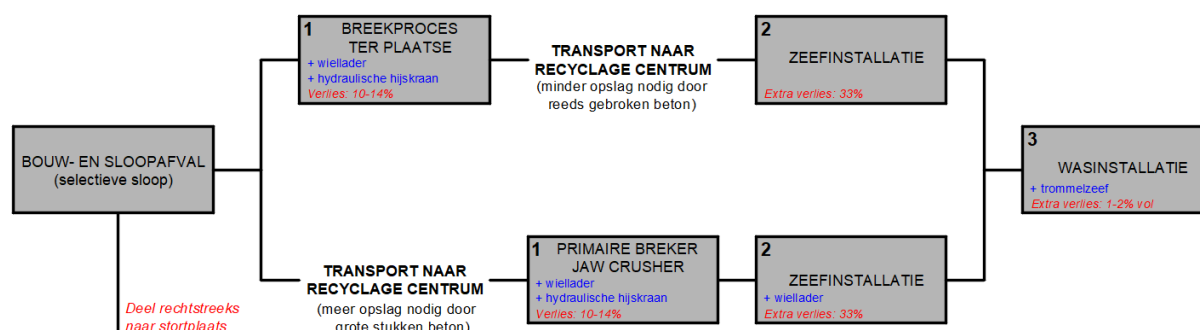
Het voordeel van hoogwaardige recyclage is dus tweeledig. Enerzijds gebruikt het de aanzienlijke hoeveelheid bouw- en sloopafval voor verder nut, wat nu al grotendeels wordt gedaan in België voor laagwaardige toepassingen. Anderzijds reduceert het de ontginning van niet-hernieuwbare primaire materialen. De hoogwaardige granulaten kunnen namelijk de natuurlijke granulaten gedeeltelijk vervangen in de productie van structureel beton, wat bij laagwaardige recyclage van betonpuin niet haalbaar is. Het gebruik van het bouw- en sloopafval in hoogwaardige toepassingen heeft dus een aanzienlijke invloed op de milieu-impact van de EOL van een gebouw.

2.1.1 Recyclageproces beton

Proces gerecycleerde granulaten

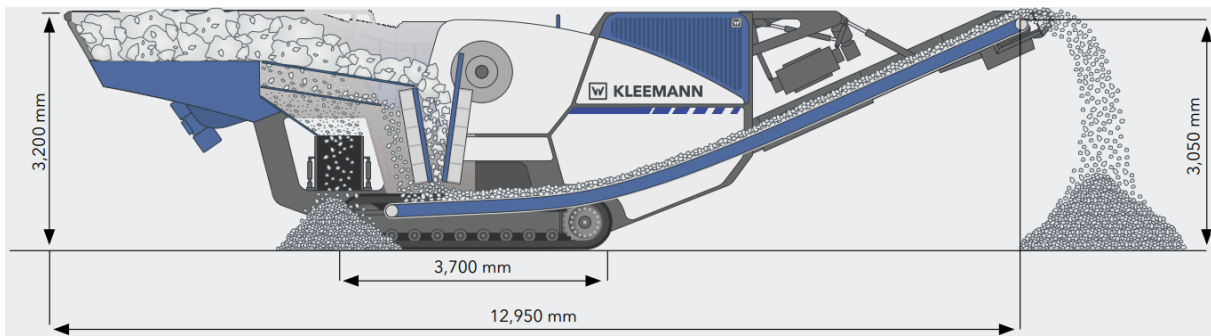
Het proces zoals hieronder beschreven, is gebaseerd op de gangbare productieprocessen bij het bedrijf 'Degetec', een betoncentrale en puinrecyclage bedrijf, gelegen in Desselgem. Het is een CO₂-neutraal bedrijf dat één van de drie eerste bedrijven in België was, die gerecycleerde A+ hoogwaardige betongranulaten produceren. Zo kunnen ze een secundair beton realiseren tot een sterkteklasse C30/37 in een omgevingsklasse EE3. Degetec is gelegen aan een waterweg waardoor, naast vrachtwagen transport, ook aan- en afvoer mogelijk is via schepen. Momenteel werken ze, naast gerecycleerde aggregaten (RA)'s, aan Eco2Polycon. Dit is een 'groen beton' waarbij het CO₂-uitstotende cement wordt vervangen door een ander gepatenteerd ecologisch bindmiddel. Dit bindmiddel waarborgt een uitzonderlijke structuur van het betonskelet, die de prestaties van het beton op verschillende vlakken verbetert.

Het productieproces van RA's is gelijkaardig aan dat van natuurlijke aggregaten (NA)'s, naast de extractiefase bij NA's. RA's vragen wel hogere kwaliteitsspecificaties op technisch vlak waardoor het proces vaak energie-intensiever is (Marinkovic et al., 2010). Afhankelijk van situatie tot situatie, kan de extra milieu-impact opgeheven worden door de voordelen van vermeden primaire productie, het niet inrekenen van de lasten door storten of verminderd transport (Jain et al., 2020). Bij laagwaardige recyclage is er beperktere vermeden primaire productie, gezien het downcycling is. Globaal gezien kan gesteld worden dat het hoogwaardig recyclen van bouw- en sloopafval de milieu-impact over de levenscyclus vermindert (Simion et al., 2013). Om meer inzicht te krijgen in de stappen van het recyclageproces wordt hieronder de procedure overlopen, waarvan een schematisch overzicht is weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Recyclageproces, volgens Degetec

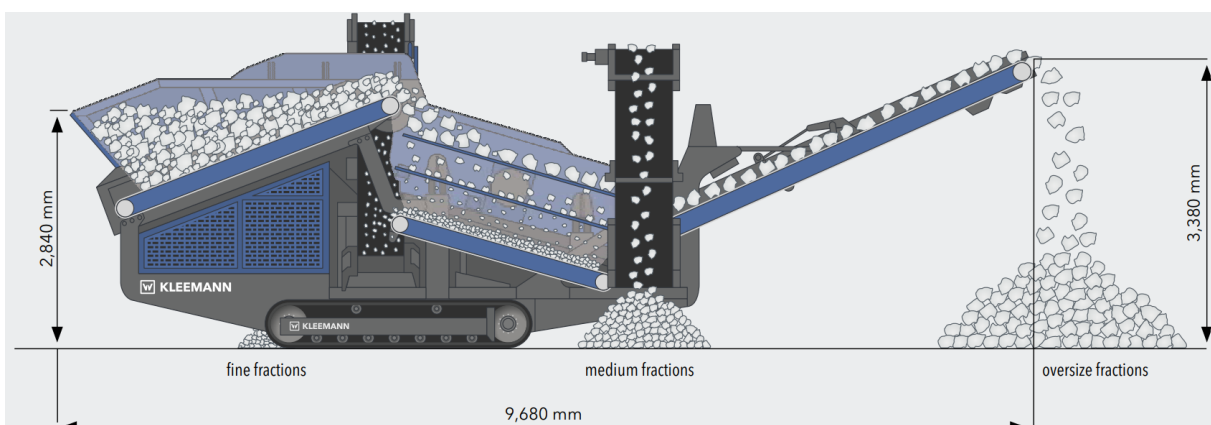
Voor het slopen, is er een inspectie op de sloopwerf conform de TRACIMAT-richtlijnen om eventuele milieuproblemen in te schatten. Na het selectief slopen van de betonnen structuur, wordt het betonpuin gebroken. Deze fase is verantwoordelijk voor de grootste milieu-impact van een recyclagecentrum (Li et al., 2020). Het breekproces kan zowel in een recyclagecentrum als op de werf plaatsvinden. Het laatstgenoemde is enkel mogelijk wanneer er voldoende ruimte op de site is, maar resulteert in een efficiënter transport door de kleinere betonstukken. In Figuur 2.2 is de werking van de Jaw Crusher MOBICAT MC 100(i) EVO voorgesteld. Het betonpuin wordt in een grote eenheid verzameld, waarna een pre-screening gebeurt via een dubbeldeks vibrerend systeem die de kleine delen eruit zeft. Hierna worden de grote stukken betonpuin door de werkelijke *Jaw Crusher* gebroken. De gebroken granulaten worden via de afvoerband, die een magnetische scheider bevat om de delen wapeningsstaal uit het betonpuin te halen, uit de breekmachine geleid (KLEEMANN, 2021b).



Figuur 2.2: Werking Jaw Crusher MOBICAT MC 100(i) EVO (KLEEMANN, 2021b) - Dit is een schematische weergave die niet helemaal overeenkomt met de machine van Degetec. Zie Bijlage A voor werkelijke foto's.

Doorgaans wordt er gebroken op een korrelgrootte van 20mm. Naast de granulaten zelf ontstaat er hierdoor ook zeefzand, dat 10-14% van het gebroken betonpuin inhoudt. Het materiaalverlies is afhankelijk van de zuiverheid van het puin en kan variëren van 8% voor naakt beton tot 16% voor baksteenpuin. Naast de breekinstallatie zijn een hydraulische hijskraan voor de aanvoer van betonpuin en een wiellader voor de stapeling van gebroken puin en het laden op de vrachtwagen noodzakelijk om het breekproces mogelijk te maken. Deze elementen zullen ook de milieu-impact van het recyclageproces beïnvloeden.

De gebroken korrels worden vervolgens naar de zeefinstallatie gebracht. Indien het breekproces ter plaatste gebeurt, worden de granulaten rechtstreeks met een vrachtwagen van de site naar de zeefinstallatie gevoerd. Wanneer het breekproces in de recyclage-installatie zelf plaatsvindt, worden de gebroken granulaten door de wiellader naar de zeef getransporteerd. Er wordt gezeefd naar fractie 6|20mm, wat commercieel wordt aangeboden als 4|20mm. De zeefinstallatie scheidt drie verschillende groottes granulaten door een dubbeldeks systeem, weergegeven in Figuur 2.3. De te grote fracties kunnen extra gebroken worden en fijne fracties zijn resterend materiaal. Dit brekerzand is één derde van de reeds gebroken granulaten dat dus verloren gaat. Technisch gezien kan het gebruikt worden in hoogwaardig beton, hoewel dit momenteel nog niet toegelaten is in de praktijk. Het verliesmateriaal wordt wel al gebruikt voor draineringen, funderingen, ophogingen, aanvullingen, etc., wat gezien kan worden als laagwaardige recyclage (OVAM and WTCB, 2018).



Figuur 2.3: Werking Screener MOBISCREEN MS 12 Z (KLEEMANN, 2021c) - Dit is een schematische weergave die niet helemaal overeenkomt met de machine van Degetec. Zie Bijlage A voor werkelijke foto's.

2 Literatuurstudie

Een derde en laatste stap in het recyclageproces is de wasinstallatie. Hierin worden de onzuiverheden eruit gewassen om zo een hoogwaardig betongranulaat te kunnen waarborgen. Deze stap is dus niet noodzakelijk bij laagwaardige granulaten. Voor de wasinstallatie, gaan de gebroken granulaten door een trommelzeef, Figuur 2.4. Deze machine zorgt voor een voorafzeving, die het grootste vuil al afsplitst. Zo wordt de wasinstallatie minder zwaar belast en vermindert het risico dat de machine vastloopt. De granulaten gaan daarna naar de wasinstallatie, waarin vijf motoren het geheel in werking houden. In tegenstelling tot de andere machines, werkt de wasinstallatie op hernieuwbare energie, met name wind- en zonne-energie.



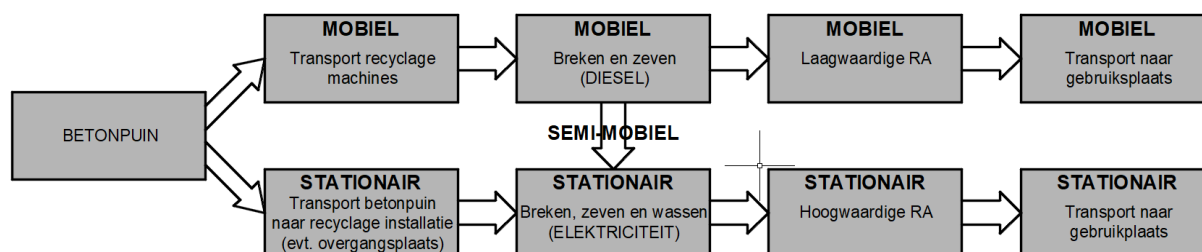
Figuur 2.4: Werking Trommelzeef PHOENIX 1600T (Terex, 2020) - Dit is een schematische weergave die niet helemaal overeenkomt met de machine van Degetec. Zie Bijlage A voor werkelijke foto's.

Aangezien een betoncentrale een nullozerstatuut moet hebben, wordt het nodige waswater steeds hergebruikt voor onder andere het kuisen van de machines (van den Broek, 2018). Een deel van het waswater zal echter in de betongranulaten blijven. Om het effect van het wassen te garanderen, mag deze fase niet te snel gebeuren en moeten de granulaten een bepaalde grofheid hebben. Zo wordt er gemiddeld 1 à 2 volumepercent andere materialen (hout, plastic, etc.) uitgewassen. Na de wasinstallatie worden de RA's verder getransporteerd naar de betoncentrales. De materiaalverliezen in elke fase, resulteren in een totaal verlies van ongeveer 40% volgens Degetec, wat overeenkomt met de literatuur (Nagataki et al., 2004).

Mobiele en stationaire recyclage-installaties

Op basis van waar het productieproces van RA's plaatsvindt, kunnen verschillende soorten recyclage-installaties onderscheiden worden. De twee hoofdcategorieën zijn stationaire en mobiele processen. Een combinatie van beide, namelijk semi-mobiele recyclage, is ook mogelijk. Hierbij gebeurt het breekproces ter plaatse waardoor het transport naar de recyclage-installatie efficiënter is door de kleinere brokstukken. In Figuur 2.5 is een overzicht weergegeven van de drie categorieën. Voor het betonpuin getransporteerd wordt naar de stationaire recyclage-installatie, kan er nog een extra tussenstap zijn, namelijk een doorschuifinstallatie. Hierbij wordt het bouw- en sloopafval voor een bepaalde periode gestockeerd om later te transporteren naar het recyclagecentrum. Dit brengt een extra transport impact met zich mee en wordt meestal niet aangeraden tenzij het de enige manier is om storten te voorkomen bij een op dat moment beperkte vraag (Ram et al., 2020).

Een stationair proces wordt meestal aanbevolen aangezien deze uitgerust is met beter presterende technieken waardoor het een hogere kwaliteit van RA's kan garanderen. Gezien de wasinstallatie doorgaans niet verplaatst wordt, is het uitwassen van onzuiverheden enkel mogelijk bij een stationair proces. Een ander opmerkelijk verschil is het type energiegebruik in de categorieën. Mobiele installaties werken voornamelijk op diesel, waarbij de motor gekenmerkt wordt door een lagere efficiëntie. Bij stationaire installaties wordt er meer gebruik gemaakt van elektriciteit, wat globaal gezien resulteert in een lagere milieu-impact. Bij Degetec werken de breek- en zeefinstallaties echter wel nog op diesel.



Figuur 2.5: Proces mobiele en stationaire recyclage

Ook al brengen stationaire centra verschillende voordelen op technologisch vlak met zich mee, toch zijn mobiele installaties wereldwijd het meest gebruikt vanwege het economisch perspectief (Borghi et al., 2018). Ook worden ze op milieuvlak naar voor geschoven in studies, aangezien bewezen is dat de diesel consumerende mobiele installaties minder uitstoot hebben dan de elektrische stationaire installaties (Vossberg et al., 2014). Hierbij moet er rekening gehouden worden met het feit dat mobiele installaties eenvoudigere technieken gebruiken, wat logischerwijs resulteert in een lager verbruik en dus ook een lagere milieu-impact. Eenduidig zeggen dat het gebruik van mobiele installaties naast op economisch vlak ook wint op ecologisch vlak is een moeilijke kwestie gezien de bekomen kwaliteit van de RA's ook een rol speelt.

Het ecologisch versus economische debat van mobiele en stationaire recyclage-installaties is dus een niet zo eenvoudige kwestie. Alom kan er geconcludeerd worden dat stationaire installaties de hoogste kwaliteitsgarantie bieden door de meer geavanceerde en dus meer energetische technieken. Dit is nodig voor een hoogwaardige productie om zo de impact van primaire productie te reduceren en downcycling tegen te gaan.

2.1.2 Problematieken en aandachtspunten

Selectieve sloop

Om hoogwaardige betongranulaten te produceren is een eerste aandachtspunt gerelateerd aan de acceptatie van een project en de sloop ervan. Een betonsoort met een sterkteklasse lager dan C25/30 maakt de productie van een hoogwaardig granulaat onmogelijk, net zoals wanneer de sloop niet selectief genoeg gebeurt. De sterkte wordt niet-destructief gecontroleerd met behulp van een sclerometer. Selectief slopen is tijdrovend en dus duurder dan traditioneel slopen, maar is vandaag de dag verplicht (Bergmans et al., 2017). Gevaarlijke afvalstoffen zoals asbest moeten eerst verwijderd worden, waarna verschillende materiaalstromen worden gesorteerd. De graad van selectief slopen is afhankelijk van project tot project, maar hoe zuiverder er gebroken wordt, hoe groter de kans dat het hoogwaardig gerecycleerd kan worden. Heterogeen afval zal zorgen voor een lagere kwaliteit door de onzuiverheden en residuen van verschillende materialen. (cfr. baksteen, tegels, hout, glas, metaal, plastic, etc.)

Kwaliteit

Naarmate de kwaliteit van de RA worden in de literatuur type 'A', 'B', en 'C' geclassificeerd, respectievelijk de hoge kwaliteit RA's voor betonproductie en wegefunderingen, middelmatige kwaliteit RA's voor wegenwerken en lage kwaliteit RA's voor sanering van uitgeputte steengroeven en stortplaatsen (Borghi et al., 2018; Blengini and Garbarino, 2010). Door de nodige

2 Literatuurstudie

precisie om aan type 'A' te voldoen, worden meestal enkel type 'B' en 'C' behaald. Hierdoor levert het aandeel vermeden primaire materialen bijna geen milieuvoordeel op ten gevolge van downcycling.

Welke soort recyclage-installatie wordt toegepast, speelt een rol op de kwaliteit van de RA's. Zo kan type A, wat gebruikt kan worden in structureel beton, enkel gerealiseerd worden in een stationair recyclageproces door enerzijds de nodige technische specificaties en anderzijds de niet-verplaatsbare wasinstallatie. Mobiele recyclagecentra leiden aldus tot lage kwaliteit granulaten (Blengini and Garbarino, 2010).

Transport

Traditioneel gezien draagt transport relatief beperkt bij tot de milieu-impact. Het transport van betonpuin en RA's kan echter een aanzienlijkere impact hebben op het milieu door zijn grote gewicht. Om de milieu-impact van het transport volledig te betrekken, wordt zowel het transport om de materialen op hun nodige locatie te krijgen, als de terugritten ervan bekeken.

De voornaamste moeilijkheid om transportafstanden te bepalen is de onzekerheid per site. De af te leggen afstanden zijn afhankelijk van hoeveel recyclage-installaties er in een bepaalde regio zijn en zijn dus uiterst site-specifiek. De afstanden kunnen zelf bepaald worden, of meer gedetailleerd via *geographic information system* (GIS). Grote afstanden voor NA's in vergelijking met RA's zullen resulteren in een grotere milieu-impact voor de productie van NA. Dit kan becijferd worden door de transportratio van NA en RA (Marinkovic et al., 2010). Het is echter complex om te voorspellen waar er in de toekomst recyclage-installaties zullen zijn, hoe de connecties van wegen zullen evolueren en welk transportmiddel gebruikt zal worden.

Daarnaast kan de transport impact beïnvloed worden, afhankelijk van hoe het recyclageproces verloopt. Een breekproces ter plaatse zal zorgen voor een efficiënter transport naar de recyclage-installatie door de kleinere betonstukken. Verder zal een proces met een 'directe' of een 'indirecte' stroom ook een aanzienlijke milieu-invloed hebben. Hierbij wordt respectievelijk het bouw- en sloopaafval rechtstreeks naar de recyclage-installatie gevoerd of tijdelijk opgeslagen voor later vervoer (Borghini et al., 2018).

Qua transportmiddel is een vrachtwagen het meest voorkomende, hoewel het transport ook via een waterweg kan verlopen. Dit is echter niet altijd evident aangezien zowel de werf als de recyclage-installatie aan het water gelegen moeten zijn. Hierdoor wordt dubbele logistiek vermeden door geen extra vrachtwagens tussen de werf en het schip of het schip en het recyclageproces. Er moet rekening gehouden worden met extra machines voor de afvoer van het product, waardoor het transport via de waterweg pas rendabel zal zijn bij grote transportafstanden.

Fysische en mechanische eigenschappen

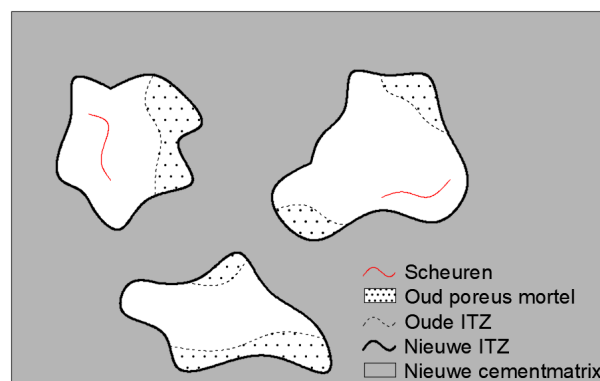
Naast de algemene principes van RA's is het nodig om meer in te gaan op de fysische en mechanische eigenschappen. RA's worden gemaakt uit gebroken primair beton, waardoor het een combinatie is van natuurlijke grove granulaten en aangehechte mortel, bestaande uit fijne granulaten en cement. De eigenschappen van het originele beton spelen dus automatisch een rol bij de kwaliteit van RA's, hoewel deze invloed bij minderwaardig beton minder toonaangevend is (Hansen and Narud, 1983). De druksterkte van het secundaire beton is echter niet gelimiteerd tot de oorspronkelijke sterkte van het verbrijzelde beton (Rahal, 2007).

2 Literatuurstudie

De hoeveelheid aangehechte mortel aan de granulaten kan sterk variëren in functie van de afmetingen van de primaire granulaten en kan 30-60% van het RA volume zijn (Hansen and Narud, 1983). De hoge percentages komen voornamelijk voor bij fijnere granulaten waardoor algemeen een volume van 30-35% oud cement kan aangenomen worden (Poon et al., 2004). De oude mortel is de hoofdoorzaak van de mindere kwaliteit van RA's. Deze zorgt voor een algemene lagere densiteit en sterkte, maar ook voor een hogere porositeit, doordringbaarheid en waterabsorptie (Casuccio et al., 2008). Daarnaast is de resterende mortel verantwoordelijk voor een rondere vorm van de RA's en dus een verbeterde verwerkbaarheid, aangezien de mortel de meer hoekige primaire granulaten als het ware opvult (Sagoe-Crentsil et al., 2001).

De grotere doordringbaarheid resulteert logischerwijs in een hogere carbonatatie- en chloride-indringing doorheen de tijd, aangezien chemische stoffen makkelijker kunnen binnendringen in *recycled aggregate concrete* (RAC) (Otsuki et al., 2003). Daarnaast treedt er door het hoge waterabsorberende vermogen makkelijker krimp op bij droging van de betonspecie (Kou and Poon, 2012). Tijdens het recyclageproces vormen zich transversale scheuren in de RA's waardoor, in combinatie met de oude zwakke poreuze mortel, de RA's doorgaans minder weerstand bieden tegen mechanische acties.

De overgangszone tussen de granulaten en de cementmatrix wordt de *interfacial transition zone* (ITZ) genoemd en verzekert dat de materialen samenwerken in het beton. Deze verbinding wordt gezien als het zwakste punt in een betonnen structuur en zal dus de sterkte limiteren. Bij RAC is er naast de nieuwe ITZ tussen de RA's en het cement, een tweede oude ITZ, die schematisch is weergegeven in Figuur 2.6. De elasticiteitsmodulus van de oude ITZ is doorgaans lager (Xiao et al., 2013). Het nieuwe cement dat aan de granulaten (NA of RA) wordt verbonden, zal de karakteristieken van de ITZ eenduidig bepalen, en wordt dus niet beïnvloed door de karakteristieken van de aangehechte mortel bij de RA's (Otsuki et al., 2003).



Figuur 2.6: Structuur RAC

Om de mindere kwaliteit van RA's te reduceren, is er meer cement nodig in een RAC ten opzichte van primair beton (Fraj and Rachida, 2017). Het gaat om een toename van ongeveer 5%, wat de milieu-impact van RAC doet stijgen door de hoge CO₂-uitstoot van de cementproductie. De verhoging resulteert in een lagere water/cementfactor (W/C) voor RAC maar zorgt voor een gelijkaardige druksterkte als *natural aggregate concrete* (NAC). Daarentegen hebben RA's een hogere waterabsorptie, waardoor extra water nodig is om de granulaten te verzadigen voor een goede verwerkbaarheid, wat gemiddeld 5% meer is (Marinkovic et al., 2010; Hansen and Narud, 1983). Om het watergehalte te verminderen worden dikwijls chemische hulpstoffen toegevoegd zoals superplastificeerders. Het laatstgenoemde zal de verwerkbaarheid positief beïnvloeden door tensio-actieve stoffen die de oppervlaktespanning veranderen en het samenvlokken voorkomen (Grünwald, 2020).

2 Literatuurstudie

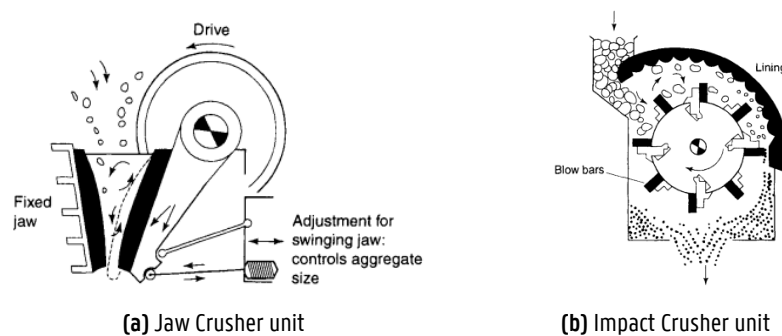
Door het bovengenoemde is er dus een gelimiteerde hoeveel NA's kunnen vervangen worden door RA's om hoogwaardig beton te kunnen produceren. Deze grenswaarde is de vervangingscoëfficiënt en is afhankelijk van de omgevingsklasse. Voor de klasse EE3, waarbij het beton wordt blootgesteld aan vorst en regen, wordt de vervanging voor hoogwaardige toepassingen gelimiteerd tot 20% (ISO, 2012a). Zelf voor minderwaardige toepassingen is een maximale vervanging van 40% toegelaten. Indien een percentage van 100% RA mogelijk was, zou het echter niet rendabel zijn door de hogere nodige technische specificaties (Ghanbari et al., 2017).

Naast limieten op vlak van vervangingspercentages, zijn er ook beperkte toepassingsgebieden. Hoge-sterkte beton en beton in een agressieve omgeving, gedeeltelijk gemaakt van RA's, moeten vermeden worden wegens respectievelijk de lagere sterkte en grotere doordringbaarheid. Daarnaast zorgen fijne RA's voor een extra waterabsorptie en cohesie waardoor deze ook afgeraden worden (Marinkovic et al., 2010). Algemeen heeft het gebruik van RA's een negatieve impact op de levensduur. Deze is namelijk 9% korter voor een RAC. De levensduur wordt echter meer beïnvloed door de betondekking en de omgevingsklassen, waar dus extra aandacht naartoe moet gaan (Neves and de Brito, 2022).

2.1.3 Optimalisatie

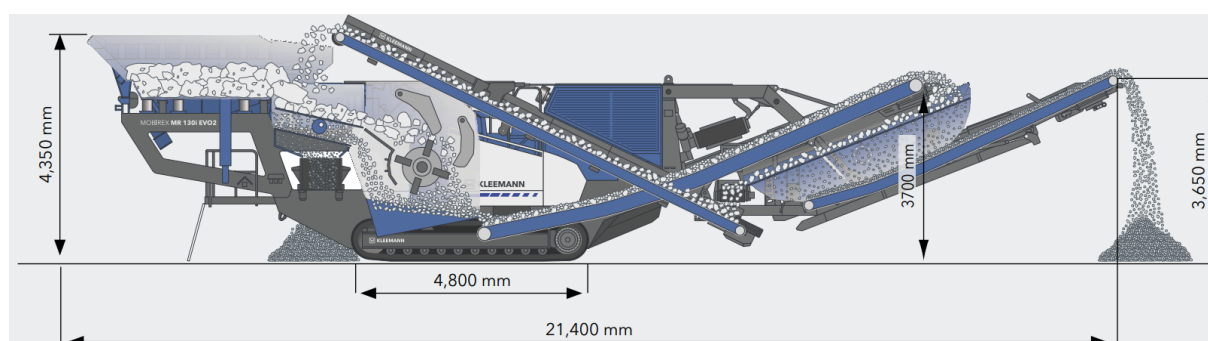
Verschillende brekers

Momenteel gebeurt het breekproces van Degetec enkel door middel van een primaire breker, namelijk de *Jaw Crusher*. Deze is gunstig voor het breken van grote stukken betonpuin. Er bestaan echter verschillende brekers, die elk andere voor- en nadelen hebben voor de eigenschappen van de RA's (Sims and Brown, 1998). Een populaire secundaire breker is de *Impact Crusher*. Deze realiseert granulaten met een verbeterde kwaliteit en densiteit door delen resterende mortel eraf te breken (Matias et al., 2013; Etxeberria et al., 2007). De werking van beide crushers is schematisch voorgesteld in Figuur 2.7.



Figuur 2.7: Werking verschillende brekers (Sims and Brown, 1998)

De *Impact Crusher* werkt volgens dezelfde principes als de *Jaw Crusher* (Figuur 2.2), waarbij een pre-screening gebeurt door een dubbeldeks vibrerende band en na het breken een magnetische scheider het resterende wapeningsstaal eruit haalt. Na de afvoerband is er echter een tweede screening waardoor de te grote stukken extra gebroken worden. De werking van het geheel is weergegeven in Figuur 2.8 (KLEEMANN, 2021a). Een bijkomende breker zal de milieu-impact van het recyclageproces logischerwijs verhogen, maar door de optimalisatie van de RA's kan het eventueel hogere vervangingspercentages waarborgen in de toekomst.



Figuur 2.8: Werking Impact Crusher MOBIREX MR 130(i) EVO2 (KLEEMANN, 2021a)

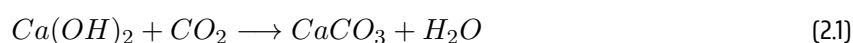
Gebruik brekerzand

Gedurende het recyclageproces zijn er op verschillende ogenblikken materiaalverliezen. Deze resten worden momenteel deels gebruikt in laagwaardige toepassingen en deels gedumpt op stortplaatsen. In tegenstelling tot in Nederland is het hoogwaardig gebruik ervan in beton nog niet toegelaten. Dit verbod is te wijten aan verschillende problemen. Het brekerzand is namelijk afkomstig van het bouw- en sloopafval waardoor het schadelijke bestanddelen zoals organische materialen kan bevatten, die de binding met cement belemmeren. Hierdoor vraagt het onder andere meer CO_2 -uitstotend cement in de productie. Daarnaast is het waterabsorberend gedrag onvoorspelbaar waardoor de W/C niet exact bepaald kan worden. Een groter aandeel brekerzand zal ook zorgen voor een verhoogde krimp wat een vermindering van de sterkte-eigenschappen met zich meebrengt (Vrijders and Desmyter, 2008).

Indien het echter wel toegelaten wordt, komt dit het milieu ten goede door enerzijds minder afval en anderzijds vermeden primaire materialen. Het brekerzand in de praktijk toepassen brengt namelijk bijna geen extra lasten met zich mee tijdens de productie, hoewel er wel enkele voordelen aan gekoppeld zijn.

Koolstofdioxide-captatie via carbonatatie

Carbonatatie is een chemisch proces waarbij CO_2 indringt in het beton en reageert met het hydratatieproduct calciumhydroxide ($Ca(OH)_2$). Het laatstgenoemde is het reactieproduct van calciumoxide (CaO) in het cement en H_2O . Volgende formule geeft de chemische reactie van carbonatatie weer (Grünewald, 2020).



De reactieproducten zijn water en calciumcarbonaat ($CaCO_3$). Het laatstgenoemde is een neerslagproduct met een groter volume dan het oorspronkelijke hydratatieproduct $Ca(OH)_2$. Hierdoor vult $CaCO_3$ de poriën wat resulteert in een grotere dichtheid en een lagere waterabsorptie (Zhang et al., 2015). De mindere mechanische eigenschappen, voornamelijk te wijten aan resterende mortel aan RA's, kunnen aldus door het carbonatatieproces positief beïnvloed worden (Gholizadeh-Vayghan et al., 2020).

2 Literatuurstudie

Daarnaast zijn er ook voordelen op milieuvlak gezien de reactie CO_2 uit de lucht haalt. Deze CO_2 -captatie kan gedeeltelijk de hoge CO_2 -uitstoot van de productie van beton compenseren. Gedurende de levensduur van een constructie is de carbonatatie echter beperkt gezien slechts een klein deel, namelijk het oppervlak, wordt blootgesteld aan de lucht. Andere diepergelegen delen zullen geen spoor hebben van deze chemische reactie omdat de carbonatatediepte niet tot daar reikt.

Om de voordelen van carbonatatie volop te benutten kan na de sloop het betonpuin opzettelijk uitgespreid worden voor extra blootstelling aan de lucht. De opgenomen CO_2 blijft in het betonpuin opgeslagen, tenzij het wordt verwarmd. 43% van de CO_2 -uitstoot van de wereldwijde cementproductie kan terug worden geabsorbeerd en opgeslagen door de carbonatatie van cementbevattende materialen (Xi et al., 2016). De toename van gecarbonateerd beton is dus voordelig voor het milieu door de extra CO_2 -captatie, wat voornamelijk de *global warming potential* (GWP) zal beïnvloeden (Courard et al., 2015).

Naast de verschillende voordelen van carbonatatie, brengt deze reactie ook een nadelig effect met zich mee. De reductie van de hydratatieproducten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zal namelijk de pH-waarde van de poriënvloeistof in het beton doen dalen waardoor de passivatielaag rond het staal wordt afgebroken. Eenmaal het staal gedepasseerd is, ontstaat er risico voor corrosie in aanwezigheid van vocht en zuurstof. Deze optimalisatietechniek kan dus niet toegepast worden voor constructies waarbij de wapening kritisch is.

Elektriciteit versus diesel

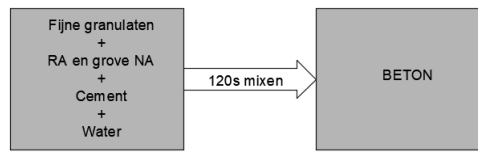
Globaal gezien kan er gesteld worden dat diesel voornamelijk wordt gebruikt bij ontginning en transport, en elektriciteit bij het breek- en zeefproces (Ghanbari et al., 2017). Bij het onderzochte proces van Degetec werken echter alle machines, behalve de wasinstallatie, op diesel. Door het gebruik van elektriciteit meer te overwegen, is het mogelijk om de milieu-impact te reduceren door de lagere CO_2 -uitstoot.

Verbetering eigenschappen

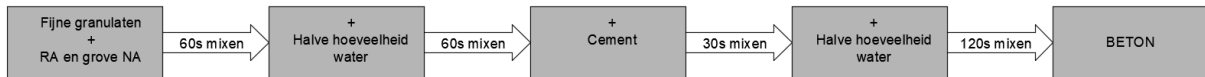
Verschillende onderzoekers hebben studies verricht naar de optimalisatie van het recyclageproces met als doel de eigenschappen van RA's te verbeteren. Hieronder worden enkele mogelijkheden opgesomd.

Granulaten bevochtigen: Zoals reeds vermeld hebben RA's een aanzienlijk hogere waterabsorptie door de resterende mortel. Dit probleem kan aan de kant geschoven worden door de grove RA's te bevochtigen zodat deze geen water van de plastische betonspecie absorberen. Dit principe zorgt ervoor dat de verwerkbaarheid en W/C controleerbaar zijn (Etxeberria et al., 2007).

Twee fasen mixen: Een tweede mogelijke aanpassing kan zich voordoen tijdens het mengen van de onderdelen van beton. In Figuur 2.9a is de normale mixtechniek weergegeven, en in Figuur 2.9b een twee-fasen mengtechniek, ook wel *two-stage mixing approach* (TSMA) genoemd. Dit laatste voegt op twee verschillende momenten het nodige water toe. In de eerste fase komt er een dunne laag cementpasta op de RA's die doordringt in de poreuze mortel en de aanwezige scheuren en poriën vult. De tweede fase zorgt voor de werkelijke betonspecie. Door deze nieuwe mengtechniek, wordt het zwakste gedeelte van RAC, namelijk de ITZ, sterker waardoor de sterkte van het beton verhoogt (Tam et al., 2005).



(a) Normaal mengproces beton



(b) Twee fasen mengproces beton

Figuur 2.9: Mogelijke mengprocessen beton - In Figuur 2.9a worden alle materialen samen gemengd. Figuur 2.9b stelt een langer proces voor waarbij het water op twee verschillende momenten wordt toegevoegd.

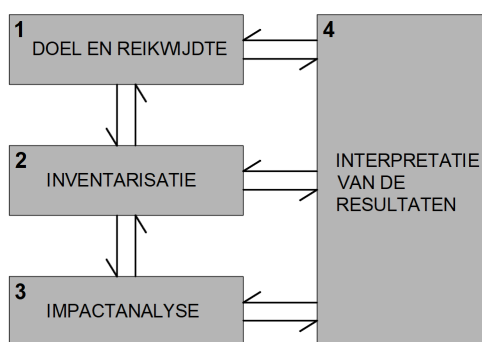
Toevoeging van vliegas: Een derde verbeteringstechniek is de gedeeltelijke vervanging van cement door vliegas. Deze toevoeging verbetert alle verminderde mechanische eigenschappen van RA's, met uitzondering van de carbonatatie diepte. Hierdoor verbetert dus de algemene duurzaamheid van RAC. Daarnaast is vliegas ook een betere optie op zowel milieu- als economisch vlak door de verminderde productie van cement (Kou and Poon, 2012). In België is dit echter geen oplossing gezien er geen met kolen gestookte elektriciteitscentrales meer zijn.

2.2 Levenscyclusanalyse

Om de milieu-impact te kunnen kwantificeren is het nodig om te kijken naar de algemene methodiek van een LCA. De Europese Standaard EN 15804 geeft een methodologisch kader, waarbij nog heel wat beslissingen genomen moeten worden (ISO, 2012d). In dit onderdeel zal uitgebreider ingegaan worden op hoe de milieu-impact van de eindelevensduur wordt bepaald.

2.2.1 Methode en levenscyclusfasen

LCA is een methode die de milieu-impact van een product, element of gebouw kan kwantificeren aan de hand van zijn volledige levenscyclus. Hierbij wordt elke betreffende levenscyclusfase in rekening gebracht, waardoor de integrale milieu-impact van een gebouw geschat kan worden. Deze analyse gebeurt volgens de Europese Standaard EN 14040 in vier stappen, die zijn weergegeven in Figuur 2.10 (ISO, 2006).



Figuur 2.10: Vier stappen van LCA zoals gedefinieerd in ISO 14040

1. Doel en reikwijdte

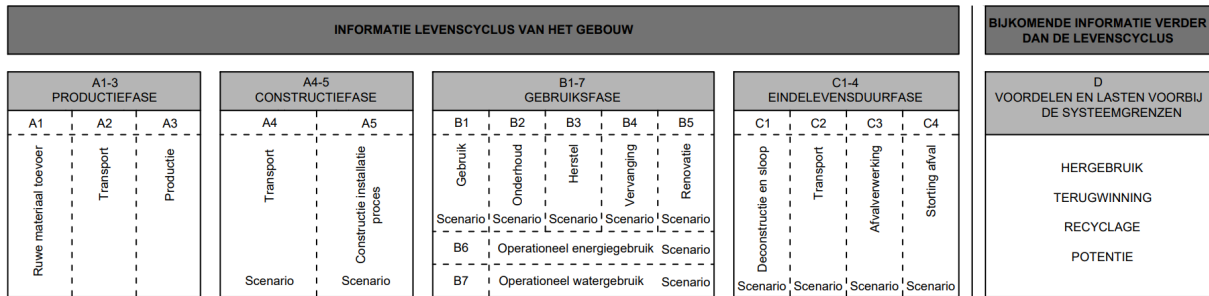
In het eerste deel van een LCA worden het doel (waarom, voor wie, etc.) en de reikwijdte (welke levenscyclusfasen) van de studie gedefinieerd. Een belangrijke stap binnen deze fase is de keuze van de functionele eenheid (FE), die zal bepalen wat er geanalyseerd wordt. Dit kan onder andere een kubieke meter beton zijn met een sterkte C25/30 en een bepaalde betonsamenstelling. De eenheid, hoeveelheid en soort materiaal van de FE is afhankelijk van wat de studie wil bereiken en waar de focus ligt, zoals op stabiliteit, thermische prestatie, etc.

In een LCA worden er vaak vergelijkingen gemaakt tussen materialen, processen, etc. waardoor de keuze van een referentie-eenheid essentieel is om op een objectieve manier de mogelijkheden naast elkaar te leggen en zo ook de unit te optimaliseren (Janssen et al., 2013). Op deze manier kunnen de verschillende scenario's van de eindelevensduurbehandeling van beton nagegaan en vergeleken worden. Naast de FE moet de totale levensduur (TLD) van de betonstructuur worden bepaald. De opgelegde TLD kan verschillen naar gelang het doel van het onderzoek. Aangezien een betonnen constructie doorgaans een lange levensduur kent zonder nodige vervangingen, en levensduur van RAC slechts minimaal verschilt van NAC, zal deze aanname minder bepalend zijn voor een LCA van beton (Neves and de Brito, 2022).

Een tweede keuze betreft de reikwijdte van de studie of, met andere woorden, welke levensfasen van de cyclus meegenomen worden in de LCA. Volgens EN 15804 (ISO, 2012d) kan de levenscyclus van een gebouwelement onderverdeeld worden in

2 Literatuurstudie

modules, waarvan Figuur 2.11 een overzicht geeft. Deze opsplitsing wordt niet door alle LCA standaarden gebruikt, maar is eigen aan de standaarden rond de milieu-impact van bouwproducten en gebouwen. Er worden vier modules onderscheiden, benoemd door de letters A, B, C en D, waarbij module A de productie van de materialen en de constructie omvat, module B het gebruik over de levensduur van het gebouw, inclusief het operationele energiegebruik, module C de eindelevensduur en module D voordelen en lasten ten gevolge van energierecuperatie, hergebruik en recyclage van materialen.



Figuur 2.11: Levenscyclusfasen en systeemgrenzen LCA zoals gedefinieerd in EN 15084 en EN 15978

2. Inventarisatie

In de tweede fase van een LCA, wordt een levenscyclusinventaris (LCI) gemaakt van alle inputstromen, met name verbruik van primaire grondstoffen, energie, hulpbronnen en land, en alle outputstromen, met name emissies naar bodem, lucht en water, productie van afval, gewijzigd landschap en bijproducten (Janssen et al., 2013). Hulpmaterialen, zoals water, staal voor onderhoud van machines, lijm, etc. kunnen hier ook in rekening worden gebracht afhankelijk van de veronderstelde graad van detaillering van de studie (Fořt and Āerný, 2020). Bij een vergelijking waarbij de detailleringen identiek zijn, is het overbodig om deze mee te nemen omdat het verschil in milieu-impact niet zal beïnvloed worden. De materiaalhoeveelheden worden aangenomen om aan de FE te voldoen, waarin dus al eventuele vervangingen doorheen de TLD zitten.

3. Impactanalyse

De levenscyclusimpactanalyse (LCIA) gebruikt de in- en outputs van de inventaris om de potentiële milieulasten en -voordelen te kwantificeren aan de hand van impactcategorieën en -indicatoren. De overgang van de verworven data naar de impactanalyse is altijd een gevoelige en subjectieve stap in LCA. Er moeten namelijk keuzes gemaakt worden welke impactcategorieën het belangrijkste zijn. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen middelpuntcategorieën en eindpuntcategorieën. Het eerste focust zich op de oorzaak van de impact, bijvoorbeeld *GWP* wat een belangrijke impactcategorie is bij beton door de hoge CO₂-uitstoot van de productie. Eindpuntcategorieën betreffen meer de gevolgen, bijvoorbeeld *Human Health* wat dus de schade aan de menselijke gezondheid impliceert.



Figuur 2.12: Stappen LCIA, gebaseerd op EN 14040 (ISO, 2006).

In Figuur 2.12 is een overzicht te zien van de verschillende stappen van een LCIA. Na de keuze van welke impactcategorieën belangrijk zijn in de studie, worden de resultaten van LCI, met name grondstoffen, uitstoot en afval toegewezen aan deze categorieën. Hierna worden de resultaten van de indicatoren berekend door karakterisatiefactoren. Deze factoren bekijken voornamelijk regionale en globale lasten en negeren dus site-specifieke aspecten, waardoor er kritisch naar de resultaten moet gekeken worden (Blengini and Garbarino, 2010).

Normalisering, groepering en weging zijn optionele stappen in een LCIA en maken vergelijkingen tussen de individuele impactcategorieën haalbaar. Een globale vergelijking is mogelijk via een ééngetalscore, hierin zitten alle impactcategorieën vevat. Hoewel dit een globaal overzicht geeft in een vergelijking, moet de interpretatie ervan aandachtig gebeuren. Er moeten namelijk subjectieve aannames gemaakt worden om de milieu-impact in één getal uit te drukken. Hierdoor kan er belangrijke informatie verloren gaan.

4. Interpretatie van de resultaten

Een laatste stap is het interpreteren van de resultaten. Hierin wordt een antwoord gegeven op het vooropgestelde doel van de studie. Door het gebruik van een FE kunnen de resultaten vergeleken worden, mits de nodige reflecties in verband met volledigheid, aannames, etc.

2.2.2 Eindelevensduurbehandeling

Module C en D omvatten de EOL van een gebouw, waarbij zowel sloop, afvalverwerking, storten en verbranding (module C) als hergebruik, energieretrouwning door verbranding en recyclage (module D) worden geplaatst. In de praktijk worden deze twee modules nog te vaak buiten beschouwing gelaten, aangezien de toekomstige behandeling van een gebouw moeilijk vooraf te bepalen is. Door de tegenwoordige problemen in verband met klimaatopwarming, grondstofschaarste, etc. is het van belang om deze modules te betrekken in een LCA om zo de milieu-impact ervan te kwantificeren. Door het verschil in milieu-impact te onderzoeken tussen bijvoorbeeld hoogwaardige recyclage en storten, kan het hergebruik van materialen meer gestimuleerd worden.

Module C

Wanneer een element of gebouw wordt vervangen, ontmanteld of gesloopt en zijn functionaliteit dus stopt, begint de EOL ervan. Alle outputstromen van het gebouw worden eerst beschouwd als afval. Hieronder vallen naast de constructiematerialen zelf ook het afval gevormd door onderhoud, herstellingen en vervangingen gedurende de TLD. Er zijn vier submodules te onderscheiden in module C, die allemaal verplicht mee te nemen zijn volgens de Europese Standaarden NBN 15804. De eerste fase, C1, houdt rekening met de lasten tijdens de deconstructie en sloop van het gebouw waarbij ook de materialen gesorteerd worden, waarna C2 de transport impact naar de recyclage-installatie of stortplaats incalculeert. Onder C3 valt de verwerking van afval bedoeld voor hergebruik, terugwinning en recyclage. De laatste levenscyclusfase, C4, becijfert de impact van storten waarbij al dan niet een voorbehandeling nodig is (ISO, 2012d). Bij verbranding van materialen worden de milieulasten van het verbrandingsproces ook bij module C4 toegekend wanneer de efficiëntie van de energieretrouwning kleiner is dan 60% (Delem and Wastiels, 2019a).

Module D

Module D is de vierde en laatste levenscyclusfase die in 2019 als verplicht is opgenomen in de Europese standaarden, samen met module A1-A3 en module C1-C4 (ISO, 2012d). Deze module laat toe om de lasten en voordelen van recyclage, hergebruik en energieretugwinning naar de outputzijde van de eerste levenscyclus te schuiven, maar valt eigenlijk buiten de systeemgrenzen volgens EN 18405 (ISO, 2012d). De voordelen van energierecuperatie ten gevolge van een vermeden warmte- en energieproductie worden in deze module meegenomen wanneer de efficiëntie hoger is dan 60%, zoniet valt het onder C4 (ISO, 2012c). Module D is dus een methodologisch zeer complexe module, waarin verschillende milieuvordelen en -lasten vervat zitten. Formule 2.2 geeft weer welke delen er onder module D worden gebracht (ISO, 2012d). Deze algemene formule brengt alle lasten en voordelen voorbij de systeemgrenzen in rekening.

$$e_{module D} = e_{module D1} + e_{module D2} + e_{module D3} + e_{module D4} \quad (2.2)$$

Met

- $e_{module D1}$: De lasten en voordelen door recyclage van materialen.
- $e_{module D2}$: De lasten en voordelen door recyclage van brandstoffen.
- $e_{module D3}$: Het gebruik van energie ten gevolge van verbranding.
- $e_{module D4}$: Het gebruik van energie ten gevolge van storten.

Gezien deze thesis zich focust op recyclage van materialen, wordt enkel $e_{module D1}$ beschouwd. Dit onderdeel wordt hieronder verder gedefinieerd volgens EN 15804 (ISO, 2012d). Alle lasten en voordelen van recyclage van materialen worden in de formule meegenomen. Hierbij worden dus zowel de materiaalhoeveelheden die gerecycleerd worden, als de nodige uitstoot en grondstoffen van de processen in rekening gebracht.

$$e_{module D1} = (M_{MR out} - M_{MR in}) \cdot (E_{MR after EOW out} - E_{VM Sub out} \cdot \frac{R_{R out}}{Q_{Sub}}) \quad (2.3)$$

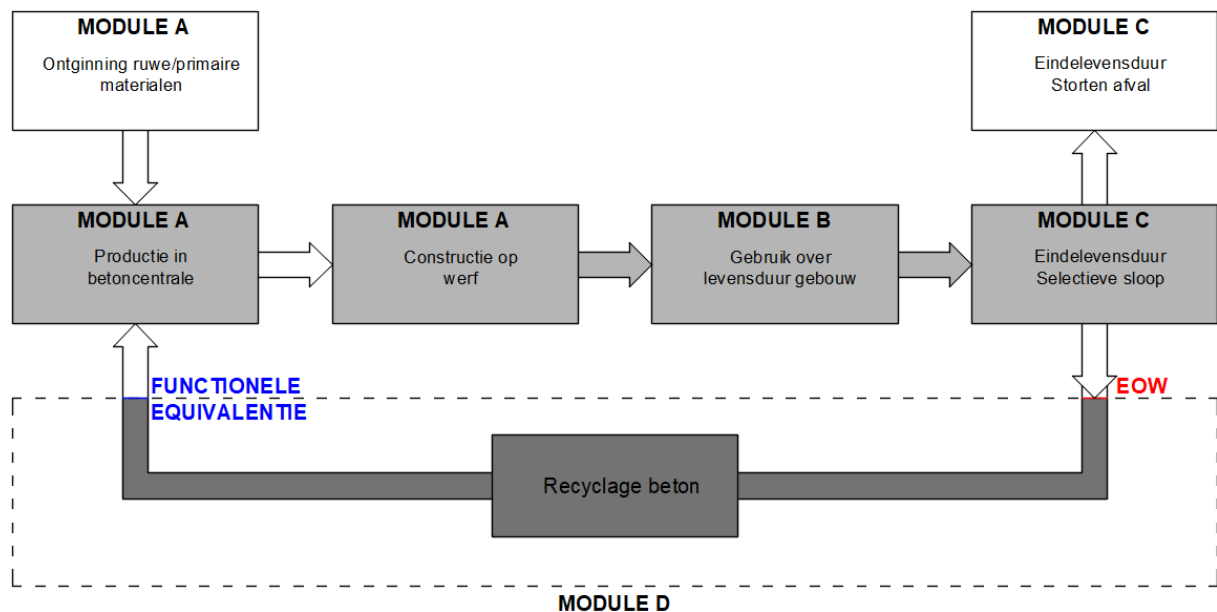
Met

- $M_{MR out}$: De hoeveelheid materiaal die zal worden gerecycleerd.
- $M_{MR in}$: De hoeveelheid gerecycleerd materiaal die al in de eerste levenscyclus wordt gebruikt.
- $E_{MR after EOW out}$: De lasten en voordelen van de recyclageprocessen vanaf de *end-of-waste* (EOW) tot functionele equivalentie.
- $E_{VM Sub out}$: De lasten van het primaire proces die vermeden worden door het hergebruik.
- $R_{R out}/Q_{Sub}$: De kwaliteitsratio van de gerecycleerde granulaten ten opzichte van de primaire materialen.

End-of-waste en functionele equivalentie

De overgang van module C naar module D wordt aangeduid door de term EOW en is het moment waarop het 'afval' stopt en een product of secundair materiaal wordt. Dit kantelpunt is niet eenduidig, waardoor aannames nodig zijn gezien het kan variëren in functie van de marktvraag (Wastiels et al., 2013a). Na de EOW volgen verdere verwerkingen van het materiaal waarbij de processen als lasten worden toegekend aan module D, via $E_{MRafterEOWout}$ in de Formule 2.3. Deze processen gaan door tot een moment van functionele equivalentie met het primaire materiaal dat het zal vervangen. Voor beton is dit wanneer de gerecycleerde granulaten als gedeeltelijke vervanging van de primaire granulaten kunnen dienen. Hierdoor wordt een deel van de processen van de primaire materialen vermeden, wat via $E_{VMSubout}$ ingerekend wordt in Formule 2.3. De voordelen in rekening genomen in module D zijn de vermeden primaire materialen (i.e. de materialen aan het punt van functionele equivalentie). Wanneer de kwaliteit van de gerecycleerde materialen minder is dan de primaire granulaten, moet er een correctiefactor ingerekend worden (ISO, 2012d). De kwaliteitsratio, R_{Rout}/Q_{Sub} , laat toe deze verminderde prestaties mee te nemen in de formule.

Waar de functionele equivalentie van een bepaald materiaal wordt vastgelegd, heeft een aanzienlijke invloed op de milieuvoordelen en -lasten in module D. Voor beton bijvoorbeeld zal de impact beduidend lager zijn wanneer de functionele gelijkheid net na de recyclage-installatie wordt bereikt dan wanneer deze voor de betoncentrale wordt bereikt. Hierbij zal er namelijk geen extra transport ingerekend worden om de gerecycleerde granulaten naar de nodige locatie te vervoeren, wat dikwijls een grote impact heeft op de milieulast (Delem and Wastiels, 2019b). Een algemeen schema van waar de EOW en functionele equivalentie is gesitueerd ten opzichte van module D wordt weergegeven in Figuur 2.13.



Figuur 2.13: End-of-waste en functionele equivalentie ten opzichte van module D - De witte pijlen stellen het transport tussen de verschillende onderdelen voor. Het transport van het betonpuin van de sloopwerf naar de recyclage-installatie en het transport van de gerecycleerde granulaten naar de betoncentrale vallen dus buiten module D.

Materiaalstromen

De vermeden milieu-impact van een materiaal verschilt naargelang het gerecycleerde materiaal voor hetzelfde primaire proces gebruikt wordt of niet, respectievelijk een *closed loop* of een *open loop* recyclage. De *net output flow* kan deze vermeden impact kwantificeren door de output van het primaire proces te verminderen met de nodige input voor de tweede cyclus, waarbij het resultaat niet negatief kan zijn (Delem and Wastiels, 2019b). Het constructiemateriaal metaal heeft een gesloten cyclus en een hoog recyclagepercentage waardoor het secundaire product rechtstreeks zorgt voor een vermindering van primaire grondstoffen en een belangrijke invloed heeft op de voordelen van module D.

Materialen met een laag recyclagepercentage zullen weinig impact hebben bij het betrekken van module D. Dit houdt echter niet in dat materialen met een hoog percentage automatisch een duidelijk effect zullen hebben. Beton bijvoorbeeld heeft een recyclage potentieel van ongeveer 95%, maar dit zal weinig voelbaar zijn doordat de gerecycleerde granulaten voornamelijk als downcycling in infrastructuur worden gebruikt. Het productieproces van deze granulaten voor wegenwerken vraagt minder energie waardoor de vermeden impact van primaire granulaten relatief laag is (Wastiels et al., 2013b).

Allocatie eindelevensduur

De in- en output van elke materiaalstroom wordt normaliter strikt gescheiden, met elk hun eigen oorsprong en doel. Wanneer eenzelfde materiaal echter verschillende doeleinden heeft, ontstaat de moeilijkheid om te bepalen hoe de milieu-impact eronder verdeeld wordt. Het materiaal moet dus gealloceerd worden aan de outputzijde. Allocatie is de verdeling van de milieulasten en -voordelen over verschillende producten en deelprocessen (Janssen et al., 2013). De verschillende onderdelen hebben elk een andere milieubijdrage waarbij het aandeel kan bepaald worden via de allocatiecriteria. De populairste zijn economische allocatie en massa-allocatie (Jain et al., 2020). Deze gebruiken respectievelijk de kostprijs van de onderdelen en de gewicht ratio voor de verdeling van de milieu-impact tussen verschillende processen.

Als er tijdens de EOL gerecycleerd wordt, worden er verschillende nuttige producten geproduceerd, die gebruikt worden in een tweede levenscyclus. Om een antwoord te bieden op de vraag hoe de lasten en voordelen van recyclage worden verdeeld over de twee levenscycli, wordt de allocatiemethode cut-off gebruikt, weergegeven in Figuur 2.14 (ISO, 2012d). Deze methode werkt op basis van module A, C en D en knipt letterlijk recyclage en hergebruik van de eerste levenscyclus. Hierdoor krijgt levenscyclus 2 alle lasten en voordelen van recyclage. De tweede levenscyclus draagt wel geen impact van de primaire productie van het gerecycleerde materiaal, gezien dit volledig is toegeschreven aan de eerste levenscyclus (Wernet et al., 2016; Ponsioen, 2015). Daarbij worden alle bijproducten die geen afval zijn, zoals warmte van verbranding meteen als *burden-free* beschouwd. Naast de cut-off methode zijn er nog andere allocatiemethodes die kunnen gebruik worden om de allocatieproblematiek op te lossen, beschreven in de literatuur (Ecoinvent Database, 2020).



Figuur 2.14: Allocatie via cut-off methode (Pré, 2020)

Toekomstig gebruik

Module D wordt aldus volgens de allocatiemethode cut-off niet meegenomen in de eerste levenscyclus, en wordt ook buiten de systeemgrenzen beschouwd volgens EN15804 (ISO, 2012d). Dit is te wijten aan de onzekerheid ervan. Module D legt namelijk een toekomstig gebruik vast door te rekenen dat de gebruikte materialen gerecycleerd zullen worden. Dit is een moeilijke kwestie door de lange levensduur van gebouwen en de ongekende vraag naar materialen op dat moment. Naast de onzekerheid of het materiaal wel degelijk gerecycleerd zal worden, kunnen de productieprocessen en energiesamenstellingen in de tijd evolueren, waardoor de bijdrage in de toekomst variabel is (International Energy Agency, 2001).

2.2.3 Gevoeligheidsanalyse

De normen rond LCA voorzien een algemeen methodologisch kader, waarin nog verschillende beslissingen en aannames dienen gemaakt te worden. Dit kan de analyse gevoelig maken voor veranderingen. Een manier om de robuustheid van een analyse na te gaan is een gevoeligheidsanalyse. Hierbij worden de resultaten vergeleken met nieuwe resultaten waarbij andere assumpties gelden door allerlei parameters af te toetsen.

Een eerste onzekerheid bij beton kan opkomen bij het transport. Traditioneel gezien is de bijdrage van transport in een LCA relatief beperkt. Bij zwaardere materialen, zoals beton, wordt de milieu-impact echter belangrijker. Bij de EOL zal het belang ervan afhangen van het verschil in afstand van de NA's en RA's. Daarnaast is de LCIA van een LCA doorgaans een subjectieve stap door de keuze van 'de belangrijkste impactcategorie' of 'de toepasselijkste impactmethode'. Een bijkomende keuze bij dit laatstgenoemde kan de milieufocus veranderen en dus andere resultaten met zich meebrengen. Als laatste kan de technische prestatie ook een invloed hebben op de FE. De verminderde kwaliteit van RA's vraagt namelijk aanpassingen in het productieproces, die al dan niet een aanzienlijke impact kunnen hebben.

3

Methodologie

3.1 Onderzoeksvraag

Wat is het belang om de EOL-impact uitgebreid mee te nemen in de berekening van de milieu-impact van betonnen constructies?

Ondertussen is duidelijk geworden dat het uitgebreid meenemen van de eindelevensduurbehandeling (module C en module D) een invloed kan hebben op een LCA door de eventuele voordelen en lasten van recyclage en hergebruik mee te nemen. Dit kan als een aanmoediging werken om de problemen in verband met klimaatopwarming en grondstofschaarste te reduceren. Aangezien het bouw- en sloopafval voor het grootste deel bestaat uit steenachtige fracties, zal dit de basis zijn in het onderzoek (Sapuay, 2016). De focus zal hierbij liggen op betonpuin en de hoogwaardige recyclage ervan aangezien ze hier al veel verder in staan dan bij baksteenpuin. Dit laatstgenoemde bevat ook veel onzuiverheden, wat hoogwaardige recyclage moeilijk maakt. Om een concreet antwoord te bieden op de onderzoeksvraag, wordt er aangenomen dat een gebouw gestript is tot op de betonnen structuur. Zo wordt er in het onderzoek uitsluitend beton meegenomen.

3.1.1 Theoretische aannames - Materiaalniveau

Een eerste onderzoek wordt gedaan op materiaalniveau, waarbij er een LCA wordt gemaakt van een kubieke meter beton. Er zullen twee verschillende eindelevensduurbehandelingen vergeleken worden; enerzijds hoogwaardige recyclage volgens het proces van Degetec, en anderzijds het storten van de volledige betonnen structuur. Hoewel storten geen realistisch scenario is in België, wordt het toch als *worst-case scenario* meegenomen in dit onderzoek. Naast de twee hoofdscenario's zullen ook enkele theoretische aannames getoetst worden om eventuele optimalisatie van het proces naar voor te kunnen schuiven. Deze resultaten kunnen aanleiding geven tot meer onderzoek of gebruik van bepaalde methoden of materialen. Hieronder worden de extra cases verder gespecificeerd, deze vloeien voort uit de optimalisatie van de literatuurstudie.

1. Gebruik breekzand Het gebruik van verliesmaterialen afkomstig uit het recyclageproces zal zowel de impact ten gevolge van storten als de productie van primaire materialen verminderen. Deze theoretische aanname zal logischerwijs zorgen voor een lagere milieu-impact, maar wordt toch meegenomen om te bekijken of het al dan niet een grote impact op het resultaat heeft. Zo kan het onderzoek hiernaar gestimuleerd worden, om het gebruik ervan toe te laten aangezien het momenteel nog verboden is.

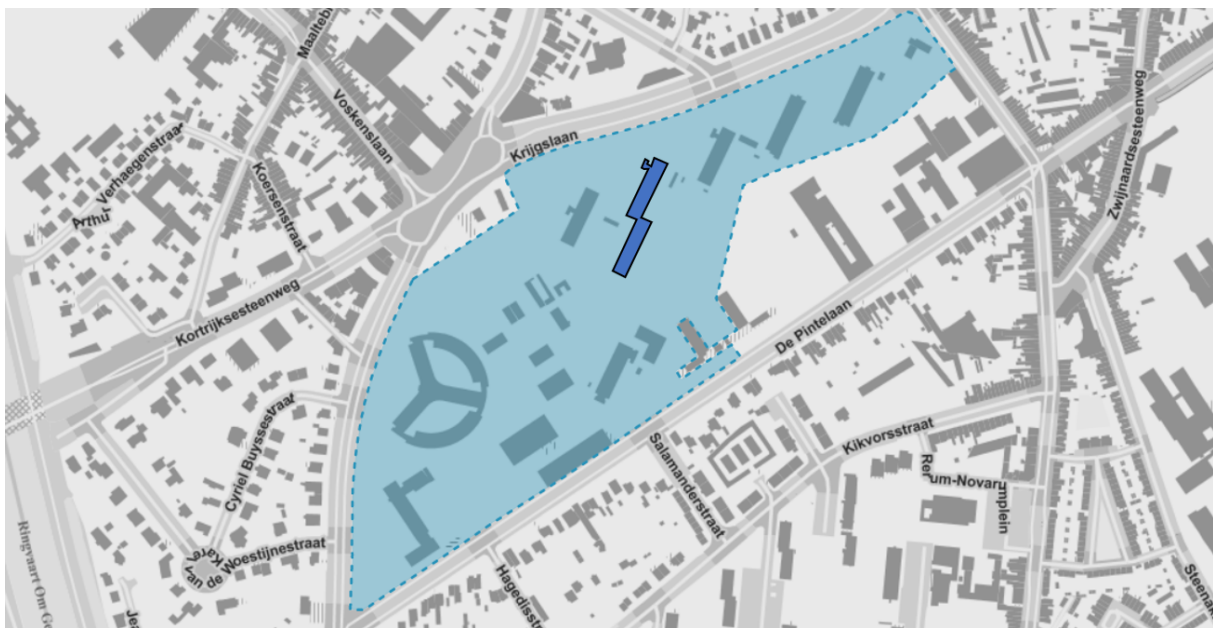
3 Methodologie

2. Koolstofdioxide-captatie via carbonatatie Net zoals bij het gebruik van breekzand zorgt deze situatie voor bijna geen extra milieu-impact, naast een extra wiellader voor het uitspreiden en stapelen van de gebroken granulaten. Door de voordelen van deze techniek in rekening te brengen in een LCA, kan het resultaat aansporen om er eventueel een verplichte stap van te maken in het recyclageproces bij niet kritische wapeningsconstructies.

3. Elektriciteit versus diesel De machines van Degetec werken voornamelijk op diesel, met uitzondering van de wasinstallatie die hernieuwbare energie consumeert. Deze theoretische aanname zal aantonen hoe sterk brandstof de milieu-impact beïnvloedt door een vergelijking te maken tussen een proces gebaseerd op diesel en op elektriciteit. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen verschillende bronnen van elektriciteit, met name zonne- en windenergie.

3.1.2 Case study - Gebouwniveau

De verworven inzichten op materiaalniveau zullen daarna meer concreet toegepast worden op een case study van de Universiteit Gent. Het betreft het gebouw S4, gelegen op campus Sterre in de rand van Gent. Deze campus is een voormalig militair oefenterrein dat werd opgebouwd in de jaren 60 voor de faculteit Wetenschappen van de Universiteit Gent (Vandeweghe, 2019). De gebouwen naderen aldus het einde van hun levensduur, waardoor de vraag opkomt wat er vanuit het milieu-perspectief mee moet gebeuren.

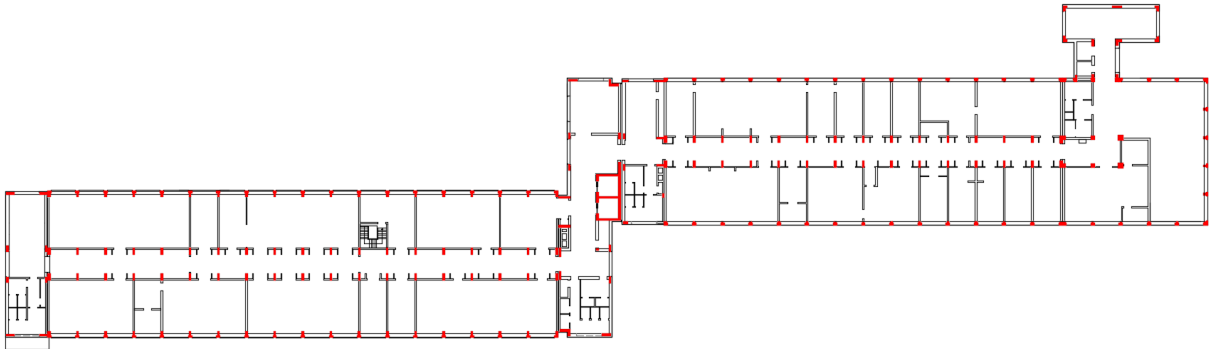


Figuur 3.1: Plan campus Sterre, Noorden ↑ (Vandeweghe, 2019) - De S4 is het donkerblauwe gebouw.

De site is opgebouwd uit vijf repetitieve gebouwen, waarvan de S4 zich onderscheidt door een extra uitbreiding in het zuiden. Deze latere aanbouw heeft een gelijkaardig volume en zorgt voor het getrapte karakter van de S4, zie Figuur 3.1. De circulatie van de constructie wordt gerealiseerd door een apart noordelijk volume. Het gebouw heeft een ondergronds niveau en het aantal verdiepingen tussen de twee blokken verschilt. De noordelijke blok heeft drie niveaus en de zuidelijke blok heeft er vier.

3 Methodologie

De case study heeft een betonnen draagstructuur die relatief repetitief is op elke verdieping, mits afname van de doorsnede in de hoogte. Het gebouw heeft betonnen vloerplaten die worden gedragen door rechthoekige, L-vormige en T-vormige kolommen. Deze situeren zich voornamelijk in de gevel en in het midden van het gebouw. Tussen de twee modules is er een betonnen kern. In Figuur 3.2 is de repetitieve structuur weergegeven in het rood.



Figuur 3.2: Betonnen draagstructuur niveau 0 - De structurele elementen zijn aangeduid in het rood.

De S4 is dus een geschikte case study gezien het enerzijds bestaat uit een aanzienlijk volume beton en anderzijds het einde van zijn levensduur nadert. Om een optimale EOL behandeling naar voor te schuiven, zal de milieu-impact van zes verschillende eindelevensduursscenario's gekwantificeerd en vergeleken worden, zie 5.1. Het doel is een optimaal scenario te formuleren van wat er met de S4 moet gebeuren. De resultaten kunnen achteraf doorgetrokken worden naar alle gebouwen van campus Sterre.

3.2 Onderzoek via levenscyclusanalyse (LCA)

Om de milieu-impact van verschillende eindelevensduurbehandelingen te kunnen kwantificeren, wordt er gebruik gemaakt van LCA. Zoals beschreven in de literatuurstudie wordt een LCA opgebouwd uit vier stappen, die hieronder verder worden gedefinieerd. Hierbinnen zijn aannames zoals EOW, functionele equivalentie, transportafstanden etc. essentieel. Deze zijn al dan niet bepalend voor de resultaten van de studie. Om de invloed van de keuze van de aannames na te gaan, wordt er gebruik gemaakt van een gevoeligheidsanalyse.

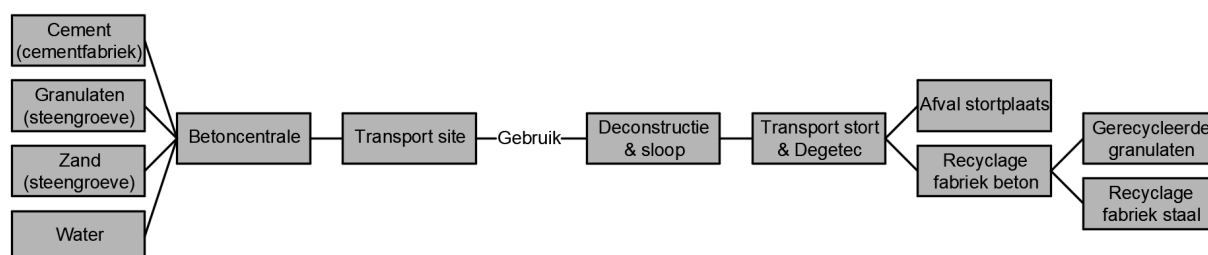
3.2.1 Doel en reikwijdte

Het doel van de studie is om te achterhalen wat het belang is van de eindelevensduurbehandeling in een LCA bij betonnen structuren. De al dan niet gunstige resultaten kunnen een invloed uitoefenen op onder andere de overheid om te focussen op bepaalde zaken, zoals hoogwaardige recyclage. De FE, waardoor vergelijking tussen eindelevensduurbehandelingen mogelijk is, is op productniveau en wordt vastgelegd op 1 m³ beton met een dichtheid van 2316 kg/m³, W/C van 0,34 en een sterkteklasse C25/30. Dit is de minimale sterkteklasse om beton hoogwaardig te kunnen recyclen tot granulaten. De W/C van deze samenstelling is relatief laag in vergelijking met een courante betonmengsels in een EE3 omgeving, waarbij de W/C tot 0,5 kan gaan (ISO, 2013). De samenstelling is echter gebaseerd op de aangegeven hoeveelheden in het proces van SimaPro. Voor de wapening zit er, volgens Degetec, gemiddeld 40 kg staal in een kubieke meter beton. In deze studie wordt er bijgevolg een wapeningspercentage van 1,7% aangenomen. In Tabel 3.1 zijn de hoeveelheden van de andere materialen in de betonsamenstelling weergegeven, gebaseerd op de hoeveelheden van het proces in SimaPro. De aangenomen TLD is 60 jaar, wat echter in deze studie geen grote invloed zal hebben op de resultaten omdat de gebruiksfase niet wordt meegenomen (Neves and de Brito, 2022).

	Massa (kg)	Dichtheid (kg/m ³)	Volume (m ³)
Portlandcement	376	2796	0,134
Granulaten	850	2620	0,324
Zand	1090	2640	0,413
Water	127	1000	0,127
Toevoegsels	2,72	2200	0,001

Tabel 3.1: Betonsamenstelling voor 1 m³ beton - De aangenomen hoeveelheden zijn dezelfde zoals gedefinieerd in het proces van SimaPro.

De reikwijdte van de studie betreft module A, C en D. Module B, die de gebruiksfase omvat, wordt buiten beschouwing gelaten gezien de focus op de eindelevensduurbehandeling ligt. Hoewel module D normaliter buiten de systeemgrenzen valt, wordt het in deze studie meegenomen om de voordelen van vermeden primaire producten te kunnen betrekken in de eerste levenscyclus. Via allocatie, namelijk het cut-off systeemmodel met inclusie van module D kunnen de potentiële voordelen en lasten in rekening genomen worden in de eerste levenscyclus. In Figuur 3.3 worden alle meegenomen fasen in de LCA weergegeven.



Figuur 3.3: Afbakening van de systeemgrenzen - Het gebruik (module B) valt dus buiten de systeemgrenzen.

3.2.2 Levenscyclusinventarisatie (LCI)

Aan de hand van de SimaPro 9.11.1 software en de Ecoinvent 3.6 database kunnen de in- en outputstromen van de gehele levenscyclus bepaald worden. De verschillende processen zijn steeds gebaseerd op bestaande *unit processes* uit de ecoinvent-database, waarin alle gelinkte processen vervat zitten. Daarnaast wordt er een opsplitsing gemaakt tussen *market* en *transformation processes*. In het laatstgenoemde zit het transport nog niet in het proces. Indien mogelijk wordt er gebruik gemaakt van *transformation processes*, wat toelaat om de transport impact eigenhandig in te geven per proces. In Bijlage B is een overzicht te vinden van alle gebruikte processen, waarbij de keuze meer in detail is beschreven. Hieronder worden de andere aannames besproken per module. Een overzicht van de modules en wat deze inhouden is afgebeeld in de literatuurstudie in Figuur 2.11.

Module A

Productiefase (A1-A3) In de productiefase zit de milieu-impact van de ruwe materialen, het transport ervan naar de fabriek, en de productie zelf. Gezien deze studie zich baseert op *transformation processes*, moeten de transportafstanden van de ruwe materialen van de steengroeve naar de betoncentrale apart worden ingecalculleerd. Het transport van cement, granulaten en zand wordt gezien als bulk materialen, wat volgens EN 15804 wordt getransporteerd met een vrachtwagen "*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 RER/Cut-off, U*" (ISO, 2012d). Hierbij geeft 'EURO5' aan hoe vervuilend het transport mag zijn (Lopes et al., 2014). De totale impact van het transport is dus afhankelijk van het soort materiaal, de massa van het materiaal en de transportafstand.

De aangenomen afstanden zijn gebaseerd op de gegevens van Degetec, waarbij hun primaire granulaten en zand afkomstig zijn uit een steengroeve in Doornik, 'Holcim' (Grand'Route 19, 7530 Gaurain-Ramecroix) en hun cement uit 'CBR Gent I' (Arbedkaai 3, 9042 Sint-Kruis-Winkel). De afstanden zijn bepaald via een gemiddelde van de routes in Google Maps. Het transport voor water wordt verwaarloosd. Voor de afstand van de wapening is generieke data aangenomen, gezien er geen specifieke data beschikbaar was. De exacte afstanden per materiaal zijn weergegeven in Bijlage B.

Constructie proces (A4-A5) Na de productie van het beton volgt de constructiefase. Hierbij wordt enerzijds de transport impact van het geproduceerde beton van de betoncentrale naar de site gekwantificeerd en anderzijds de montage van de constructie inclusief 5% constructieverliezen (OVAM, 2013). Het laatstgenoemde valt onder module A5 en wordt bij de onderzochte scenario's gelijk geacht waardoor het weggelaten kan worden in deze studie. Module A4 wordt wel bekeken omwille van de aanwezige specifieke data. Gezien het startpunt van dit onderzoek een case study is van de Universiteit Gent, name-

3 Methodologie

lijk de S4 van campus Sterre, kunnen de transportafstanden naar de verschillende sites nauwkeurig bepaald worden via het gemiddelde van Google Maps. Dit resulteert in een transportafstand van 30,95 km voor het beton. Voor staal wordt wederom generieke data aangenomen, namelijk 67,50 km. Voor beide wordt dezelfde soort vrachtwagen gebruikt als voor de ruwe materialen vermits beton en wapening onder respectievelijk *poured concrete* en *loose products* vallen volgens NBN 15804 (ISO, 2012d).

Module B

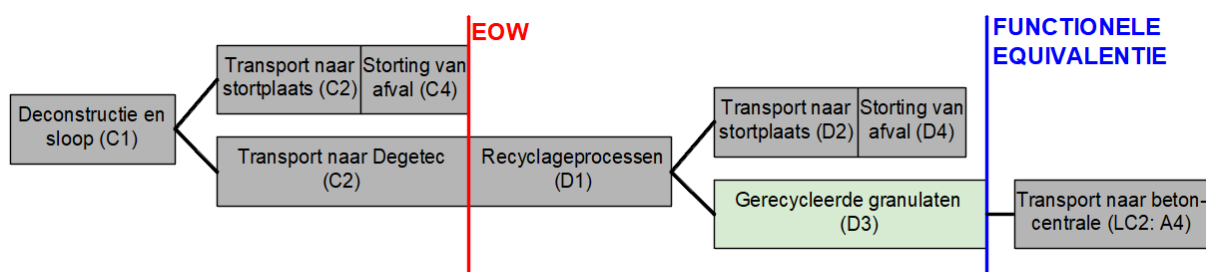
De gebruiksfase wordt buiten beschouwing gelaten in deze studie omdat onderhoud, vervangingen en herstel onnodig zijn door de relatief lange levensduur van beton. Daarnaast is de FE niet op gebouwniveau, waardoor er geen operationele energie in rekening gebracht wordt.

Eindelevensduurbehandeling

"End-of-waste" Om een duidelijke grens te stellen tussen welke lasten onder module C vallen en welke onder module D, moet de EOW, zoals beschreven in de literatuurstudie, bepaald worden. Hiervoor wordt aangenomen dat de overgang tussen module C en D net voor de recyclage-installatie ligt. Zowel het transport van de S4 naar Degetec, als het transport van de directe afvalstroom naar de stortplaats, met bijhorend de impact van het storten, vallen nog binnen de grenzen van module C. Om een duidelijke opsplitsing te maken tussen de verschillende aandelen van module D, wordt er, net zoals bij de andere modules, een opsplitsing gemaakt in deelfasen. Hierdoor kan een correct gebruik van module D worden aangespoord. In Tabel 3.2 worden de aangenomen deelmodules gedefinieerd en in Figuur 3.4 worden deze verder verduidelijkt. De benamingen zullen gedurende het hele onderzoek aangehouden worden.

Benaming	Impact (Pt)
D1	Recyclageprocessen (lasten +)
D2	Transport verliesmaterialen recyclageproces (lasten +)
D3	Vermeden primaire materialen door hergebruik (voordelen -)
D4	Storting verliesmaterialen recyclageproces (lasten +)

Tabel 3.2: Opsplitsing module D



Figuur 3.4: Grenzen eindelevensduur: EOW en functionele equivalentie

De grijze en groene kleur geven een aanduiding van respectievelijk milieulasten of milieuvoordelen. Alles na de functionele equivalentie valt onder de tweede levenscyclus.

3 Methodologie

Functionele equivalentie Om de grens te trekken waar module D stopt en dus de gerecycleerde materialen als grondstoffen worden gezien, moet de functionele equivalentie bepaald worden. Deze ligt net na de recyclage-installatie, nadat de gerecycleerde granulaten zijn gevormd en deze de natuurlijke granulaten kunnen vervangen. In Figuur 3.4 wordt de keuze van EOW en functionele equivalentie schematisch weergegeven ten opzichte van de verschillende deelmodules. Transport van de granulaten naar de betoncentrale wordt dus toegekend aan de tweede levenscyclus in module A4. Gezien Degetec echter een betoncentrale is, is het plausibel dat de gerecycleerde granulaten op de locatie zelf worden gebruikt.

Module C

Deconstructie en sloop (C1) Wanneer het slopen van een gebouw machinaal gebeurt, brengt het een milieu-impact met zich mee. Hierbij wordt de milieu-impact onder andere bepaald door het fijne stof dat vrijkomt bij het slopen. Daarnaast is er een impact ten gevolge van diesel voor de deconstructiemachine, elektriciteit voor het sorteren en de sorteerinstallatie zelf. Hierbij zijn de hoeveelheden bepaald volgens de aannames van OVAM (2013).

Transport (C2) Volgens OVAM (2013) heeft elk materiaal een afvalscenario, dat zijn verschillende eindbestemmingen definieert, gebaseerd op EN 15804 (ISO, 2012d). Zowel bij beton (*Stony and glass: concrete*) als bij de stalen wapening (*Metals: iron, steen, non-ferro*) gaat 5% van het betonpuin rechtstreeks naar een stortplaats en wordt 95% gerecycleerd. Deze aandelen zullen andere transportafstanden kennen. Er zijn verschillende stortplaatsen over Vlaanderen, maar voor deze studie wordt er gebruikt gemaakt van een stortplaats in Gent, namelijk Aclagro (Industrieweg 74, 9032 Gent).

De afstand tussen campus Sterre en Aclagro is wederom bepaald via de gemiddelde afstand van Google Maps, wat resulteert in 12,6 km. Gezien de focus van deze studie op de betonfractie ligt, waarvoor specifieke data wordt gebruikt, wordt voor het staal generieke data aangenomen gebaseerd op OVAM (2013), namelijk een transportafstand van 80 km. De resterende 95% van de materialen gaat naar de recyclage-installaties. Hiervoor wordt enerzijds voor het beton de specifieke afstand 30,95 km van de S4 naar Degetec gebruikt en anderzijds voor het staal de generieke afstand van 30 km.

Afvalverwerking (C3) Hieronder vallen de processen ter voorbereiding van recyclage en hergebruik, met name off-site sorteren. In dit onderzoek wordt er echter vertrokken van een gestripte betonstructuur waardoor het betonpuin niet bijkomend gesorteerd moet worden. Daarnaast wordt het puin na het slopen rechtstreeks naar de crusher van de recyclage-installatie gebracht waardoor er kan gesteld worden dat er geen milieu-impact is ten gevolge van deze levenscyclusfase.

Storting van afval (C4) Storten van bouw- en sloopafval kan een invloed uitoefenen op het milieu. Hoewel inert afval gunstig is, brengt het storten een bepaald landbezit en transformatie van het land met zich mee, wat nadelig is. De processen voor beton en staal hebben eenzelfde milieu-impact. Door de aangenomen EOW wordt het storten van slecht 5% van beide materialen toegekend aan module C.

Module D

In module D zitten zowel de lasten van het recyclageproces als de milieuvoordelen van de vermeden primaire materialen. Hierdoor kunnen de milieuvoordelen de lasten gedeeltelijk opheffen. De voorgestelde benamingen in Tabel 3.2 worden verder aangehouden.

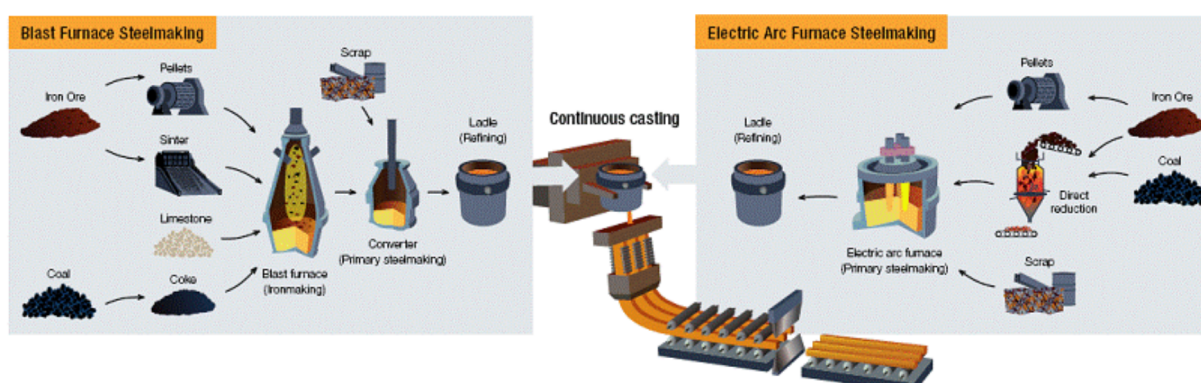
3 Methodologie

Recyclageproces (D1) Betonproductie recyclage Voor de transformatie van het betonpuin tot gerecycleerde granulaten wordt een stationaire installatie aangenomen om een hoge kwaliteit van de granulaten te kunnen waarborgen. Het verbruik van de machines is gebaseerd op de verkregen data van Degetec, waarbij de diesel berekend is in kg per m³ beton en de elektriciteit in kWh per m³ beton, zie Tabel 3.3. De opgegeven verbruiken worden in elk scenario gelijk genomen, ook al gaat het niet telkens exact om één kubieke meter beton. Aangezien de data gebaseerd zijn op een mondelinge bron en het gemiddelde van het bereik is aangenomen, zullen bij minimale verschillen in de betonvolume de conclusies niet veranderen. Naast het verbruik van de machines wordt normaliter de impact ten gevolge van landbezit en machine opbouw ook opgenomen in het proces. Door de grote hoeveelheden qua productie en de locatie op een industrieterrein wordt er van uitgegaan dat deze impact verwaarloosbaar is.

	Verbruik (l/h)	Verbruik (l/h)	Capaciteit (ton/h)	Verbruik (l)	Verbruik (kg)
BREKER	300-450	375	200	4,343	3,908
Hydraulische kraan	20-30	25	200	0,290	0,261
Wiellader	20-30	25	200	0,290	0,261
ZEEFINSTALLATIE	20-30	25	50	1,158	1,042
Wiellader	20-30	25	50	1,158	1,042
WASINSTALLATIE	Verbruik (l/dag)	Verbruik (l/h)	Capaciteit (ton/h)	Verbruik (l)	Verbruik (kg)
Trommelzeef	50	6,25	50	0,290	0,261
	Verbruik (kWh)	Verbruik (kWh)	Capaciteit (ton/h)		Verbruik (kWh)
Motoren	5x11	55	50		2,548

Tabel 3.3: Verbruik recyclage-installatie, volgens Degetec

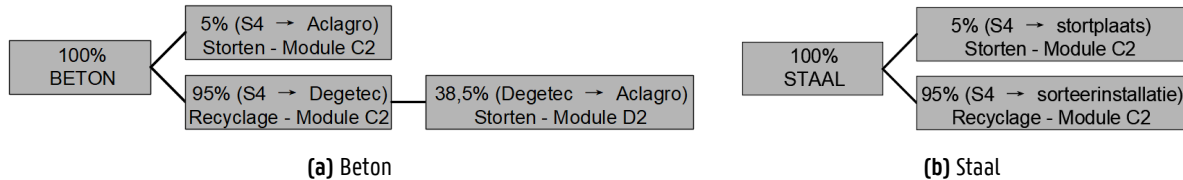
Staalproductie recyclage Ook al ligt de focus in dit onderzoek niet op staal en de recyclage ervan, toch wordt het meegenomen om een realistisch beeld te krijgen van het geheel en zo ook de werkelijkheid. Voor het recyclageproces van staal worden aannames gemaakt op basis van de twee mogelijke routes van staalproductie, weergegeven in Figuur 3.5. Voor de lasten van het recyclageproces van staal wordt een gelijkaardig proces aangenomen als een *electric arc furnace*, vlamboogoven (EAF).



Figuur 3.5: De twee routes van staalproductie (Leroy et al., 2012)

3 Methodologie

Transport verliesmateriaal (D2) In tegenstelling tot de recyclage van staal, brengt recyclage van beton een behoorlijk aandeel verliesmateriaal met zich mee ten gevolge van de gebruikte machines. Dit verliesmateriaal, dat gekwantificeerd is op basis van de waarden van de literatuurstudie op 38,50% (Tabel B.2), brengt een extra transportafstand met zich mee van Degetec naar de stortplaats. Hierbij wordt Aclagro opnieuw aangenomen, met een gemiddelde transportafstand van 49,80 km. In Figuur 3.6 zijn de transportsce­nario's van de eindelevensduurbehandeling ter verduidelijking weergegeven voor het beton en staal. Hierbij zijn alle percentages uitgedrukt ten opzichte van het oorspronkelijke 100% betonpuin en staal.



Figuur 3.6: Afvaltransport eindelevensduur beton en staal

Voordelen recyclage (D3) Betonrecyclage Door module D in dit onderzoek mee te nemen in de cut-off benadering, kunnen de voordelen ten gevolge van recyclage en hergebruik bekeken worden bij de eerste levenscyclus. Om het voordeel van de gerecycleerde granulaten in rekening te brengen, wordt de impact ervan als negatieve waarde meegenomen in het proces. Zo kunnen de milieuvordelen de lasten gedeeltelijk opheffen. De aangenomen processen in SimaPro voor de betonvoordelen zijn dezelfde als de reeds gedefinieerde primaire materialen, met een minteken als verschil.

Staalrecyclage Voor de vermeden primaire productie van staal, wordt het linker proces van Figuur 3.5 aangenomen. Dit is een proces via een *basic oxygen furnace*, hoogoven (BOF). In Ecoivent bevat het proces voor staal dat op deze manier wordt geproduceerd reeds *recycled content*. Voor de berekening van module D zijn we echter geïnteresseerd in de milieu-impact van het proces indien het uit 100% primair staal zou bestaan. Zo een proces bestaat niet in Ecoivent waardoor de milieu-impact zelf berekend moet worden voor 100% primair staal via Formule 3.1 (World Steel Association, 2017). In Tabel 3.4 worden de gebruikte parameters uitgelegd met hun bijhorende waarde.

$$X_{100\%primair} = \frac{X_{BOF} - m \cdot Y \cdot X_{EAF}}{1 - m \cdot Y} \quad (3.1)$$

$$ModuleD = (RR - RC) \cdot (E_{recyclage} - E_{primair} \cdot Y \cdot Q) \quad (3.2)$$

Storting afval (D4) In het laatste onderdeel van module D zitten de lasten te wijten aan het het storten van de verliesmaterialen van het recyclageproces. In Bijlage B wordt het totale verliespercentage berekend op 38,49%. Dit betonaandeel wordt gestort in Aclagro met dezelfde milieu-impact als hierboven reeds beschreven.

3.2.3 Levenscyclusimpactanalyse (LCIA)

Om uiteindelijk de milieulasten en -voordelen te kwantificeren wordt er gebruikt gemaakt van verschillende impactcategoriën die elk een bepaalde milieulast met zich meebrengen. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen enerzijds middelpuntcategoriën, die betrouwbaar zijn, maar moeilijker te interpreteren en anderzijds eindpuntcategoriën, die makkelijker te interpreteren zijn, maar waarbij er meer aannames nodig zijn. Hierdoor zijn eindpuntcategoriën subjectiever,

3 Methodologie

hoewel deze makkelijker te interpreteren zijn. Afhankelijk van welke impactmethode er wordt gebruikt, ligt de focus op de middelpunt- of eindpuntcategorieën. In deze studie wordt gebruik gemaakt van de ReCiPe 2016 methode, die zowel de middelpunt- als de eindpuntcategorieën in rekening brengt. Deze methode laat toe een single score te berekenen. Hoewel dit een vrij subjectieve waarde is, is het een goede basis om vergelijkingen mogelijk te maken.

In de ReCiPe methode wordt er een onderscheid gemaakt tussen drie perspectieven, de individualistische benadering, de hiërarchistische benadering en de egalitaire benadering, die gelijkaardige aannames en keuzes representeren. De individualist is gebaseerd op korte termijn en is eerder optimistisch, terwijl de egalitair gebaseerd is op lange termijn en eerder pessimistisch is (Huijbregts et al., 2016). In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de middenweg, met name de hiërarchist, die tussen de twee uitersten zit. Daarnaast wordt er ook *endpoint* gekozen in SimaPro om de single score mogelijk te maken en *midpoint* om het kilogram CO_2 equivalent te bepalen voor het GWP.

Parameter	Uitleg	Waarde	
X_{EAF}	Milieu-impact productieproces staal wanneer geproduceerd wordt via EAF (lasten)	0,128	Pt/kg
X_{BOF}	Milieu-impact productieproces staal wanneer geproduceerd wordt via BOF (vermeden lasten)	0,181	Pt/kg
m	Massa staalschroot in BOF proces	0,125	kg
Y	Efficiëntie recyclageproces	0,92	(-)
$X_{100\%primair}$	(zonder gerecycleerde materialen)	0,188	Pt/kg
RR	<i>Recycling rate</i>	0,95	(-)
RC	<i>Recycled content</i>	0,15	(-)
Q	Kwaliteitsverhouding	1	(-)
Module D	Milieu-impact	-0,0359	Pt/kg

Tabel 3.4: Milieu-impact recyclage staal - Op basis van Formule 3.1 en 3.2

4

Resultaten eindelevensduur

Nu de aannames zijn vastgelegd kan de levenscyclus of meer specifiek de impact van de eindelevensduur van de cases bepaald worden. Alvorens over te gaan naar de resultaten is het nodig om een vooronderzoek uit te voeren over de gevoeligheid van de gemaakte aannames. Zo kan de invloed ervan op de eindresultaten geanalyseerd worden.

4.1 Vooronderzoek

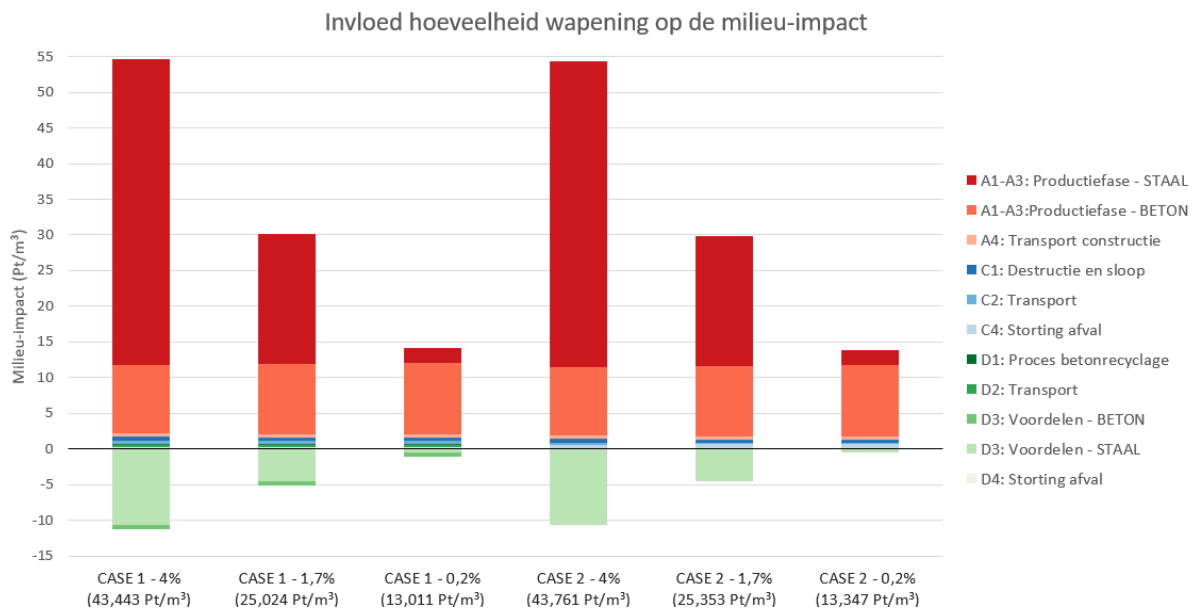
4.1.1 Wapeningsaandeel

Het wapeningsaandeel van een betonnen constructie verschilt van element tot element en van locatie tot locatie. Bij Degetec wordt er algemeen gezien gerekend met 40 kg staal per kubieke meter beton. Dit vertaalt zich in een wapeningspercentage van 1,7%, hoewel het staaandeel kan liggen tussen 0,2% en 4% (Wan-Wendner, 2021). Om de invloed van de hoeveelheid wapening op de eindelevensduur van beton te achterhalen, zal de levenscyclus van twee eindelevensduurbehandelingen, namelijk hoogwaardige recyclage tot granulaten (CASE 1) en storten (CASE 2), vergeleken worden met wapeningspercentages van 4%, 1,7% en 0,2%. Het resultaat van dit deelonderzoek is numeriek weergegeven in Tabel 4.1 en grafisch in Figuur 4.1.

MILIEU-IMPACT (Pt/m ³)	CASE 1 - 4%	CASE 1 - 1,7%	CASE 1 - 0,2%	CASE 2 - 4%	CASE 2 - 1,7%	CASE 2 - 0,2%
A1-A3: Productie - STAAL	42,866	18,218	2,143	42,866	18,218	2,143
A1-A3: Productie - BETON	9,611	9,841	9,991	9,611	9,841	9,991
A4: Transport constructie	0,520	0,460	0,420	0,520	0,460	0,420
C1: destructie en sloop	0,565	0,537	0,519	0,565	0,537	0,519
C2: Transport	0,445	0,421	0,405	0,221	0,191	0,172
C4: Storting afval	0,035	0,033	0,032	0,613	0,626	0,634
D1: Productie recyclage	0,147	0,147	0,147	0,000	0,000	0,000
D2: Transport	0,247	0,253	0,257	0,000	0,000	0,000
D3: Voordelen - BETON	-0,592	-0,606	-0,615	0,000	0,000	0,000
D3: Voordelen - STAAL	-10,636	-4,520	-0,532	-10,636	-4,520	-0,532
D4: Storting afval	0,234	0,240	0,244	0,000	0,000	0,000

Tabel 4.1: Invloed hoeveelheid wapening - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste score vetgedrukt.

4 Resultaten eindelevensduur



Figuur 4.1: Invloed van de hoeveelheid wapening op de milieu-impact - Vergelijking EOL van hoogwaardige recyclage tot granulaten (CASE 1) en storten (CASE 2).

Module A

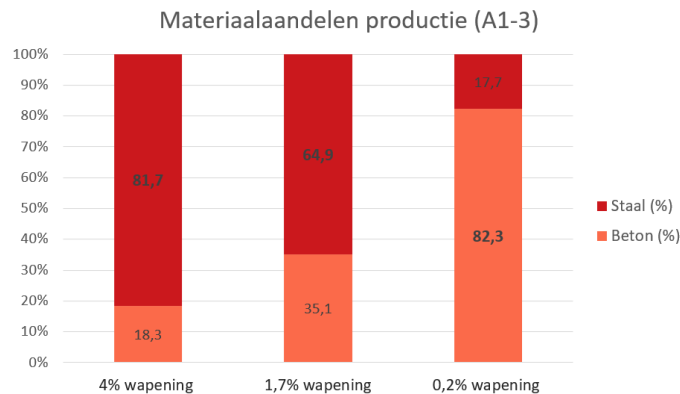
Wanneer men de waarden van module A vergelijkt in Tabel 4.1, blijft de milieu-impact ten gevolge van de productie van beton relatief gelijkaardig, met een maximaal verschil van 0,381 Pt per kubieke meter beton. Dit komt door het beperkte verschil in betonmassa tussen de productie met minimale en maximale wapening, wat slechts 90 kg is ten opzichte van de gehele betonmassa van 2316 kg. Door de kleine verschillen is het aandeel bijna verwaarloosbaar. Er is wel een duidelijk onderscheid bij de milieu-impact van de productie van de wapening. Dit is te wijten aan de dichtheid van staal, 7800 kg/m^3 , die beduidend groter is dan die van beton, 2316 kg/m^3 . Hierdoor is er een groter verschil in staal massa met een spreiding van 312 kg voor een maximaal staalpercentage tot 15,6 kg voor een minimaal percentage.

Afhankelijk van het wapeningsaandeel, zal de productie van beton of staal de overhand nemen in de milieu-impact. Figuur 4.2 toont de materiaalaandelen voor module A1 tot en met A3. Enkel bij een wapeningspercentage van 0,2% heeft het beton de meeste invloed op de milieu-impact van de productiefase. In het transport van de materialen naar de site zelf (A4) is ook een verschil. Een groter wapeningsaandeel zorgt namelijk voor een grotere totale massa door de hogere dichtheid van staal. Gezien de impact van transport wordt uitgedrukt in Pt/tkm resulteert een grotere massa in een hogere milieu-impact.

Module C

Alle onderdelen van module C resulteren in een hogere milieu-impact bij een hoger wapeningspercentage, wederom door het grotere gewicht. Daarbovenop is er een extra factor van belang bij module C2. Voor staal worden namelijk generieke afstanden aangenomen, waardoor de afstand naar de stortplaats voor staal bijna zeven keer zo groot is als de afstand voor het betonpuin. Hierdoor is er in Tabel 4.1 voor C2 een groter verschil tussen de wapeningsaandelen bij CASE 2 gezien 100% van het materiaal naar de stortplaats gaat.

4 Resultaten eindelevensduur



Figuur 4.2: Materiaalaandelen productiefase (A1-A3) - Voor elk scenario is de hoogste milieu-impact vetgedrukt.

Module D

Zoals in de aannames vermeld, is er geen verschil in machineverbruik voor het recyclen van beton. Voor het transport van module D, stijgt de milieu-impact met een daling van de hoeveelheid wapening. In D2 zit namelijk enkel de transport impact ten gevolge van de verliesmaterialen van beton, waardoor een groter aandeel beton zorgt voor een grotere milieu-impact. Hetzelfde geldt voor het storten van de verliesmaterialen, namelijk D4. Net zoals bij module D2 en D4 heeft het voordeel van betonrecyclage in beperkte mate een grotere impact bij een lager wapeningspercentage. Daarentegen heeft het verschil in hoeveelheid wapening wel een uitgesproken impact op het voordeel van staalrecyclage. Bij een wapeningsaandeel van 0,2% is het staalvoordeel in dezelfde grootteorde als dat van de betongranulaten, hoewel een aandeel van 4% wapening de volledige productie van het beton kan opheffen.

Conclusie

Het wapeningsaandeel heeft een belangrijke invloed op de gehele LCA, zowel op primair productieniveau, als op de voordelen van recyclage en hergebruik. Het is echter niet de focus van de studie gezien staalrecyclage al courant wordt gebruikt en de voordelen ervan duidelijk zijn. Hierdoor mogen de resultaten van staal de resultaten van het beton niet overschaduwen. Wanneer er echter enkel naar het beton wordt gekeken, blijft de impact relatief uniform bij de verschillende wapeningspercentages. Het is dus gefundeerd om een wapeningspercentage van 1,7% aan te nemen voor de gehele studie.

4.1.2 Verwaarlozing landbezit in D1

In het productieproces van de gerecycleerde granulaten wordt de milieu-impact door landbezit niet meegenomen. Om de invloed van deze aanname na te gaan, wordt er in dit onderdeel verder op ingegaan. Algemeen kan gesteld worden dat het landgebruik van steengroeves voor natuurlijke granulaten groter is dan dat van een recyclagecentrum. Om primaire materialen te kunnen blijven ontginnen, moeten de groeves namelijk steeds groter worden. Een recyclagecentrum vraagt echter wel ruimte voor enerzijds het stockeren van het puin en anderzijds de werking van de machines. Daarnaast is het in de situatie van Degetec een extra uitdaging om te bepalen welk aandeel van hun terreinen deel uitmaakt van de betoncentrale en welk deel behoort tot de recyclage-site.

4 Resultaten eindelevensduur

Er zijn dus verschillende factoren die een invloed uitoefenen. Om aan te tonen dat de impact van het landbezit relatief beperkt blijft, wordt de milieu-impact geschat via bestaande processen in SimaPro. In bijlage C wordt de schatting van de milieuscore uitgebreid aangeduid. Zo wordt de milieu-impact voor landbezit van een kubieke meter beton geschat op 0,000608 Pt. Wanneer deze waarde wordt vergeleken met de impact van het recyclageproces (D1), die wordt becijferd door 0,147 Pt/m³, blijkt dat landbezit niet in dezelfde grootteordes ligt en dus verwaarloosd kan worden.

4.1.3 Verwaarlozing machine-impact in D1

Net zoals het landgebruik, wordt de machine-impact niet meegenomen in de lasten van het recyclageproces (D1). Deze impact wordt enerzijds bepaald door de levensduur van de machines en anderzijds door de capaciteit die de machine gedurende zijn levensduur produceert. Volgens Degetec ligt de levensduur van de breker en de zeef op 15 jaar, hoewel de zeefinstallatie in realiteit sneller vervangen wordt om de efficiëntie zo hoog mogelijk te houden. Een kraan wordt vervangen na 7 000 à 8 000 draaiuren, wat resulteert in een levensduur van 5 à 6 jaar, rekening houdend met 1 400 à 1 500 draaiuren per jaar.

Om de impact van de recyclagemachines te schatten, wordt er gekeken naar een bestaand proces in SimaPro, waarbij het verbruik werd weggelaten om zo de pure machine-impact te bepalen. De totale milieuscore van een machine wordt zo becijferd op 1 540 Pt. In Tabel 4.2 wordt op basis van de levensduur en de capaciteit de milieu-impact voor één kubieke meter beton berekend op 0,000820 Pt/m³. Net zoals bij landgebruik, ligt dit niet in dezelfde grootteorde als de lasten van module D1. Hoewel er verschillende machines zijn en de bijdrage daardoor enigszins vergroot, zal de machine-impact in dit onderzoek verwaarloosd worden.

Bouw machine (Pt/piece)	1540
# draaiuren per jaar	1450
Levensduur (jaar)	15
Totaal # uur	21750
Totaal # min	1305000
Capaciteit (ton/h)	200
#min voor 1m ³ beton	0,695
Impact voor 1m ³ beton (Pt)	0,000820

Tabel 4.2: Machine-impact productie recyclage (D1)

4.2 Hoogwaardige recyclage versus storten

In wat volgt, worden de aannames toegepast op de twee hoofdcases beschreven in de Methodologie, het *best-case scenario* (CASE 1, hoogwaardige recyclage van granulaten) en het *worst-case scenario* (CASE 2, storten) voor de eindelevensduurbehandeling van beton. In Tabel 4.3 en Figuur 4.3 is de vergelijking van de resultaten numeriek en grafisch weergegeven. Beide cases hebben dezelfde milieuscore voor module A. Gezien de focus ligt op de eindelevensduurbehandeling, worden enkel module C en module D uitvoerig besproken.

MILIEU-IMPACT (Pt/m ³)	CASE 1 - 1,7%	CASE 2 - 1,7%
A1-A3: Productiefase - BETON	9,841	9,841
A1-A3: Productiefase - STAAL	18,218	18,218
A4: Transport constructie	0,460	0,460
C1: Destructie en sloop	0,537	0,537
C2: Transport	0,421	0,191
C4: Storting afval	0,033	0,626
D1: Proces betonrecyclage	0,147	0,000
D2: Transport	0,253	0,000
D3: Voordelen - BETON	-0,606	0,000
D3: Voordelen - STAAL	-4,520	-4,520
D4: Storting afval	0,240	0,000

Tabel 4.3: EOL: Hoogwaardige recyclage (CASE 1) versus Storten (CASE 2) - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt.

Module C

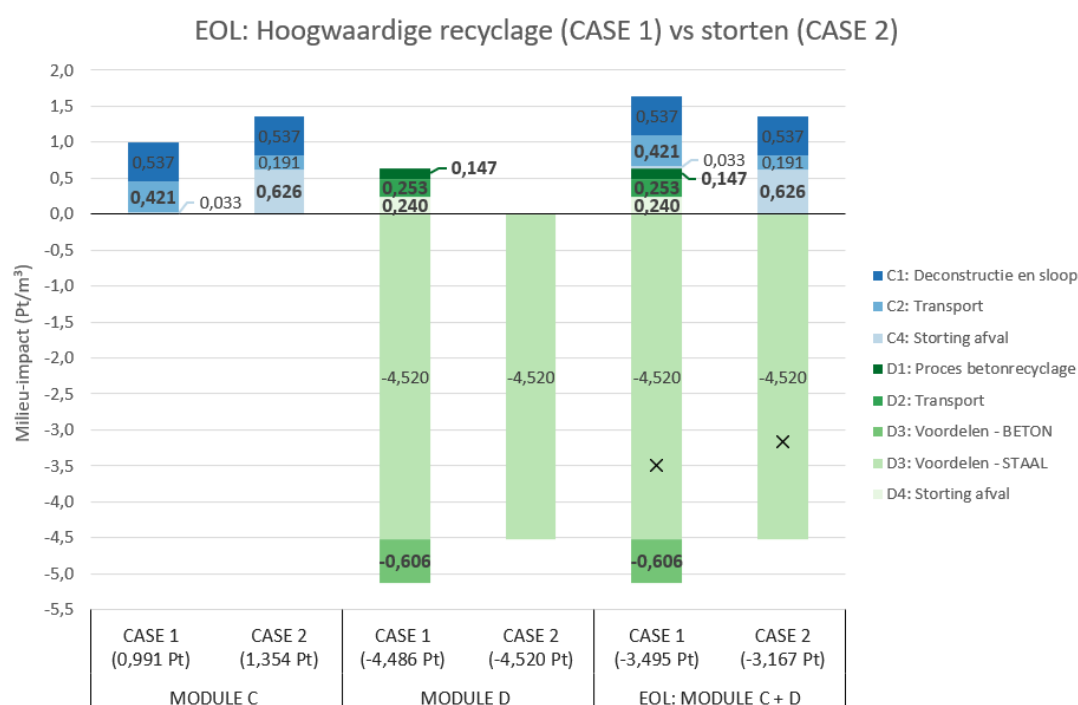
De twee cases specificeren een andere eindelevensduurbehandeling, waardoor ze tot en met de deconstructie en sloop van het gebouw (C1) dezelfde milieu-impact vertonen. Daarna is er een eerste onderscheid door het verschil in transportafstanden van de S4 naar enerzijds Aclagro en anderzijds Degetec. De afstand tot Aclagro is slechts de helft van die van Degetec. Gezien bij hoogwaardige recyclage 95% van het beton gerecycleerd wordt en dus getransporteerd wordt naar Degetec, brengt dit een hogere milieu-impact met zich mee. Daartegenover geldt voor de generieke transportafstanden van staal een grotere impact per ton kilometer, wat echter minder invloed heeft op het geheel door de lagere massa van het staal, 132,6 kg ten opzichte van 2276 kg voor het beton. Daarnaast is er bij hoogwaardige recyclage logischerwijs een lagere impact toegekend aan C4, gezien hierin slechts de stortimpact van 5% van de materialen zit.

Module D

Gezien module D de voordelen en lasten van recyclage en hergebruik inreken, is er enkel een milieu aandeel ten gevolge van recyclage van staal in het stortscenario (CASE 2). Staalrecyclage is verantwoordelijk voor een groter aandeel ten opzichte van de andere impacten van module D. Hier wordt echter niet verder op ingegaan, gezien dit al veelvuldig gebeurt en de

4 Resultaten eindelevensduur

focus van het onderzoek ligt op beton. De voordelen van betonrecyclage zijn minder opvallend, maar impliceren wel degelijk een voordeel. Hoewel in deze module bijkomende lasten zitten ten gevolge van het recyclageproces, het transport van de verliesmaterialen en het storten ervan, wordt 95% van de lasten van module D door het betonvoordeel opgeheven. Wanneer er dus enkel naar het beton wordt gekeken, is de totale impact van module D een last.



Figuur 4.3: EOL: Hoogwaardige recyclage (CASE 1) versus Storten (CASE 2) - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis.

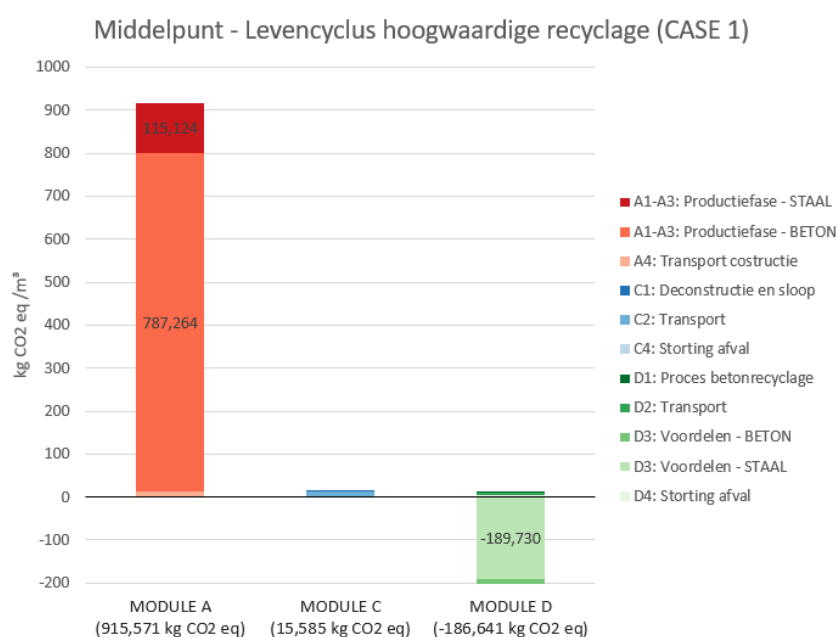
Eindelevensduur

Aangezien het lastig is om een algemeen beeld te krijgen van welke eindelevensduurbehandeling de laagste milieu-impact met zich meebrengt, wordt er gekeken naar de totale EOL. Hoogwaardige recyclage tot granulaten heeft namelijk een hogere milieulast door het extra transport van zowel de S4 naar Degetec als van Degetec naar Aclagro. Dit resulteert in transport impact die 3,5 keer zo groot is als bij het rechtstreeks storten (CASE 2). Daartegenover is de totale stortimpact (C4 en D4) voor CASE 1 bijna 2,5 keer lager, gezien het merendeel van het betonpuin hergebruikt wordt.

Module D laat toe om de voordelen van recyclage en hergebruik mee te nemen, wat een aanzienlijke invloed kan hebben op de totale levenscyclus. Alle lasten over de hele levenscyclus bij hoogwaardige recyclage worden becijferd op 30,150 Pt voor een kubieke meter beton, hoewel alle voordelen -5,126 Pt zijn. Door de eindelevensduur uitgebreid mee te nemen, kan 17% van de lasten gereduceerd worden door de materiaalvoordelen. Wanneer de invloed van de recyclage van staal buiten beschouwing wordt gelaten, is er slechts een reductie van 2% van de lasten van het proces ten gevolge van recyclage van beton. Toch is het van belang om dit voordeel te erkennen, zeker op grotere schaal, om de druk op de primaire grondstoffen te reduceren.

4.2.1 Middelpuntcategorie: Global Warming Potential

Zoals aangehaald, zijn er verschillende middelpuntcategorieën, die elk een bepaalde impact hebben op het milieu. Een van de hoofdcategorieën bij beton is de klimaatsverandering of meer specifiek het GWP. Deze impact wordt uitgedrukt in kg CO₂-equivalent, waarbij CO₂ de referentie is. Gezien de betonproductie, of meer specifiek het cement in het beton, een aanzienlijke CO₂-uitstoot met zich meebrengt, is het een zinvolle impactcategorie om te bekijken. De algemene levenscyclus wordt weergegeven in Figuur 4.4, waarna Figuur 4.5 de eindelevensduur weergeeft, telkens met een aangenomen wape-ningspercentage van 1,7%.



Figuur 4.4: Levenscyclus hoogwaardige recyclage - *Global Warming Potential*

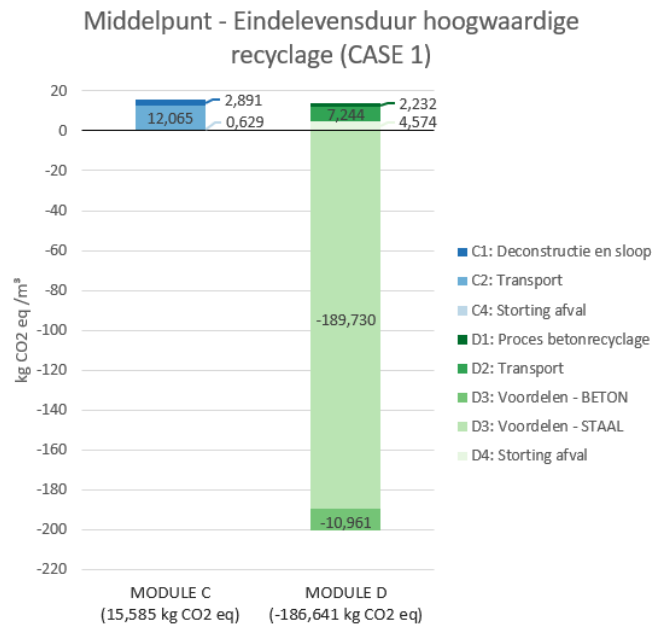
De productie van beton is duidelijk verantwoordelijk voor het grootste aandeel van de CO₂-inbreng door de productie van de cementklinker. Het voordeel van betonrecyclage kan slechts 1,4% van de productie van het beton opheffen, gezien het CO₂-aandeel voornamelijk afkomstig is van het cement. Dit wordt door de gerecycleerde granulaten niet vermeden. Wanneer er enkel wordt gekeken naar module D, Figuur 4.5, wordt 78% van de lasten van GWP opgeheven door de voordelen van betonrecyclage, hoewel het bij de single score 95% is. Het voordeel van hoogwaardige granulaten brengt dus geen bepalend voordeel met zich mee bij de meest kritische uitstoot van beton, namelijk CO₂. Bij dit deelonderzoek moet men onthouden dat het niet correct is om slechts één impactcategorie te bekijken. Dit is meteen duidelijk door de staalproductie en -recyclage, die zijn opgebouwd uit andere processen en zo foutieve resultaten weergeven.

4.2.2 Extra cementgebruik

Zoals besproken in de literatuurstudie, hebben hoogwaardig gerecycleerde granulaten een verminderde kwaliteit ten opzichte van natuurlijke granulaten. Dit wordt normaal gezien meegenomen via de kwaliteitsratio, R_{Rout}/Q_{Sub} , in de formule van module D, Formule 2.3. Het is dus optimistisch om enkel de voordelen van de gerecycleerde granulaten in rekening te

4 Resultaten eindelevensduur

brengen en niet de gevolgen die met het gebruik ervan gepaard gaan in de tweede levenscyclus. Om alsnog dezelfde sterkte te kunnen behalen, is het nodig om 5% extra cement toe te voegen in de samenstelling van het secundaire beton. Dit wordt gekwantificeerd aan de hand van een vergelijking tussen de productiefase van het beton met natuurlijke granulaten en met RA's waarin 5% meer cement zit.



Figuur 4.5: Eindelevensduur hoogwaardige recyclage - *Global Warming Potential*

Om tot een FE van een kubieke meter secundair beton te komen, moet de samenstelling, weergegeven in Tabel 3.1 opnieuw worden bepaald. Aangezien de W/C 0,34 moet blijven, wordt de hoeveelheid water afgeleid uit de hoeveelheid cement via Formule 4.1 (Grünwald, 2020). De resterende hoeveelheid granulaten en zand is bepaald op basis van hun volume-aandelen in de originele betonsamenstelling. Hoewel er in het secundaire beton ook vaak meer superplastificeers worden gebruikt, worden er in deze studie geen extra toevoegsels meegenomen door hun beperkte aandeel. De uiteindelijke betonsamenstelling wordt weergegeven in Tabel 4.4.

$$\frac{V_w}{V_c} = \frac{\rho_c}{\rho_w} \cdot \frac{W}{C} \quad (4.1)$$

	Massa (kg)	Dichtheid (kg/m ³)	Volume (m ³)
Portlandcement	394,8	2796	0,141
Granulaten	831,4	2620	0,317
Zand	1074,3	2640	0,407
Water	133,4	1000	0,133
Toevoegsels	2,72	2200	0,001

Tabel 4.4: Betonsamenstelling secundair beton

4 Resultaten eindelevensduur

Als extra gevoeligheid op de invloed van de kwaliteitsvermindering, wordt het meermaals recycleren van beton meegenomen als derde scenario. Wanneer beton voor een tweede keer zou gerecycleerd worden, zal er logischerwijs meer aangehecht mortel aan de granulaten hangen. Hierdoor zal de kwaliteit lager zijn waardoor het 'tertiair' beton nog meer cement nodig heeft om dezelfde sterkteklasse te behalen. Gezien hoogwaardige recyclage van beton tot granulaten nog geen courante praktijk is, zijn er geen concrete gegevens over meermaals recycleren. Om toch een inschatting te kunnen maken, wordt 10% extra cement aangenomen als vergelijkingspunt. De betonsamenstelling van dit 'tertiaire' beton wordt weergegeven in Tabel 4.5.

	Massa (kg)	Dichtheid (kg/m ³)	Volume (m ³)
Portlandcement	413,6	2796	0,148
Granulaten	816,4	2620	0,312
Zand	1054,9	2640	0,400
Water	139,7	1000	0,140
Toevoegsels	2,72	2200	0,001

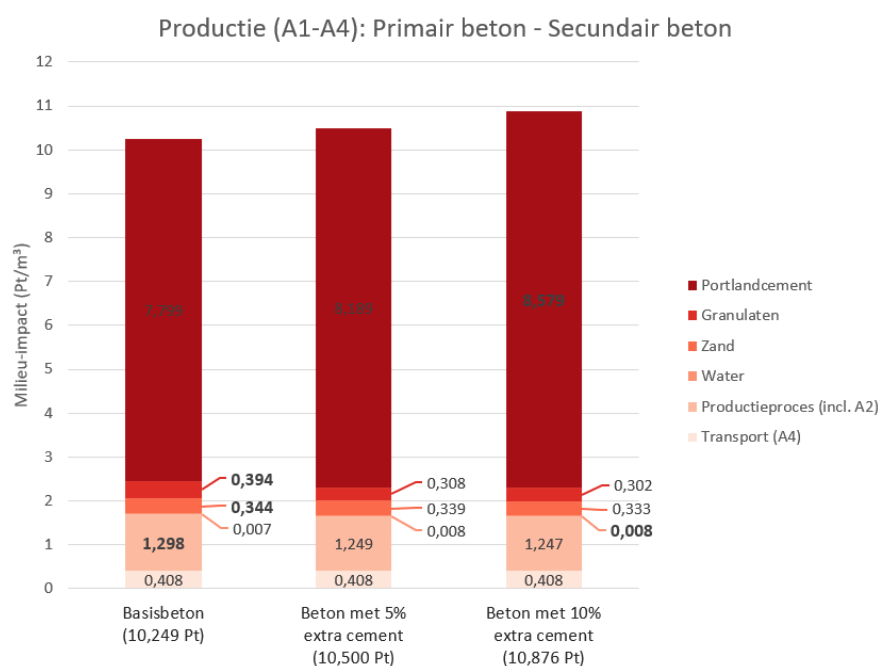
Tabel 4.5: Betonsamenstelling tertiair beton

De gerecycleerde granulaten hebben door hun verminderde prestaties een gelimiteerd vervangingspercentage van 20% in structureel beton. Hoewel de kwaliteit nog vermindert na een tweede keer recycleren, wordt er ook een vervangingspercentage van 20% aangenomen. De hoeveelheid granulaten in de volgende levenscyclus bestaan dus uit een combinatie van RA's en een groter aandeel van 80% natuurlijke granulaten. Gezien in dit onderzoek de lasten en de voordelen van module D worden meegenomen in de eerste levenscyclusfase, zijn er geen lasten in module A1 en A3 ten gevolge van de 20% RA's. Het transport van de gerecycleerde granulaten naar de betoncentrale wordt wel meegenomen gezien de functionele equivalentie net na de recyclage-installatie ligt, zie Figuur 3.4. Het is echter complex om de toekomstige betoncentrale en dus de transportafstand vast te leggen, waardoor de generieke aannames van OVAM (2013) worden gebruikt. De productiefase van het effect van RA's in beton met 5% en 10% extra cement wordt in combinatie met de primaire betonproductie weergegeven in Tabel 4.6 en Figuur 4.6.

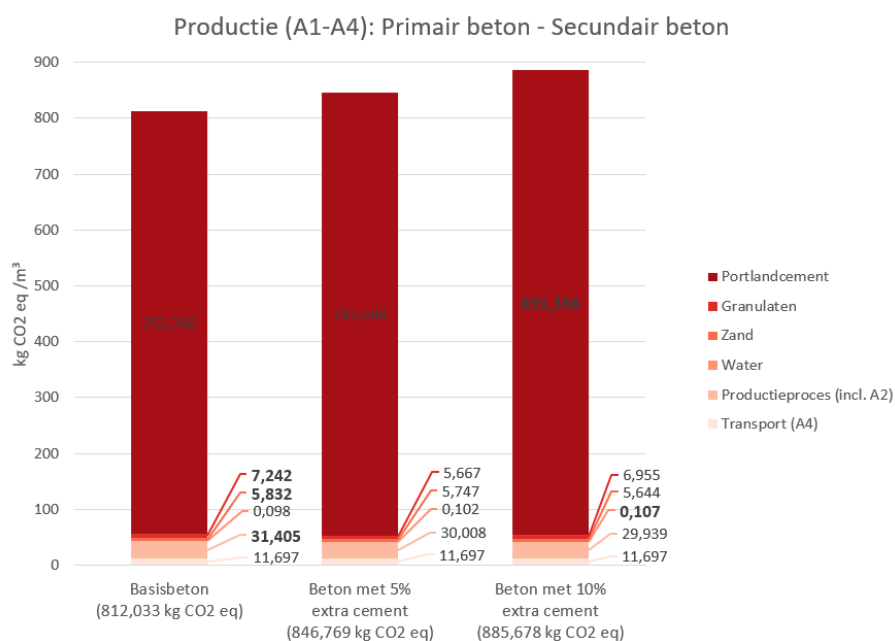
MILIEU-IMPACT (Pt/m ³)	Basisbeton	Beton met 5% meer cement	Beton met 10% meer cement
Productieproces (incl. A2)	1,298	1,249	1,247
Portlandcement	7,799	8,189	8,579
Granulaten	0,394	0,308	0,302
Zand	0,344	0,339	0,333
Water	0,007	0,008	0,008
Transport (A4)	0,408	0,408	0,408
Totaal module A	10,249	10,500	10,876

Tabel 4.6: Productiefase: basisbeton, beton met 5% meer cement en beton met 10% meer cement - Voor elk materiaal wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt.

4 Resultaten eindelevensduur



Figuur 4.6: Productiefase: basisbeton, beton met 5% meer cement en beton met 10% meer cement - Voor elk materiaal wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt.



Figuur 4.7: Productiefase: basisbeton, beton met 5% meer cement en beton met 10% meer cement - *Global Warming Potential* - Voor elk materiaal wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt.

4 Resultaten eindelevensduur

Door de toename van 5% en 10% van de massa van het cement, stijgt de milieu-impact evenredig. Hetzelfde geldt voor de impact van water gezien de W/C onveranderlijk blijft. Daarnaast heeft de milieuscore van de granulaten een reductie van 22% en 23% voor respectievelijk 5% en 10% extra cement ten opzichte van de oorspronkelijke impact. Dit is te wijten aan enerzijds een vermindering van de hoeveelheid granulaten om tot een kubieke meter beton te komen voor de FE en anderzijds het gebruik van 20% RA's waaraan geen milieu-impact wordt toegekend. Verder heeft de verminderde hoeveelheid van het zand en de vermeden transportafstanden van de 20% RA's (A2) relatief weinig invloed op de milieu-impact.

In totaal zorgen enerzijds de stijging van de hoeveelheid cement en anderzijds het gebruik van 20% granulaten voor een stijging van de milieu-impact met 2,45% voor 5% extra cement en 6,12% voor 10% extra cement. Wanneer de vermeden lasten van de RA's niet zouden meegerekend worden, is er een productiestijging van respectievelijk 3,28% en 7,01%. Gezien extra cement een hogere CO₂-uitstoot met zich meebrengt, wordt in Figuur 4.7 het GWP weergegeven, uitgedrukt in kg CO₂-eq/m³. Het portlandcement neemt overduidelijk de overhand. De andere componenten dragen voor het basisbeton slechts 6,93% bij, voor het beton met 5% extra cement slechts 6,29% en voor het beton met 10% extra cement slechts 6,14%. Hoewel het gebruik van RA's zorgt voor een reductie van de milieu-impact, zorgt beton met een extra aandeel cement voor een toename van de milieu-impact met respectievelijk 4,23% en 9,07% ten opzichte van het originele beton.

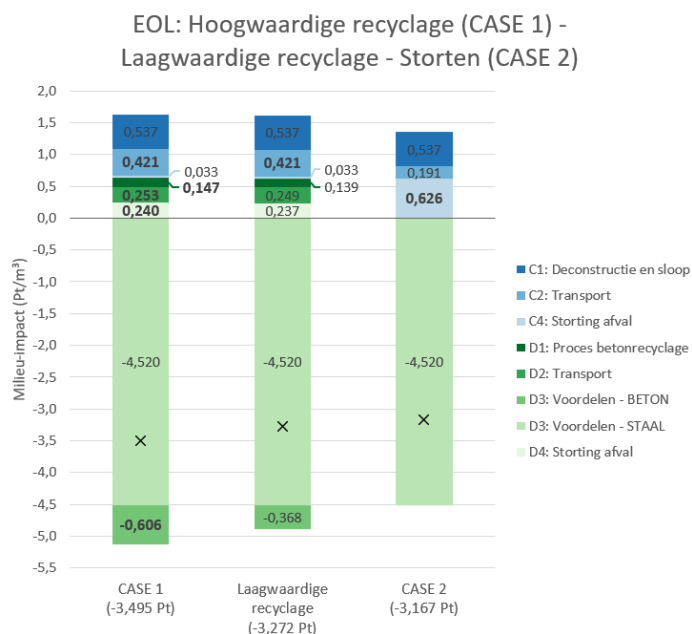
4.2.3 Laagwaardige recyclage

Momenteel is hoogwaardige recyclage van beton nog niet gebruikelijk, maar storten is dan weer te pessimistisch als weergave van de realiteit. Het meeste betonpuin wordt in België namelijk laagwaardig gerecycleerd en dus gebruikt in wegenbouw en dergelijke. Hoewel primaire granulaten bij de wegenbouw worden vermeden, geldt dit niet voor de granulaten van structureel beton door de hogere kwaliteitsvereisten. Dit is het principe van downcycling, waarbij er slechts een beperkter voordeel aan de levenscyclus wordt toegekend door vermeden primaire granulaten. Om de realiteit van vandaag de dag te plaatsen binnen de reeds besproken hoofdscenario's, wordt in Tabel 4.7 en Figuur 4.8 de vergelijking gemaakt van de EOL tussen het optimistische (CASE 1), pessimistische (CASE 2) en realistische scenario.

MILIEU-IMPACT (Pt/m ³)	CASE 1: Hoogwaardige recyclage	Laagwaardige recyclage	CASE 2: Storten
A1-A3: Productiefase - BETON	9,841	9,841	9,646
A1-A3: Productiefase - STAAL	18,218	18,218	18,218
A4: Transport constructie	0,460	0,460	0,460
C1: Destructie en sloop	0,537	0,537	0,537
C2: Transport	0,421	0,421	0,191
C4: Storting afval	0,033	0,033	0,626
D1: Proces betonrecyclage	0,147	0,139	0,000
D2: Transport	0,253	0,249	0,000
D3: Voordelen - BETON	-0,606	-0,368	0,000
D3: Voordelen - STAAL	-4,520	-4,520	-4,520
D4: Storting afval	0,240	0,237	0,000

Tabel 4.7: Hoogwaardige recyclage, laagwaardige recyclage en storten van betonpuin - Hoogste milieu-impact is vetgedrukt.

4 Resultaten eindelevensduur



Figuur 4.8: EOL: Hoogwaardige recyclage, laagwaardige recyclage en storten van betonpuin - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste score vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis.

Hoewel module C gelijk blijft voor zowel hoogwaardige als laagwaardige recyclage, zit er voor module D een verschil in elk onderdeel, afgezien van staalrecyclage. Doordat de kwaliteit van de granulaten bij laagwaardige recyclage minder van belang is dan bij hoogwaardige recyclage, is er geen nood aan een wasinstallatie in het recyclageproces (D1). Zowel het verbruik van de trommelzeef als van de vijf elektrische motoren worden dus niet meegenomen. Hierdoor kan de transport impact in sommige gevallen gedeeltelijk wegvallen gezien plaatselijke recyclage mogelijk is. Hier wordt echter een stationaire recyclage-installatie aangenomen. Daarnaast is er bij D2 en D4 een afname van de impact bij laagwaardige recyclage, aangezien er geen materiaalverlies van de wasinstallatie is. Dit is echter beperkt omdat het om een verschil van slechts twee volumeprocent gaat. Als laatste worden er door de laagwaardige recyclage minder milieuvoordelen toegekend aan D3, gezien de primair vermeden materialen van de wegenbouw een lagere impact met zich meebrengen.

De lasten van de eindelevensduurbehandeling van laagwaardige recyclage zijn dus ongeveer dezelfde als die van hoogwaardige recyclage en zo ook hoger dan de lasten ten gevolge van storten. De voordelen die worden meegerekend bij laagwaardige recyclage zijn slechts 60% van de voordelen ten gevolge van hoogwaardige recyclage. Hierdoor heeft laagwaardige recyclage een hogere milieuscore voor de EOL. Hoewel er geen primaire materialen voor de productie van structureel beton vermeden worden, wordt er door laagwaardige recyclage toch ingespeeld op de grondstofschaarste, wat dan weer niet wordt meegenomen in een LCA.

4.3 Hergebruik breeksand

Zoals aangehaald in de literatuurstudie, is het hergebruik van breeksand, met name de verliesmaterialen van de breker en de zeef, op dit moment niet toegelaten in beton door de vele onzuiverheden. Om de relevantie naar verder onderzoek via de milieu-impact te kwantificeren, wordt het recyclen van breeksand meegenomen in het scenario van hoogwaardige recycling van granulaten. Hierbij wordt er een vergelijking gemaakt tussen de milieu-impact van de eindelevensduurbehandeling zonder en met hergebruik van breeksand. Wat betreft de aangenomen hoeveelheden wordt verondersteld dat 100% van de verliesmaterialen van de breker en de zeefinstallatie hergebruikt worden als zand. Dit betekent dat 38% van het originele betonpuin als breeksand gerecycleerd wordt. Tabel 4.8 en Figuur 4.9 geven de uiteindelijke resultaten weer.

MILIEU-IMPACT (Pt/m ³)	CASE 1 - Recyclage granulaten	Extra gebruik breeksand
A1-A3: Productiefase - BETON	9,841	9,841
A1-A3: Productiefase - STAAL	18,218	18,218
A4: Transport constructie	0,460	0,460
C1: Destructie en sloop	0,537	0,537
C2: Transport	0,421	0,421
C4: Storting afval	0,033	0,033
D1: Proces betonrecyclage	0,147	0,147
D2: Transport	0,253	0,007
D3: Voordelen - BETON	-0,606	-0,884
D3: Voordelen - STAAL	-4,520	-4,520
D4: Storting afval	0,240	0,006

Tabel 4.8: EOL: Hoogwaardige recycling van granulaten zonder en met hergebruik breeksand - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt.

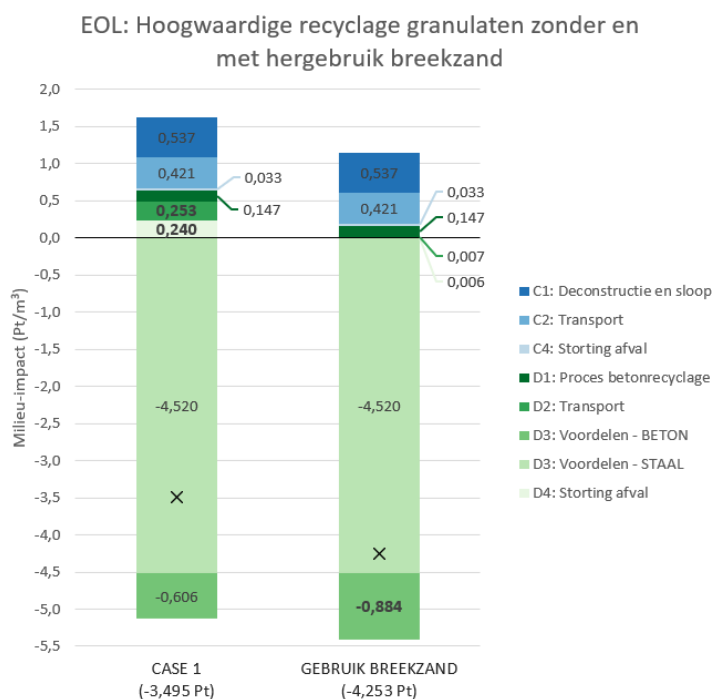
Module D

De milieu-impact van het recyclageproces blijft gelijk, aangezien het breeksand als verliesmateriaal eruit ontstaat. Door het hergebruik wordt er slechts een klein aandeel, namelijk het 2 volumeprocent materiaalverlies van de wasinstallatie, van Degetec naar Aclagro getransporteerd en daar gestort. Dit resulteert in een lagere milieu-impact voor zowel module D2 als D4. Naast de daling van milieulast is er een groter milieuvoordeel door het vermeden primair materiaalgebruik van zand. Zo nemen de voordelen van betonrecyclage met 50% toe bij hergebruik van breeksand.

Eindelevensduur

Wanneer er wordt gekeken naar de eindelevensduur, met name module C en D, kan 77% van de lasten bij hergebruik van breeksand worden opgeheven door de voordelen van betonrecyclage. Daartegenover is dit slechts 37% van de lasten voor hoogwaardige recycling van granulaten waarbij geen breeksand wordt hergebruikt. Wanneer het gebruik ervan toegelaten zou worden in structureel beton, kan dit een extra milieuvoordeel met zich meebrengen zonder bijkomende lasten.

4 Resultaten eindelevensduur



Figuur 4.9: EOL: Hoogwaardige recyclage granulaten zonder en met hergebruik breeksand - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis.

Dezelfde kanttekening kan echter gemaakt worden als in 4.2.2 aangezien de verminderde kwaliteit van het zand een andere betonsamenstelling kan vragen en een maximaal vervangingspercentage heeft. Daarnaast zullen er in de toekomst verdere proceslasten worden toegekend aan module D om de onzuiverheden te beperken. Het hier vooropgestelde scenario is aldus optimistisch en door de voordelige resultaten is verder onderzoek nodig. In dit onderzoek wordt er echter niet verder op ingegaan.

4.4 Koolstofdioxide-captatie

Naast het negatieve effect van carbonatatie van beton, brengt het ook iets positiefs teweeg, namelijk CO₂-captatie. Een betonnen constructie wordt gedurende zijn hele levensduur slechts beperkt blootgesteld aan de buitenlucht. Wanneer betonpuin echter gebroken wordt, neemt het blootstellingsoppervlak en dus ook het carbonatatieproces aanzienlijk toe. Hoeveel CO₂ kan opgenomen worden in het beton is afhankelijk van veel factoren, waaronder de grootte van de gebroken granulaten, de duur van de blootstelling, de carbonatatie diepte en -graad, het al dan niet keren van de granulaten tijdens het blootstellen, etc. (ISO, 2017). In de literatuur zijn er dan ook heel uiteenlopende waarden, waarover geen consensus te vinden is.

De maximaal opneembare hoeveelheid CO₂ kan berekend worden op basis van de hoeveelheid CaO in het cement. In de aangenomen betonsamenstelling zit 376 kg portlandcement, Tabel 3.1. Dit bestaat voor 65% uit CaO, wat dus 244,4 kg is (Grünwald, 2020). Op basis van stoichiometrie, kan maximaal 50% van CaO carbonateren (Gupta and Fan, 2002). Er kan dus ten hoogste 122,2 kg CO₂ in een kubieke meter beton opgenomen worden. Algemeen valt de CO₂-captatie tijdens de eindelevensduur binnen een bereik van 5 tot 25 kg CO₂ per kubieke meter beton (Stripple et al., 2021; ISO, 2017; Stripple, 2013;

4 Resultaten eindelevensduur

Kikuchi and Kuroda, 2011). Daarnaast zijn er ook uitschieters door bedrijven die zich focussen op het carbonatatieproces. Zo claimt FastCarb een CO₂-captatie te hebben van 92,64 kg CO₂/m³ beton, wat dichtbij de maximaal opneembare CO₂ hoeveelheid komt. Hierbij maken ze gebruik van een versneld proces door middel van geconcentreerde stroom via een cementoven (Febelcem, 2021).

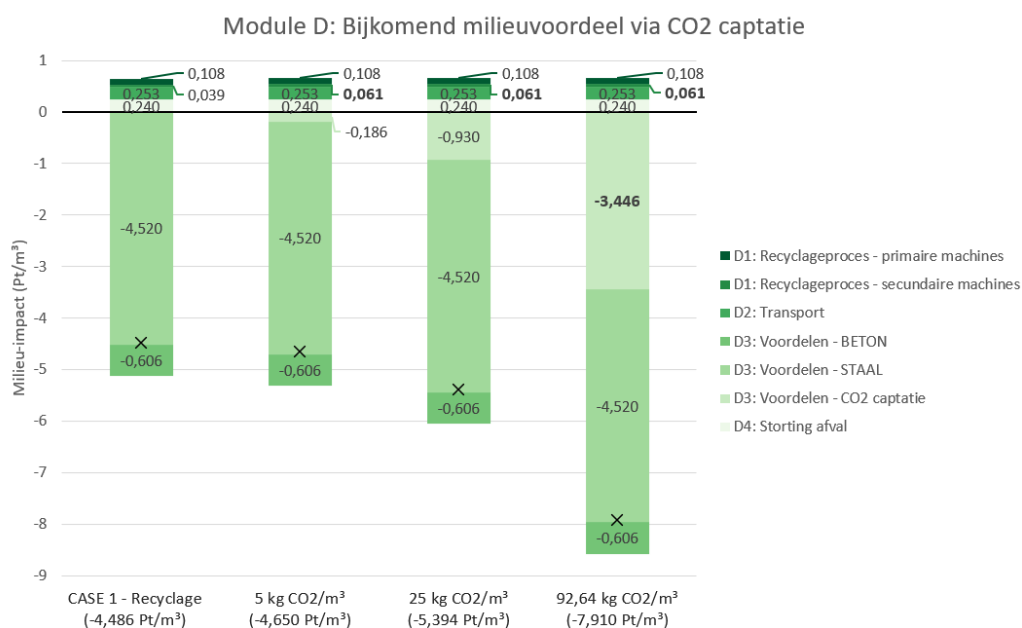
Om de invloed van CO₂-captatie en de opgenomen hoeveelheid te onderzoeken, wordt de milieu-impact van module D voor vier verschillende scenario's vergeleken. Als basis wordt het hoogwaardig recycleren van granulaten meegenomen (CASE 1). Hierbinnen wordt er al dan niet een bepaalde hoeveelheid CO₂-opname ingerekend, respectievelijk 0, 5, 25 en 92,64 kg CO₂/m³ beton. In het recyclageproces (D1) wordt er een extra wiellader meegenomen om het gebroken betonpuin te verspreiden. De granulaten moeten hierna voor een bepaalde tijd blootgesteld worden aan de buitenlucht, wat gepaard gaat met een extra impact ten gevolge van landgebruik. Net zoals in de andere scenario's wordt deze impact buiten beschouwing gelaten. De resultaten van dit deelonderzoek worden weergegeven in Tabel 4.9 en Figuur 4.10.

MILIEU-IMPACT (Pt/m ³)	Recyclage	5 kg CO ₂ /m ³	25 kg CO ₂ /m ³	92,64 kg CO ₂ /m ³
D1: Recyclageproces - primaire machines	0,108	0,108	0,108	0,108
D1: Recyclageproces - secundaire machines	0,039	0,061	0,061	0,061
D2: Transport	0,253	0,253	0,253	0,253
D3: Voordelen - BETON	-0,606	-0,606	-0,606	-0,606
D3: Voordelen - STAAL	-4,520	-4,520	-4,520	-4,520
D3: Voordelen - CO ₂ captatie	0,000	-0,186	-0,930	-3,446
D4: Storting afval	0,240	0,240	0,240	0,240

Tabel 4.9: Module D: Hoogwaardige recyclage van granulaten en CO₂-captatie - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt. Onder primaire machines vallen de werkelijke breker, zeef en wasinstallatie. Onder secundaire machines vallen de nodige kranen, wielladers en trommelzeef.

De lasten van de primaire machines, met name de breker, zeef en wasinstallatie blijven gelijk. In tegenstelling tot de secundaire machines, waarbij een extra wiellader aangenomen is voor de spreiding van de gebroken granulaten. Deze extra wiellader zorgt voor een stijging van 15% van de lasten van het recyclageproces (D1). Dit aandeel wordt echter in alle gevallen opgeheven door de voordelen. De andere onderdelen van module D blijven gelijk, met uitzondering van een al dan niet extra voordeel ten gevolge van de CO₂-opname (D3). Afhankelijk van de aangenomen hoeveelheid kg CO₂/m³ beton zijn er sterke verschillen in de milieuvoordelen. Een lagere CO₂-opname kan enkel de lasten van het recyclageproces opheffen, terwijl het versnelde captatieproces van FastCarb in bijna dezelfde grootteorde ligt als staalrecyclage. Hoewel er grote verschillen zijn, kan algemeen gesteld worden dat CO₂-captatie een voordeel met zich meebrengt. Daarnaast heeft het ook een positief effect op de mechanische eigenschappen van de granulaten, gezien het reactieproduct CaCO₃ de poriën vult wat resulteert in een grotere dichtheid en een lagere waterabsorptie (Zhang et al., 2015). Hierdoor vermindert het kwaliteitsverschil tussen de RA's en NA's, wat een invloed kan hebben op de tweede levenscyclus en het maximaal vervangingspercentage. Hierop wordt echter niet verder ingegaan in deze studie.

4 Resultaten eindelevensduur



Figuur 4.10: Module D: Hoogwaardige recyclage van granulaten en CO₂-captatie - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste score vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis. Onder primaire machines vallen de werkelijke breker, zeef en wasinstallatie. Onder secundaire machines vallen de nodige kranen, wielladers en trommelzeef.

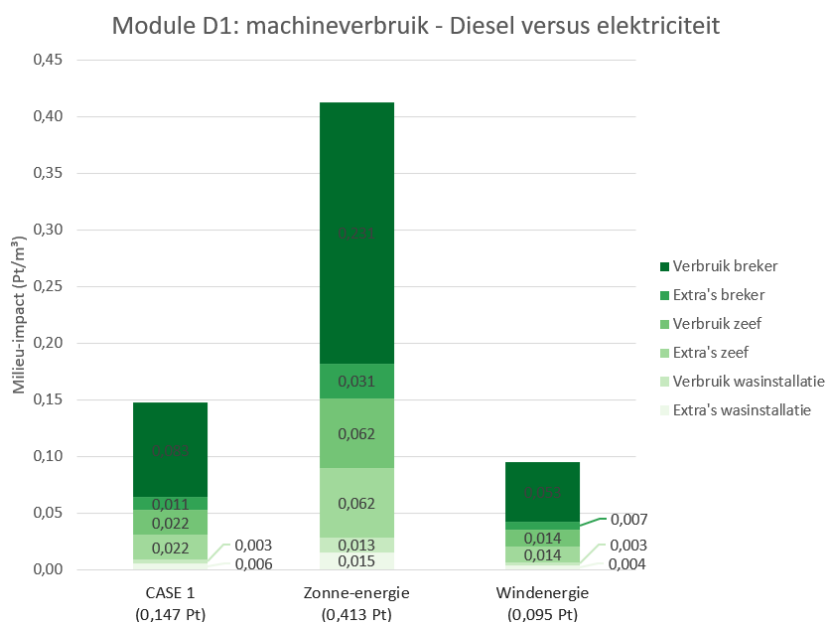
4.5 Elektriciteit versus diesel

Het recyclageproces van Degetec werkt, met uitzondering van de wasinstallatie, op diesel. Volgens de literatuur worden stationaire processen echter voornamelijk aangedreven op elektriciteit (Borghi et al., 2018). Om het belang van de keuze van de brandstof te achterhalen, wordt er een onderscheid gemaakt tussen het proces van Degetec, een proces op zonne-energie en één op windenergie. Om het gekende verbruik per machine in diesel om te zetten naar het verbruik in elektriciteit wordt een conversiefactor gebruikt. Zo komt een liter diesel overeen met 10,580 kWh elektriciteit (CarbonTrust, 2020). In Tabel 4.10 en Figuur 4.11 is de milieu-impact van de lasten van het recyclageproces weergegeven (D1). Hierbij is er een onderscheid gemaakt tussen de drie hoofdmachines, met name de breker, zeef en wasinstallatie, en de bijhorende hulpmachines.

MILIEU-IMPACT (Pt/m ³)	Recyclage	Zonne-energie	Windenergie
Verbruik breker	0,083	0,102	0,053
Extra's breker	0,011	0,014	0,007
Verbruik zeef	0,022	0,027	0,014
Extra's zeef	0,022	0,027	0,014
Verbruik wasinstallatie	0,003	0,006	0,003
Extra's wasinstallatie	0,006	0,007	0,004

Tabel 4.10: Module D1: Diesel, zonne-energie en windenergie - Met extra's worden hulpmachines zoals wielladers, hydraulische kranen en een trommelzeef bedoeld.

4 Resultaten eindelevensduur



Figuur 4.11: Module D1: Diesel, zonne-energie en windenergie - Met extra's worden hulpmachines zoals wielladers, hydraulische kranen en een trommelzeef bedoeld.

In Figuur 4.11 wordt het aandeel van de verschillende stappen in het recyclageproces zichtbaar. De breker is duidelijk verantwoordelijk voor het grootste aandeel van de milieu-impact van D1. Daartegenover heeft de wasinstallatie met bijhorende trommelzeef bijna geen invloed. Deze twee installaties vallen weg bij het proces van laagwaardige recyclage, waardoor de verminderde lasten geen grote impact zullen hebben.

Op het eerste zicht wordt duidelijk dat zonne-energie de hoogste milieu-impactscore heeft en het proces op windenergie de laagste. Het proces van Degetec ligt tussen beiden. Gezien de wasinstallatie van Degetec werkt op elektriciteit van windmolens heeft dit onderdeel dezelfde milieuscore als bij windenergie. Algemeen kan men stellen dat module D1 enkel bij diesel en windenergie de laagste milieu-impact heeft van module D. Uitsluitend bij het gebruik van windenergie kunnen alle lasten van module D opgeheven worden door de voordelen van betonrecyclage. Bij het proces van Degetec kan 95% van de lasten opgeheven worden en bij gebruik van zonne-energie is dit slechts 67%.

Als verklaring van het grote milieu aandeel van elektriciteit door zonne-energie worden in Bijlage D de *network processen* van SimaPro weergegeven. Door beiden te vergelijken wordt snel duidelijk dat de milieuscore van zonne-energie voornamelijk te wijten is aan de productie van een zonnepaneel, wat veel ruwe materialen zoals koper en aluminium vraagt. Enkel en alleen het paneel bevat al een hogere milieuscore per kWh dan de totale impact van windenergie. Het is dus duidelijk dat de productie van een windturbine een aanzienlijk lagere materiaalimpact heeft.

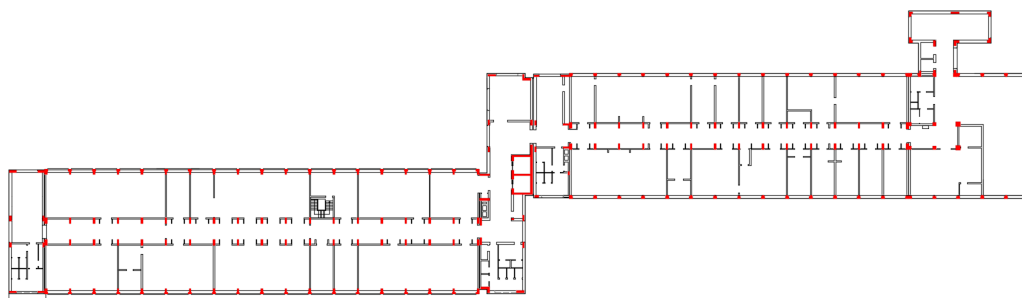
5

Case study S4

Om de resultaten in een meer realistische situatie te plaatsen, worden de verworven inzichten toegepast op een case study. Zoals aangehaald in de Methodologie, wordt er gebruik gemaakt van het universiteitsgebouw S4 op campus Sterre. Gezien de gebouwen van deze campus gebouwd zijn in de jaren 60 en dus het einde van hun levensduur bereiken, kan deze case study gebruikt worden om de verschillende mogelijkheden van de afvalverwerking te onderzoeken en de milieu-impact ervan te kwantificeren. Er wordt vertrokken van een reeds gestript gebouw tot op de betonnen structuur, weergegeven in rood in Figuur 5.1. De verschillende betonvolumes per niveau worden weergegeven in Tabel 5.1. Het totaal beschouwde volume is dus 7922,53 m³ beton. Hieronder worden de zes mogelijke EOL scenario's verder gedefinieerd.

	Levels (m ³)	Vloerplaten (m ³)	TOTAAL (m ³)
Niveau -1	805,66	956,32	1761,98
Niveau 0	127,28	956,32	1083,60
Niveau +1	126,92	956,32	1083,24
Niveau +2	126,65	956,32	1082,96
Niveau +3	125,38	956,32	1081,66
Niveau +4	84,38	956,32	1040,70
Niveau +5	10,04	635,28	645,32
Niveau +6	/	143,04	143,04
TOTAAL (m³)	1406,32	6516,21	7922,53

Tabel 5.1: Betonvolume S4 per niveau (m³)

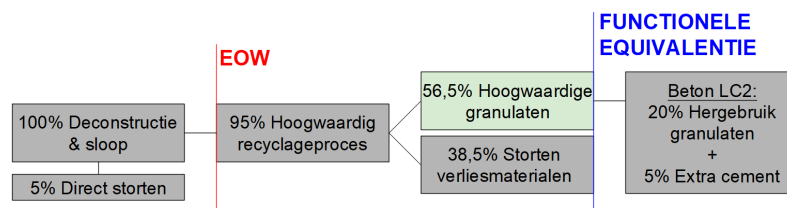


Figuur 5.1: Betonnen draagstructuur niveau 0

5.1 Scenario's

5.1.1 Hoogwaardige recyclage

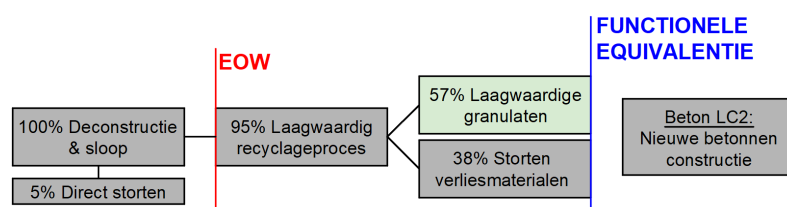
In het eerste scenario wordt er aangenomen dat het volledige betonvolume hoogwaardig gerecycleerd wordt. Hierdoor wordt er aan 56,5% van het oorspronkelijke volume een voordeel toegekend door vermeden primaire granulaten in structureel beton. De overige verliesmaterialen worden gestort op Aclagro. Daaropvolgend wordt in de tweede levenscyclus 20% van de RA's gebruikt voor de productie van het beton. De materiaalimpact (A1) daarvan wordt dus niet meegerekend. Naast het voordeel van de vermeden primaire granulaten, heeft het secundaire beton 5% extra cement nodig om dezelfde sterkteklasse te behalen. Dit zal resulteren in een extra last. Als gevolg van de aanname van de functionele equivalentie die net na het recyclageproces ligt, wordt de transport impact van de RA's naar de betoncentrale aan de tweede levenscyclus toegekend (A2). In dit scenario wordt er echter aangenomen dat het beton op de site van Degetec geproduceerd wordt, waardoor de transportafstand van de RA's 0 km is. In Figuur 5.2 is het scenario van hoogwaardige recyclage schematisch weergegeven.



Figuur 5.2: Scenario 1: Hoogwaardige recyclage - De percentages zijn ten opzichte van het oorspronkelijke 100% betonvolume. De grijze onderdelen brengen een last met zich mee, de groene een voordeel.

5.1.2 Laagwaardige recyclage

Het tweede scenario leunt het dichtste aan bij de realiteit van vandaag de dag in België. Het betonvolume wordt gerecycleerd en hergebruikt in laagwaardige toepassingen, zoals granulaten in de wegenbouw. Gezien de kwaliteitseisen van granulaten voor infrastructuur lager zijn dan voor structureel beton, verminderen de lasten ten gevolge van het recyclageproces omdat een wasinstallatie overbodig is (D1). Hierdoor zullen er ook minder materiaalverliezen zijn, hoewel dit een minimaal verschil geeft. Vermits andere primaire materialen gesubstitueerd worden, brengt dit een lager milieuvoordeel met zich mee. Daarnaast moet in de tweede levenscyclus van het gebouw een volledig nieuwe betonnen constructie geplaatst worden. Dit scenario is schematisch weergegeven in Figuur 5.3.



Figuur 5.3: Scenario 2: Laagwaardige recyclage - De percentages zijn ten opzichte van het oorspronkelijke 100% betonvolume. De grijze onderdelen brengen een last met zich mee, de groene een voordeel.

5.1.3 Storten

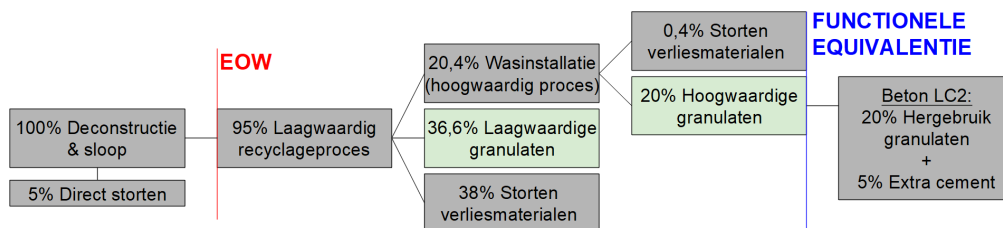
Als derde wordt er een soort *worst-case scenario* meegenomen, waarbij het gehele betonvolume wordt gestort op Aclagro, Figuur 5.4. Hoewel dit geen realistisch scenario is in België, wordt het ter volledigheid meegenomen in de vergelijking. Hierbij wordt er, met uitzondering van staalrecyclage, geen enkele milieulast of -voordeel in module D meegenomen. Gezien er geen vermeden primaire materialen zijn, wordt het gebouw vervangen door een volledig nieuwe betonnen constructie.



Figuur 5.4: Scenario 3: Storten - De percentages zijn ten opzichte van het oorspronkelijke 100% betonvolume. De grijze onderdelen brengen een last met zich mee.

5.1.4 Combinatie hoogwaardige en laagwaardige recyclage

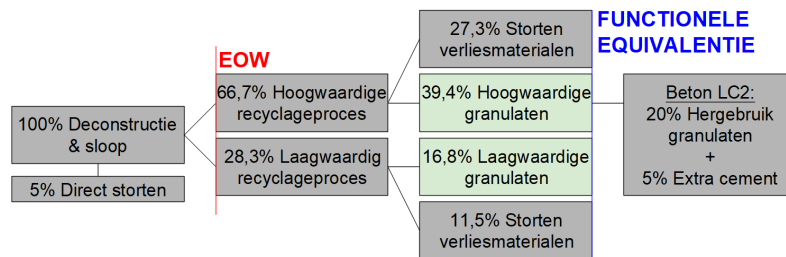
RA's hebben verminderde prestaties ten gevolge van de aangehechte mortel. Hierdoor is er een maximaal vervangingspercentage van 20% voor de RA's in secundair beton. Wanneer verschillende gebouwen worden afgebroken en hoogwaardig gerecycleerd, bekomt men van elk gebouw ongeveer 60% van het volume RA's. Er kan echter slechts 20% van het betonvolume met zekerheid hergebruikt worden in de nieuwe constructie. De overige 40% zal, afhankelijk van de vraag op dat moment, in hoogwaardige of laagwaardige constructies toegepast worden. Door de onzekerheid van het gebruik, kan het optimistisch zijn om voor de gehele constructie voordelen ten gevolge van vermeden primaire granulaten in te rekenen. In dit vierde scenario wordt er dus gedeeltelijk hoogwaardig en gedeeltelijk laagwaardig gerecycleerd. Het aandeel voor hoogwaardige recyclage wordt bepaald zodat er, naast de verliesmaterialen, 20% RA's overblijven die worden gebruikt in de tweede levenscyclus. Deze situatie wordt voorgesteld in Figuur 5.5.



Figuur 5.5: Scenario 4: Combinatie hoogwaardige en laagwaardige recyclage - De percentages zijn ten opzichte van het oorspronkelijke 100% betonvolume. De grijze onderdelen brengen een last met zich mee, de groene een voordeel.

5.1.5 Hoogwaardige recyclage van vloerplaten

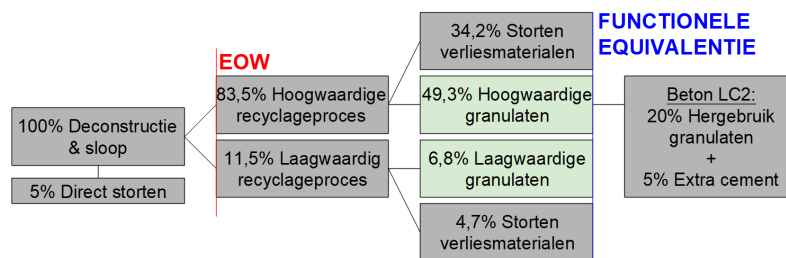
Voor het slopen is er een inspectie op de sloopwerf conform de TRACIMAT-richtlijnen. Daarbij wordt de sterkte niet-destructief gecontroleerd met behulp van een sclerometer. Indien men hoogwaardige granulaten wil produceren, mag de sterkte namelijk niet lager zijn dan C25/30. Hierdoor kunnen sommige structurele elementen niet hoogwaardig gerecycleerd worden. In dit scenario, weergegeven in Figuur 5.6, wordt aangenomen dat enkel de vloerplaten en dus 70% van het betonvolume hoogwaardig gerecycleerd worden. De overige elementen worden laagwaardig gerecycleerd.



Figuur 5.6: Scenario 5: Hoogwaardige recyclage van vloerplaten - De percentages zijn ten opzichte van het oorspronkelijke 100% betonvolume. De grijze onderdelen brengen een last met zich mee, de groene een voordeel.

5.1.6 Hoogwaardige recyclage van vloerplaten en kolommen

Als laatste wordt een gelijkaardig scenario voorgesteld als scenario 5. Hierbij wordt aangenomen dat enkel de fundering van het gebouw niet hoogwaardig gerecycleerd kan worden, weergegeven in Figuur 5.7. Het aandeel van hoogwaardige recyclage is 88% van het betonvolume, wat aanzienlijk groter is gezien zowel de vloerplaten als de kolommen hoogwaardig gerecycleerd worden.



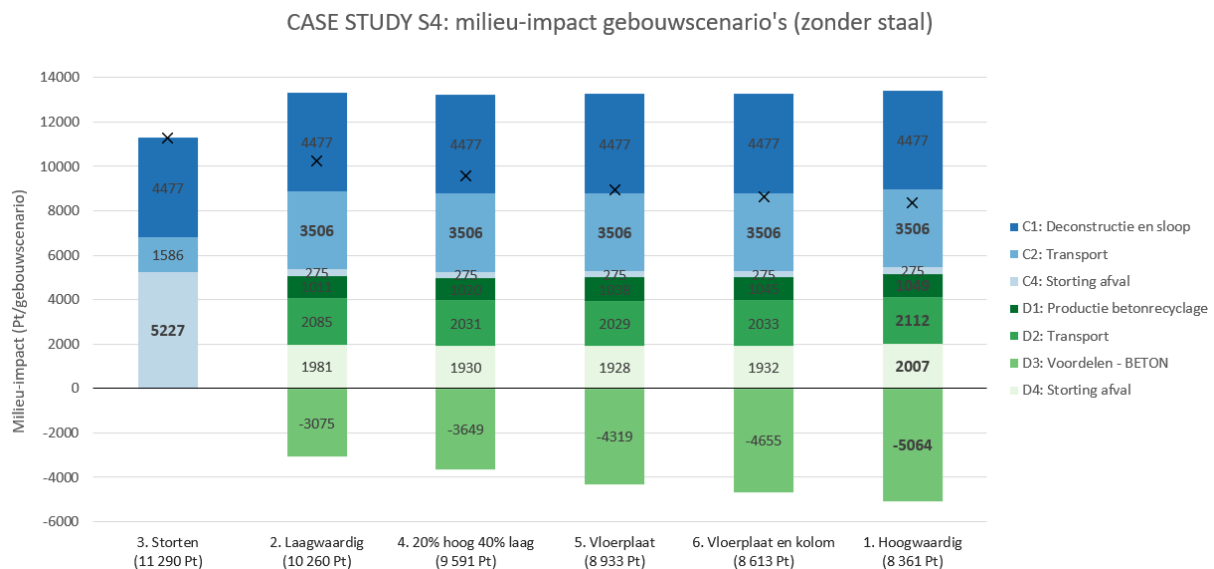
Figuur 5.7: Scenario 6: Hoogwaardige recyclage van vloerplaten en kolommen - De percentages zijn ten opzichte van het oorspronkelijke 100% betonvolume. De grijze onderdelen brengen een last met zich mee, de groene een voordeel.

5.2 Resultaten

In volgend onderdeel worden de resultaten van de verschillende scenario's voor afvalverwerking van de case study besproken. Gezien de recyclage en productie van staal een aanzienlijke bijdrage leveren aan de milieu-impact en deze onveranderlijk blijft over de verschillende scenario's, wordt de impact van staal achterwege gelaten in onderstaande grafieken. Ter volledigheid geeft Bijlage E dezelfde grafieken weer inclusief de aandelen van staal.

5.2.1 Eindelevensduur

Als eerste wordt er gekeken naar de eindelevensduur, met name module C en D. Door de EOL uitgebreid te bestuderen, kan de milieu-impact van de zes mogelijke scenario's vergeleken worden. Zo kan uiteindelijk de optimale eindelevensduurbehandeling naar voor geschoven worden. De resultaten van de case study worden weergegeven in Figuur 5.8, waarbij ze gerangschikt zijn van hoogste naar laagste milieu-impact.



Figuur 5.8: Eindelevensduur: Scenario's case study - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis. De scenario's zijn gerangschikt van hoogste naar laagste milieu-impact.

Op het eerste zicht wordt duidelijk dat het meegenomen *worst-case scenario*, namelijk storten, wel degelijk de hoogste milieu-impact met zich meebrengt. Daarnaast heeft het scenario waarbij het gehele betonvolume hoogwaardig gerecycleerd wordt de laagste milieuscore. Laagwaardige recyclage heeft de tweede hoogste impact, waardoor men voor de EOL kan stellen dat de milieu-impact verbetert naarmate er meer hoogwaardig gerecycleerd wordt.

Wanneer er meer concreet naar de verschillende deelmodules wordt gekeken, onderscheiden de scenario's zich vanaf het transport van het betonpuin (C2). De deconstructie en sloop van de S4 is logischerwijs gelijk voor alle scenario's. Voor het transport is het duidelijk dat de locatie van de recyclageplaats erg bepalend is voor de milieu-impact. Hoewel in totaal dezelfde massa betonpuin getransporteerd wordt in C2, hebben de scenario's met recyclage een meer dan dubbel zo grote

milieu-impact. Dit is te verklaren door de dubbel zo grote afstand van de S4 naar Degetec als naar Aclagro. Dit aspect is aldus sterk site-specifiek en zal andere conclusies geven bij andere case studies. Voor het direct storten van het betonpuin is het aandeel logischerwijs het hoogste bij storten. Dit is het enige scenario waarbij 100% van het betonvolume wordt gestort onder C4. De andere scenario's kennen nog een extra stortimpact onder D4, hoewel dit door hergebruik van materialen slechts 45% is van de impact van het stortscenario.

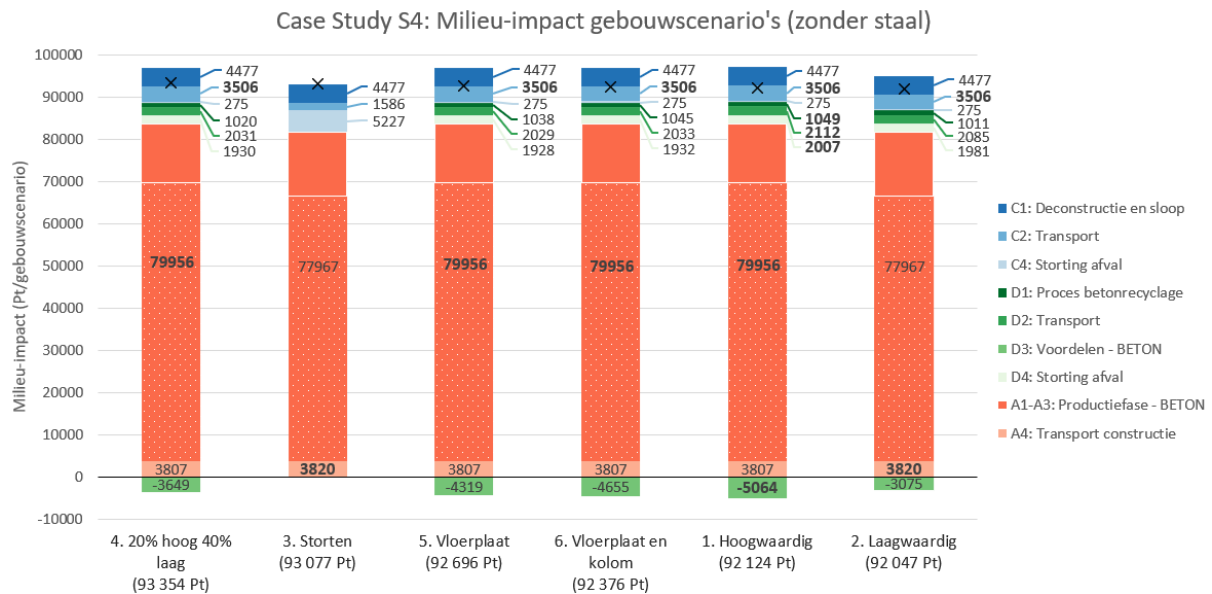
De milieu-impact van het recyclageproces verschilt ook afhankelijk van het aandeel dat hoogwaardig gerecycleerd wordt. Bij laagwaardige recyclage is een wasinstallatie met bijhorende trommelzeef als hulpmachine overbodig, waardoor de milieu-impact daalt bij een groter aandeel laagwaardige recyclage. Deze reductie is echter minimaal en leidt tot een verschil van maximaal 3,6%. De beperkte impact van de wasinstallatie wordt ook duidelijk in Figuur 4.11, waarin module D1 per recyclagemachine is opgesplitst. De impact van het transport en het storten van de verliesmaterialen, respectievelijk D2 en D4, neemt ook toe naargelang er meer hoogwaardige recyclage is. Hoogwaardige en laagwaardige recyclage verschillen zelf maar 1,3% gezien de extra materiaalverliezen van de wasinstallatie slecht 2 volumepercent impliceren. In de voordelen van betonrecyclage zijn wel opmerkelijke verschillen te vinden. Naarmate in een scenario een groter betonvolume hoogwaardig gerecycleerd wordt, stijgen de voordelen aanzienlijk. Tussen volledig laagwaardige en hoogwaardige recyclage stijgt het voordeel met 65%. De scenario's, waarbij er gedeeltelijk hoog- en laagwaardig wordt gerecycleerd, liggen tussen de uitersten.

Hoewel het volledig hoogwaardig recycleren van de S4 de hoogste lasten kent, is dit het optimale scenario door de betonvoordelen. Ten opzichte van het courante scenario van volledig laagwaardige recyclage in België, kent hoogwaardige recyclage een verbetering van de milieuscore met 18,5%. Het vierde, vijfde en zesde scenario hebben ook een verbetering in vergelijking met laagwaardig recycleren met respectievelijk 6,5%, 12,9% en 16%. Algemeen wordt hoogwaardige recyclage dus naar voor geschoven op milieuvlak wanneer de eindelevensduurbehandeling uitgebreid wordt meegenomen.

5.2.2 Module C - D - A

Als tweede deelonderzoek voor de case study zal naast de eindelevensduur ook de productie van de tweede levenscyclus betrokken worden. Zo kan de invloed onderzocht worden van de extra milieu-impact van het cement bij de scenario's waar secundair beton wordt gebruikt. Dit is echter een extra onderzoek waaruit geen definitieve conclusies getrokken kunnen worden, gezien het mogelijk is dat bij de scenario's van storten en laagwaardige recyclage ook 20% RA's worden gebruikt in hun tweede levenscyclus. Dit is allemaal onzeker en afhankelijk van de vraag en het aanbod op dat moment. Het is dus wel interessant om de scenario's van module C tot en met module A te bekijken, gezien sommige scenario's door de productie van RA's een zekerheid geven van het aanbod en dus het toepassen ervan op dat moment. Het blijft echter allemaal onzeker of de situatie dan optimistisch of pessimistisch wordt geschat. In Figuur 5.9 worden de resultaten weergegeven, opnieuw gerangschikt van hoogste naar laagste milieu-impact.

Het valt meteen op dat er tussen de scenario's een andere volgorde is van hoogste naar laagste milieu-impact. Door een combinatie van de hogere lasten van de EOL en de extra lasten door het cement kunnen de betonvoordelen bij het 20% hoogwaardige recyclagescenario de lasten niet voldoende compenseren om een lagere milieuscore te bereiken dan bij storten. Hetzelfde geldt voor de andere hoogwaardige recyclagescenario's, waarbij de voordelen de extra last ten gevolge van 5% meer cement niet kunnen opheffen. Hierdoor komt volledig laagwaardige recyclage uit als beste scenario.



Figuur 5.9: Eindelevensduur en tweede levenscyclus: Scenario's case study - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis. De scenario's zijn gerangschikt van hoogste naar laagste milieu-impact. Het patroon in A1-A3: Productiefase - BETON geeft het aandeel cement weer.

Kijkend naar de verschillende deelmodules, gelden voor module C en D dezelfde conclusies als hierboven. Bij de tweede levenscyclus wordt er bij de scenario's waar hoogwaardige granulaten worden geproduceerd 20% van de primaire granulaten vervangen door RA's. Hieraan wordt dus geen materiaalimpact toegekend (A1). Om dezelfde sterkteklasse te behouden, gaat dit echter samen met 5% meer cement. Het voordeel van de vermeden granulaten is echter niet voldoende om het extra aandeel cement op te heffen, wat resulteert in een hogere milieu-impact. Naast de productie zelf zijn er ook kleine verschillen in het transport van het beton naar de site. Dit is te wijten aan de andere betonsamenstellingen waarbij elk materiaal een andere massadichtheid heeft. Het gaat hier echter om een verschil van 0,33%, wat verwaarloosbaar is. In totaal kent de productie van beton een stijging van de milieu-impact met 2,55% door de combinatie van extra cement en gedeeltelijke vervanging van granulaten.

Door het betrekken van de tweede levenscyclus verandert de conclusie dus volkomen. Hoewel bij de eindelevensduur het positief is om zoveel mogelijk hoogwaardig te recyclen, kan het voordeel hier niet meer opwegen tegen het extra cement ten gevolge van kwaliteitsverlies van de RA's. Uit dit deelonderzoek blijkt dus dat het courant toegepaste scenario in België, met name laagwaardige recyclage, het beste is voor het milieu. Hierbij moet men inzien dat de waarden relatief dicht bij elkaar liggen. Zo heeft volledig hoogwaardige recyclage slechts een stijging van de milieu-impact met 0,1% ten opzichte van volledig laagwaardige recyclage. Hetzelfde geldt voor scenario's 4, 3, 5 en 6, waarbij er een stijging is van respectievelijk 1,4%, 1,1%, 0,7% en 0,4%.

6

Conclusie

6.1 Onderzoek

De doelstelling van deze masterproef is het analyseren en berekenen van module C en D, met de focus op betonnen constructies. Wat is het belang om de EOL-impact uitgebreid mee te nemen in de berekening van de milieu-impact van betonnen constructies? Zijn er methoden om het recyclageproces van beton te optimaliseren en zo de milieu-impact te verlagen? Welke eindelevensduurbehandeling kan naar voor geschoven worden als optimaal scenario voor een betonnen constructie? Op deze vragen wordt een antwoord gezocht via een analyse van de milieu-impact van de eindelevensduurbehandeling. Deze EOL wordt in de praktijk nog te vaak verwaarloosd. Aangezien beton één van de belangrijkste constructiematerialen is, focust deze studie op de milieu-impact van de eindelevensduurbehandelingen van beton. Het voornaamste probleem is dat er een toekomstig scenario wordt vastgelegd, wat gepaard gaat met veel onzekerheden.

6.1.1 Materiaalniveau

Om een antwoord te vinden op de geformuleerde vragen, is het eerste onderzoek uitgevoerd op materiaalniveau. Door de milieu-impact van verschillende eindelevensduurbehandelingen voor een kubieke meter beton te kwantificeren, kan het belang van de EOL uitgebreid mee te nemen in een LCA, bepaald worden. Zo is er aangetoond dat de milieu-impact van de EOL 25% verminderd wordt door het beton hoogwaardig te recycleren in plaats van te storten indien de impact van staal buiten beschouwing wordt gelaten. Wanneer staal wel wordt meegenomen, impliceert dit nog een reductie van 10%, gezien de staalrecyclage een aanzienlijk milieuvoordeel met zich meebrengt. De lasten om het beton te recycleren kunnen dus opgeheven worden door de voordelen van hergebruik en recyclage. Hierbij moet men rekening houden dat de RA's verminderde technische prestaties hebben, waardoor de tweede levenscyclus 5% extra cement nodig heeft om dezelfde sterkteklasse te garanderen. Hierdoor zal de milieu-impact van module A stijgen met 2,5% in de tweede levenscyclus. Wanneer er wordt gekeken naar het GWP, met name kilogram CO₂-equivalent per kubieke meter, is dit zelfs een toename van 4,23%. Tegenwoordig is het courante praktijk om beton aan het einde van zijn levensduur laagwaardig te recycleren en te hergebruiken in laagwaardige toepassingen zoals de wegenbouw. Hierdoor daalt de milieu-impact van de EOL ten opzichte van storten met 8% als staalrecyclage niet wordt meegenomen en 3% indien dit wel het geval is. Door enerzijds het beperktere milieuvoordeel van laagwaardige recyclage en anderzijds bijna gelijke milieulasten als bij het hoogwaardige recyclageproces, is de netto-impact van laagwaardige recyclage 20% hoger dan bij hoogwaardige recyclage wanneer staal niet wordt meegenomen.

6 Conclusie

Naast de basisscenario's op materiaalniveau, zijn er enkele theoretische aannames bekeken om het recyclageproces te optimaliseren. Een verbetering in de milieu-impact kan zo verder onderzoek stimuleren, zodat het uiteindelijk de norm wordt. Bij hergebruik van breekzand zorgen de extra vermeden primaire materialen voor een reductie van de milieu-impact van 74% zonder staal en 22% met staal in vergelijking met hoogwaardige recyclage van alleen granulaten. Ten opzichte van het storten van beton is deze vermindering zelfs respectievelijk 80% en 34%. Als tweede optimalisatie kan het betonpuin na het breken uitgespreid worden om zo een versneld carbonatatieproces te forceren. Het milieuvoordeel dat hiermee gepaard gaat door de opname van CO₂ kan aanzienlijk zijn. Bij een gemiddelde opname van 25 kg CO₂ eq/m³ is er een vermindering van de milieu-impact met 20% ten opzichte van hoogwaardige recyclage. Als laatste theoretische aanname blijkt dat een recyclageproces op windenergie de proceslasten met 35% kan verminderen (D1). De lasten van het recyclageproces zijn echter slechts 20% van de totale lasten van module D en zullen aldus geen grote invloed hebben op het geheel.

6.1.2 Gebouwniveau

Na een onderzoek op materiaalniveau zijn de verworven inzichten toegepast op een case study van de Universiteit Gent, gebouw S4 op campus Sterre. Het doel van dit deelonderzoek op gebouwniveau is om een optimaal scenario voor de milieu-impact van de eindelevensduurbehandeling naar voor te kunnen schuiven. Hierbij werd er vertrokken van zes mogelijke scenario's, waarbij volledige hoogwaardige recyclage als optimaal scenario naar voor komt bij de milieu-impact van de eindelevensduur. De resultaten zijn echter sterk afhankelijk van de locatie van de recyclage-installatie ten opzichte van de locatie van de stortplaats, waardoor een andere case study een ander optimaal scenario kan hebben. Voor de S4 geldt er dat hoe meer betonvolume hoogwaardig gerecycleerd wordt, hoe voordeliger het is voor de milieu-impact. Wanneer ook de tweede levenscyclus meegenomen wordt, verandert deze conclusie echter. De bijkomende lasten ten gevolge van 5% extra cement, die enkel bij de scenario's wordt geplaatst waarbij er hoogwaardig gerecycleerd wordt, kunnen niet opgeheven worden door de betonvoordelen van module D. Hierdoor komt volledig laagwaardige recyclage van de S4 uit als beste scenario. Het is echter niet correct om uit dit tweede deelonderzoek van de case study werkelijke conclusies te trekken, gezien het plausibel is dat bij laagwaardige recyclage van het gebouw ook RA's worden gebruikt in de tweede levenscyclus. Hierdoor moet er voor conclusies enkel gekeken worden naar de eindelevensduur van de scenario's. Volledig hoogwaardige recyclage van het gebouw kan dus als optimaal scenario beschouwd worden op milieuvlak. Gezien het betonpuin een bepaalde sterkte moet hebben, is hoogwaardige recyclage echter niet altijd mogelijk. In deze gevallen zal er eerder naar het vijfde of zesde scenario gekeken worden, waarbij enkel bepaalde structurele elementen, zoals de vloerplaten of de kolommen, hoogwaardig gerecycleerd worden.

6.1.3 Besluit

De resultaten geven aan dat het van belang is om de EOL-impact uitgebreid mee te nemen in een LCA. Ook al heeft module A de grootste impact in een LCA, toch zijn er duidelijke verschillen tussen de aangenomen eindelevensduurbehandelingen van beton. Zo kan men de milieu-impact aanzienlijk verminderen door hoogwaardige recyclage als courante praktijk te zien. Het verschil kan nog meer geduid worden door het recyclageproces te optimaliseren. Hoewel het hergebruik van breekzand nog niet toegelaten is in beton, tonen de resultaten aan dat het een aanzienlijk positief effect heeft op de milieu-impact. Het is dus zeker interessant om hier verder onderzoek naar te doen, zodat het gebruik van breekzand al dan niet gedeeltelijk toegelaten wordt in de norm NBN B 15-001 ter vervanging van primair zand. Op gebouwniveau wordt ook duidelijk dat het

gebouw volledig hoogwaardig recycleren, het optimale scenario is. Wanneer dit niet mogelijk is door te lage sterktes of dergelijke, is het steeds de beste optie om een zo groot mogelijk aandeel beton hoogwaardig te recycleren.

6.2 Beperkingen

De resultaten van het onderzoek zijn bepaald via een LCA met de focus op de eindelevensduur. Hierbij zijn er verschillende aannames nodig om de milieu-impact te kunnen berekenen. De keuzes hebben in sommige gevallen een sterke invloed op de levenscyclus, waardoor een kleine aanpassing de resultaten kan veranderen. Hierdoor wordt er vaak een uitgebreide gevoeligheidsanalyse gedaan om de betrouwbaarheid van het onderzoek te schetsen. Hoewel de gevoeligheid van bepaalde aannames bekeken is in de studie, worden hieronder nog enkele andere onzekerheden aangehaald.

Een eerste onzekerheid van dit onderzoek ligt in de gekozen processen van SimaPro, meer specifiek het betonproces. Via de toepassingen en eigenschappen in SimaPro werd een proces geselecteerd waarbij de aangegeven betonsamenstelling als basis werd genomen. Deze samenstelling heeft een relatief lage W/C van 0,34 in vergelijking met de maximaal toelaatbare waarde van 0,5 voor een omgevingsklasse EE3. Een andere samenstelling zou leiden tot andere materiaalaandelen die de overhand nemen en zo een grotere of juist kleinere invloed uitoefenen. Deze onzekerheid is enkel van belang in de scenario's waar module A bekeken werd, gezien de impact van de EOL voornamelijk gebaseerd is op de massa van het beton.

Een tweede belangrijke keuze voor de eindelevensduur is de positie van de EOW en functionele equivalentie. In deze studie werden module C en D grotendeels samen bekeken, waardoor de aanname van de EOW minder bepalend is. De functionele equivalentie kan wel een aanzienlijke invloed uitoefenen. Er werd aangenomen dat deze net na de recyclage-installatie ligt, waardoor de transport impact van de gerecycleerde granulaten naar de betoncentrale werd toegekend aan de tweede levenscyclus. Indien de functionele equivalentie net voor de betoncentrale zou liggen of deze zou liggen op 1m³ beton met 20% RA's, kunnen de lasten van module D aanzienlijk groter zijn door respectievelijk extra transport impact of productie impact.

Een volgende onzekerheid is gelinkt aan het proces van Degetec. Dit proces werkt bijna volledig op diesel, waardoor de keuze van windenergie de lasten van module D zou verminderen. Een tweede variatie hieromtrent is het gebruik van een extra breker. In sommige processen gaat het betonpuin na de *jaw crusher* ook door een *impact crusher*. Hierdoor wordt er meer aangehecht mortel van de granulaten gebroken, waardoor de kwaliteit verbetert. Een tweede machine doet logischerwijs de lasten van het proces stijgen. Wanneer de kwaliteitsratio echter verbetert, kan dit ook gepaard gaan met een hoger vervangingspercentage of minder extra cementgebruik. De norm NBN B 15-001 laat deze verbetering echter nog niet toe en legt zijn limiet vast op 20%.

Een laatste onzekerheid ligt bij de gekozen impactmethode. Naast enkele deelonderzoeken via de GWP middelpuntcategorie zijn alle data weergegeven in een single score. Dit is een goede start om de verschillende scenario's te vergelijken, maar is ook subjectief door de sterke vereenvoudiging tot één waarde. Daarnaast zijn er ook verschillende impactmethodes die een andere focus hebben, waardoor de resultaten kunnen verschillen.

6.3 Verder onderzoek

Deze masterproef heeft zich gefocust op betonnen constructies. Een eerstvolgende stap is het uitbreiden van de onderzoeksvraag naar de verschillende bouwmaterialen. Zo kan men bij verschillende materialen het belang van de EOL onderzoeken en vergelijken. Bij staal is het reeds geweten dat recycling een enorm voordeel oplevert. Daartegenover zijn er bij baksteen nog te veel problemen in verband met onzuiverheden, waardoor logischerwijs meer processen nodig zijn om het hoogwaardig te kunnen recyclen. Het is dus interessant om hier verder onderzoek naar te doen, om te zien of de voordelen van hergebruik de extra proceslasten kunnen opheffen.

Voor het beton zelf is er nog meer onderzoek nodig naar het optimaliseren van de kwaliteit van de gerecycleerde granulaat. Het beperkte vervangingspercentage en het nodige extra cement hebben een aanzienlijke invloed op de milieu-impact. Daarnaast is er extra onderzoek nodig naar de werkelijke CO₂-opname van het gebroken betonpuin tijdens de EOL, gezien er in de literatuur uiteenlopende waarden zonder consensus te vinden zijn. Het onderzoek geeft echter veelbelovende resultaten. Bij een welbepaalde CO₂-opname kan carbonatatie als optimaal scenario voor hoogwaardige recycling opgenomen worden in de norm NBN B 15-001 en zo een verplichte stap worden.

Referenties

- Behera, M., Bhattacharyya, S., Minocha, A., Deoliya, R., and Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from c&d waste and its use in concrete – a breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68:501–516.
- Bergmans, J., Dierckx, P., Regel, S., Eynde, A., Velde, P., and Broos, K. (2017). Semi-selective demolition: current demolition practices in flanders.
- Blengini, G. and Garbarino, E. (2010). Resources and waste management in turin (italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production - J CLEAN PROD*, 18:1021–1030.
- Borghi, G., Pantini, S., and Rigamonti, L. (2018). Life cycle assessment of non-hazardous construction and demolition waste (cdw) management in lombardy region (italy). *Journal of Cleaner Production*, 184:815–825.
- CarbonTrust (2020). Conversion factors - introductory guide.
- Casuccio, M., Torrijos, M., Giaccio, G., and Zerbino, R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, 22:1500–1506.
- Courard, L., Parmentier, V., and Michel, F. (2015). Carbonated concrete blocks for co₂ captation. *Materialy Budowlane*, 10:116–118.
- Delem, L. and Wastiels, L. (2019a). Module d in the building life cycle: Significance based on a case study analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290:012042.
- Delem, L. and Wastiels, L. (2019b). The practical use of module d in a building case study: assumptions, limitations and methodological issues. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323:012048.
- Ecoinvent Database (2020). System models.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Mari, A., and Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5):735–742.
- Febelcem (2021). Cement en beton roadmap 2050 - wist u dat beton ook co2 opneemt? Belgische Cementnijverheid.
- Fořt, J. and Černý, R. (2020). Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. *Waste management (New York, N.Y.)*, 118:510–520.
- Fraj, A. and Rachida, I. (2017). Concrete based on recycled aggregates – recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. *Construction and Building Materials*, 157:952–964.
- Ghanbari, M., Abbasi, A., and Ravanshadnia, M. (2017). Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and co₂ emissions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20.
- Gholizadeh-Vayghan, A., Bellinx, A., Snellings, R., Vandoren, B., and Quaghebeur, M. (2020). The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 257:119486.

- Grünewald, S. (2020). *Betontechnologie*. Universiteit Gent.
- Gupta, H. and Fan, L.-S. (2002). Carbonation-calcination cycle using high reactivity calcium oxide for carbon dioxide separation from flue gas. *Industrial and Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES*, 41.
- Hansen, T. C. and Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International*, 5(1):79–83.
- Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Hollander, A., Zijp, M., and van Zelm, R. (2016). *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level - Report I: Characterization*. National Institute for Public Health and the Environment, rivm report 2016-0104a edition.
- International Energy Agency (2001). Life cycle assessment methods for buildings. *Energy-related environmental impacts of buildings*, Annex 31.
- ISO (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. International Organization for Standardization, ISO 14040-2:2006(E) edition.
- ISO (2012a). *Beton-Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit - Nationale aanvulling bij NBN EN 206-1:2001*. International Organization for Standardization, NBN B 15-001 edition.
- ISO (2012b). *Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engine and heating application - Requirements and test methods*. International Organization for Standardization, nbn en 14214:2012+a2 edition.
- ISO (2012c). *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. International Organization for Standardization, NBN 15978:2011(E) edition.
- ISO (2012d). *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*. International Organization for Standardization, NBN 15804:2012+A2:2019 edition.
- ISO (2013). *Concrete - Specification, performance, production and conformity*. International Organization for Standardization, nbn en 206:2013+a2:2021 edition.
- ISO (2017). *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product Category Rules for concrete and concrete elements*. International Organization for Standardization, nbn en 16757:2017 edition.
- Jain, S., Singhal, S., and Pandey, S. (2020). Environmental life cycle assessment of construction and demolition waste recycling: A case of urban india. *Resources, Conservation and Recycling*, 155:104642.
- Janssen, A., Wastiels, L., and Delem, L. (2013). Infofiche 64: Levenscyclusanalyse of lca. *WTCB*.
- Kikuchi, T. and Kuroda, Y. (2011). Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(1):115–124.
- KLEEMANN (2021a). Technical information - track-mounted impact crushers - mobirex mr 130(i) evo2.
- KLEEMANN (2021b). Technical information - track-mounted jaw crushers - mobicat mc 100 (i) evo.

- KLEEMANN (2021c). Technical information - track-mounted screening plant - mobiscreen ms 12 z.
- Kosmatka, S. and Wilson, M. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*.
- Kou, S. and Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35:69–76.
- Leroy, C., Thomas, J.-S., Avery, N., Bollen, J., and Tikana, L. (2012). Tackling recycling aspects in en15804. In *International symposium on life cycle assessment and construction*, Ed. A. Ventura and C. de la Roche. <http://www.rilem.org/gene/main.php>.
- Li, J., Liang, J., Zuo, J., and Guo, H. (2020). Environmental impact assessment of mobile recycling of demolition waste in shenzhen, china. *Journal of Cleaner Production*, 263:121371.
- Lopes, M., Serrano, L., Ribeiro, I., Cascão, P., Pires, N., Rafael, S., Tarelho, L., Monteiro, A., Nunes, T., Evtugina, M., Nielsen, O., Gameiro da Silva, M., Miranda, A., and Borrego, C. (2014). Emissions characterization from euro 5 diesel/biodiesel passenger car operating under the new european driving cycle. *Atmospheric Environment*, 84:339–348.
- Marinkovic, S., Radonjanin, V., Malešev, M., and Ignjatovic, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste management (New York, N.Y.)*, 30:2255–64.
- Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., and Pedro, D. (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 44:101–109.
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., and Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114:115–124. Report of UNEP SBCI WORKING GROUP ON LOW-CO2 ECO-EFFICIENT CEMENT-BASED MATERIALS.
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., and Hisada, M. (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 34(6):965–971.
- Neves, R. and de Brito, J. (2022). Estimated service life of ordinary and high-performance reinforced recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 46:103769.
- Otsuki, N., Miyazato, S., and Yodsudjai, W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering - J MATER CIVIL ENG*, 15.
- OVAM (2013). Environmental profile of building elements.
- OVAM (2022). Tarieven en capaciteiten voor storten en verbranden.
- OVAM and WTCB (2018). Catalogus van secundaire en gerecycleerde granulaten - brekerzand.
- Ponsioen, T. (2015). Finding your way in multifunctional processes and recycling.
- Poon, C. S., Shui, Z., and Lam, L. (2004). Effect of microstructure of itz on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, 18:461–468.

- Pré (2020). End-of-life allocation.
- Rahal, K. (2007). "mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate". *Building and Environment*, 42:407–415.
- Ram, V. G., Kishore, K., and Satyanarayana, K. (2020). Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an indian case study using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 255:120258.
- Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., and Taylor, A. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(5):707–712.
- Sapuyay, S. (2016). Construction waste – potentials and constraints. *Procedia Environmental Sciences*, 35:714–722.
- Simion, I., Fortuna, M., Bonoli, A., and Gavrilescu, M. (2013). Comparing environmental impacts of natural inert and recycled construction and demolition waste processing using lca. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 21:273–287.
- Sims, I. and Brown, B. (1998). 16 - concrete aggregates. In Hewlett, P. C., editor, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*, pages 907–1015. Butterworth-Heinemann, Oxford, fourth edition edition.
- Stripple, H. (2013). *Greenhouse gas strategies for cement containing products.- Part of the research project CO2 cycle in cement and concrete*. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., ivl report b2024 edition.
- Stripple, H., Ljungkrantz, C., Gustafsson, T., and Andersson, R. (2021). *CO2 uptake in cement - containing products - Background and calculation models for implementation in national greenhouse gas emission inventories*. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., ivl report b2309 edition.
- Tam, V., Gao, X., and Tam, C. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35:1195–1203.
- Terex (2020). Product specification - tracked trommel screen - phoenix 1600t.
- van den Broek, J. (2018). Besluit activiteiten leefomgeving; staatsblad 2018-293 en bijgewerkt t/m staatsblad 2022-110. *Boom juridisch*, 1.
- Vandeweghe, E. (2019). Universiteitscampus de sterre.
- Vossberg, C., Mason-Jones, K., and Cohen, B. (2014). An energetic life cycle assessment of c&d waste and container glass recycling in cape town, south africa. *Resources, Conservation and Recycling*, 88:39–49.
- Vrijders, J. and Desmyter, J. (2008). Een hoogwaardig gebruik van puingranulaten stimuleren. WTCB in opdracht van OVAM.
- Wan-Wendner, R. (2021). Gewapend en voorgespannen beton. Universiteit Gent.
- Wastiels, L., Delem, L., and Dessel, J. (2013a). To module d or not to module d? the relevance and difficulties of considering the recycling potential in building lca.
- Wastiels, L., Dessel, J., and Delem, L. (2013b). Relevance of the recycling potential (module d) in building lca: A case study on the retrofitting of a house in seraing.

Referenties

- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno Ruiz, E., and Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part i): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21:1–13.
- World Steel Association (2017). Life cycle inventory methodology report for steel products.
- Xi, F., Davis, S., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y., and Liu, Z. (2016). Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2840.
- Xiao, J., Li, W., Corr, D. J., and Shah, S. P. (2013). Effects of interfacial transition zones on the stress–strain behavior of modeled recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 52:82–99.
- Zhang, J., Shi, C., Li, Y., Pan, X., Poon, C. S., and Xie, Z. (2015). Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27.

Bijlagen

A

Werkelijke machines Degetec

In de literatuurstudie is de werking van de recyclage machines schematisch weergegeven. Deze afbeeldingen komen van een andere fabrikant als de machines van Degetec, waardoor ze niet volledig overeenkomen met de realiteit. Hieronder zijn werkelijke foto's van Degetec weergegeven ter volledigheid.

Breker



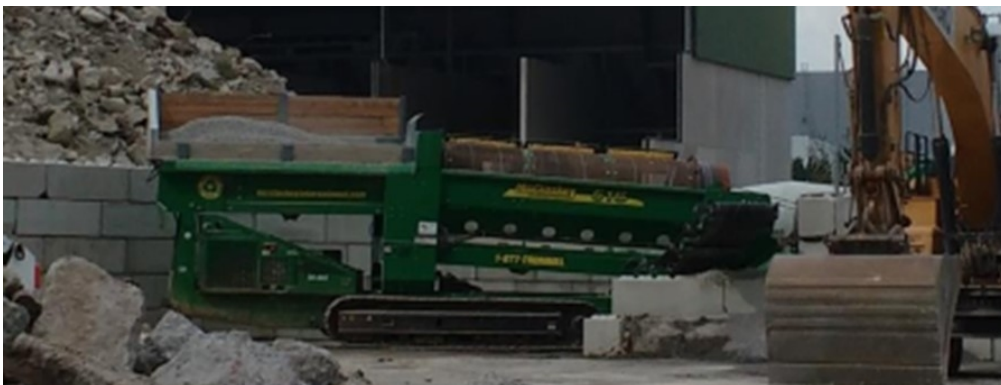
Figuur A.1: Jaw crusher Degetec

Zeefmachine



Figuur A.2: Zeefmachine Degetec

Trommelzeef



Figuur A.3: Trommelzeef Degetec

B

Materiaallijst SimaPro

In Figuur B.1 zijn de gekozen processen in SimaPro weergegeven voor de LCA. Hieronder wordt meer gedetailleerd beschreven hoe deze processen gekozen zijn per module.

MODULE	MATERIAAL	SIMAPRO, ReCiPe Endpoint (H)
A1-A3	Beton productie (ongewapend)	Concrete, 30MPa {RoW} concrete production 30MPa Cut-Off, U
	Wapening	Reinforcing steel {RER} production Cut-off, U
	Portlandcement	Cement, Portland {Europe without Switzerland} production Cut-off, U
	Granulaten	Gravel, crushed {RoW} production Cut-off, U
	Zand	Sand {BR} market for sand Cut-off, U
	Transport "Bulk materials for structural work"	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} Cut-off, U
	Water 1	Tap water {RER} market group for Cut-off, U
	Water 2	Tap water {RoW} market for Cut-off, U
A4	"Poured concrete"	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} Cut-off, U
	"Loose products"	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} Cut-off, U
C1	Selectieve sloop	Waste brick {RoW} treatment of waste brick, recycling Cut-off, U
	Elektriciteit sloop	Electricity, low voltage {BE} market for Cut-off, S
	Infrastructuur sloop	Sorting facility, for construction waste {ROW} sorting facility construction, for construction waste Cut-off, U
C2	Transport bouw- en sloopafval	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} Cut-off, U
C4	Storten beton	Waste concrete {Europe without Switzerland} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U
	Storten staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, U
D1	Verbruik, mazout	Heavy fuel oil {Europe without Switzerland} heavy fuel oil production, petroleum refinery operation Cut-off, U
	Verbruik, elektriciteit windenergie	Electricity, high voltage {BE} electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore Cut-off, U
	Verbruik, elektriciteit zonne-energie	Electricity, low voltage {BE} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si, multi-Si, panel, mounted
	Recyclage staal proces (lasten, X EAF)	Steel, low-alloyed {RER} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U
	Gerecycleerd staal (voordelen, X BOF)	Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed Cut-off, U
D2	Transport verliesmaterialen	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} Cut-off, U
D3	Gerecycleerde granulaten	Gravel, crushed {RoW} production Cut-off, U
	Laagwaardig gerecycleerde granulaten	Limestone, crushed, for mill {RoW} production Cut-off, U
	Gerecycleerd zand	Sand {BR} market for sand Cut-off, U
	CO ₂ -captatie	Carbon dioxide
D4	Storten beton	Waste concrete {Europe without Switzerland} treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U
EXTRA	Landbezit	Concrete mixing factory {RoW} construction Cut-off, U
	Machine-impact	Building machine {RER} production Cut-off, U

Figuur B.1: Processen SimaPro voor LCA

Module A

In de productiefase zit de milieu-impact van de ruwe materialen, het transport ervan naar de fabriek, en de productie zelf. Als startpunt is er een beton gekozen in SimaPro waaraan de meeste eisen van de FE voldoen, namelijk *"Concrete, 30MPa RoW|concrete production 30MPa|Cut-Off, U"*. Deze betonsamenstelling bestaat echter uit portlandvliegascement, hoewel de frequent gebruikte cementsoorten in België portlandcement en hoogovencement zijn (Grünewald, 2020). Om zo dicht mogelijk bij de realiteit te liggen, is het portlandvliegascement vervangen door zuiver portlandcement, *"Cement, Portland Europe without Switzerland|production|Cut-off, U"*. Naast het cement, zijn ook de granulaten, het zand en het water uit het betonproces gehaald en apart berekend. Het resterende proces wordt dus de productie van het beton, aangezien de impact van de ruwe materialen eruit is gehaald. De processen van de ruwe materialen zijn, in tegenstelling tot het cement, dezelfde processen als die in het oorspronkelijke betonproces. De granulaten worden aldus voorgesteld door *"Gravel, crushed CH|production|Cut-off, U"* en het zand door *"Sand BR|market for sand|Cut-off, U"*. Het laatstgenoemde is een *market* proces waarin het transport dus nog niet vervat zit. Het water is samengesteld uit twee processen, *"Tap water RER|market group for|Cut-off, U"* en *"Tap water RoW|market for |Cut-off, U"*, die respectievelijk 43% en 57% van het aandeel water zijn. Voor de wapening werd *"Reinforcing steel RER|production|Cut-off, U"* aangenomen met een dichtheid van 7800 kg/m³. Het transport van cement, granulaten en zand wordt gezien als bulk materialen, wat volgens EN 15804 wordt getransporteerd met een vrachtwagen *"Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 RER|Cut-off, U"* (ISO, 2012d). Hierbij geeft 'EURO5' aan hoe vervuilend het transport mag zijn (Lopes et al., 2014). De milieu-impact van het transport wordt zo 0,00579 Pt/tkm, waarin reeds de terugrit van de lege vrachtwagen vervat zit. Voor het transport van het beton en de wapening naar de site zelf, wordt dezelfde vrachtwagen aangenomen. Een overzicht van de aangenomen transportafstanden en de milieu-impact van de materialen is weergegeven in Tabel B.1.

	Productie impact materialen (mPt/kg)	Transportafstand (km)
Wapening	137	67,50
Portlandcement	21,10	58,15
Zand	0,32	48,13
Betonproductie	0,28	/
Granulaten	0,21	48,13
Water	0,06	Verwaarloosd

Tabel B.1: A1-A3: Milieu-impact en transportafstanden van de productiematerialen

Module C

Het proces, dat de sloop van een betonnen constructie voorstelt, vertrekt vanuit *"Waste brick RoW|treatment of waste brick, recycling|Cut-off, U"*. Hierbij wordt de milieu-impact onder andere bepaald door het fijne stof dat vrijkomt bij het slopen. Daarnaast is er een impact ten gevolge van diesel voor de deconstruatiemachine, elektriciteit voor het sorteren en de sorteer installatie zelf. Hierbij zijn de hoeveelheden bepaald volgens de aannames van OVAM (2013). Per kubieke meter bulk materiaal, verbruikt men 5,9 MJ diesel bij het slopen. Rekening houdend dat de dichtheid van bulk materiaal 90% is van zijn oorspronkelijke dichtheid, is dit 0,00283 MJ per kilogram beton. Aangezien er in het basisproces nog geen elektriciteit zit,

wordt *"Electricity, low voltage BE| market for | Cut-off, S"* aangenomen als proces. Vermits men voor een betonnen constructie een breker nodig heeft, wordt een verbruik van 0,0037 kWh/kg verondersteld. De sorteerinstallatie zelf brengt ook een impact mee door landbezit, transformatie en energie. Hierbij wordt 1×10^{-10} plant per kg beton gerekend in het proces *"Sorting facility, for construction waste ROW| sorting facility construction, for construction waste| Cut-off, U"*. In totaal resulteert dit in een milieu-impact van 0,000223 Pt/kg voor het slopen van de betonnen constructie (C1).

De beschouwde processen om de impact ten gevolge van storten in rekening te brengen zijn enerzijds *"Waste concrete Europe without Switzerland| treatment of waste concrete, inert material landfill | Cut-off, U"* voor beton, en anderzijds *"Scrap steel Europe without Switzerland| treatment of scrap steel, inert material landfill | Cut-off, U"* voor staal. Beide processen hebben eenzelfde milieu-impact, namelijk 0,000274 Pt/kg. Door de EOW wordt het storten van slecht 5% van beide materialen toegekend aan module C4.

Module D

Voor diesel van de recyclagemachines is het aangenomen proces *"Heavy fuel oil Europe without Switzerland| heavy fuel oil production, petroleum refinery operation| Cut-off, U"* met een impact van 0,0213 Pt/kg. Om tot het verbruik in kilogram te komen, moet men een aanname doen voor de dichtheid van de brandstof. Gezien deze niet in het proces in SimaPro is opgelegd, wordt er gerekend met een dichtheid van 900 kg/m³ volgens EN 14214 (ISO, 2012b). Voor de elektriciteit is het proces *"Electricity, high voltage BE| electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore| Cut-off, U"* gebruikt gezien de wasinstallatie op hernieuwbare energie van een windmolen werkt. Dit geeft een impact van 0,00116 Pt/kg. Naast het verbruik van de machines wordt normaliter de impact ten gevolge van landbezit en machine opbouw ook opgenomen in het proces. Door de grote hoeveelheden qua productie en de locatie op een industrieterrein wordt deze impact genegeerd. De stappen in het recyclageproces hebben elk een eigen verliespercentage materiaal. Tabel B.2 toont aan dat het totale percentage 38,49% is bij hoogwaardige recyclage.

	Betonmassa 1m ³ (kg)	Betonmassa tov origineel (%)
Originele betonmassa	2316	100
Direct naar stortplaats	115,80	5
Recyclage	2200,20	95
Verlies breker	220,02	10
Rest na breker	1980,18	85,50
Verlies zevel	659,99	33,33
Rest na zevel	1320,19	57
Verlies wasinstallatie (% vol)	11,40	2
Volume totaal rest (m ³)	570,03	
Rest na wasinstallatie	1308,79	56,51
Totaal verliesmateriaal		38,49

Tabel B.2: Berekening materiaalverliezen recyclageproces Degetec

Materiaallijst SimaPro

Voor de lasten van het recyclageproces van staal wordt een gelijkaardig proces aangenomen als de tweede route van de staalproductie, namelijk via een EAF weergegeven in Figuur 3.5. Hierbij wordt *"Steel, low-alloyed RER| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U"* aangenomen als proces in SimaPro, met een milieu-impact van 0,128 Pt/kg. De aangenomen processen in SimaPro voor de betonvoordelen, zijn dezelfde als de reeds gedefinieerde primaire materialen, met een minteken als verschil. Voor de vermeden primaire productie van staal, wordt het linker proces van Figuur 3.5 aangenomen. Dit is een proces via een BOF, dat in SimaPro wordt weergegeven door *"Steel, low-alloyed RER| steel production, converter, low-alloyed | Cut-off, U"*. In Ecoinvent zitten reeds gerecycleerde materialen, waardoor het beschouwde proces moet aangepast worden, zie Tabel 3.4. De impact van module D voor de wapening komt neer op -0,0359 Pt/kg. Hierin zitten meteen de lasten van het recyclageproces.

Naast de twee hoofdscenario's, worden er verschillende theoretische aannames getoetst om de invloed van aanpassingen in het proces te bekijken. Bij laagwaardige recyclage van granulaten, zijn er minder kwaliteitsspecificaties waardoor de impact van de vermeden primaire materialen lager is. De betonvoordelen die hiervoor ingerekend worden zijn dus lager en worden bepaald via een proces voor kalksteen, *"Limestone, crushed, for mill RoW|production|Cut-off, U"*. De keuze van dit proces is op basis van aannames in literatuur (Delem and Wastiels, 2019b). Voor de vermeden impact van breekzand, wordt in SimaPro zoals bij de gerecycleerde granulaten het proces van het gebruikte zand in het primaire beton aangenomen, met een minteken als verschil. De CO₂-opname is niet ingecalculeerd via een proces, maar via de impact van CO₂ als luchtuitstoot, waar de negatieve waarde van genomen is. Voor het laatste deelonderzoek is de elektriciteit op basis van zonne-energie, weergegeven door *"Electricity, low voltage BE| electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted |Cut-off, U"*.



Verwaarlozing landbezit

Om de gevoeligheid van verschillende aannames na te gaan wordt er een vooronderzoek gedaan. De milieu-impact van het landbezit kan geschat worden door in de *unit* processen in SimaPro terug te kijken naar de meegenomen impact van landbezit in het primaire betonproces. De lasten ten gevolge van landbezit zitten namelijk automatisch vervat in "*Concrete mixing factory RoW/construction/Cut-off, U*". Hieruit zijn de processen van de materialen en verbruiken van de betoncentrale verwijderd om enkel de impact van landbezit te kunnen beschouwen. Een overzicht van de resterende processen is weergegeven in Tabel C.1, deze processen zijn deel van *inputs for nature*.

	Hoeveelheid	
<i>Occupation, industrial area</i>	217 900	m ² a
<i>Occupation, traffic area, road network</i>	150 000	m ² a
<i>Transformation, from unknown</i>	7370	m ²
<i>Transformation, to industrial area</i>	4370	m ²
<i>Transformation, to traffic arean road network</i>	3010	m ²

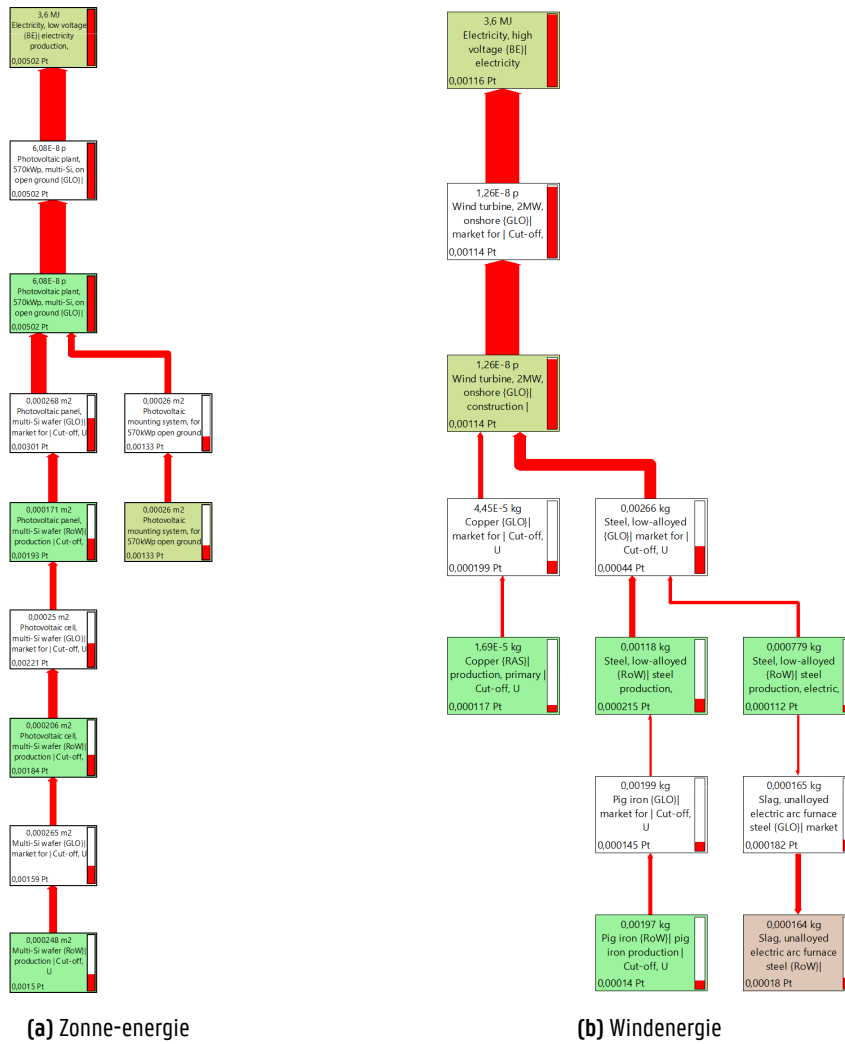
Tabel C.1: Gegevens landbezit SimaPro

Bovenstaand proces resulteert in een single score van 1330 Pt per *piece*. Dit houdt de impact in voor de levensduur van de betoncentrale, wat dus de totale betonproductie over de jaren heen is. Bovengenoemde milieuscore moet bijgevolg gereduceerd worden om het te laten gelden voor de FE, namelijk een kubieke meter beton. Om een schatting te maken van het aandeel is opnieuw gekeken naar de meegenomen hoeveelheid in het primair betonproces voor een kubieke meter beton, namelijk $4,57 \cdot 10^{-7}$ *piece*. Door de milieuscore te vermenigvuldigen met de reductiefactor, kan de impact voor landbezit van één kubieke meter beton geschat worden op 0,000608 Pt/m³. Wanneer deze waarde wordt vergeleken met de impact van het recyclageproces (D1), die wordt becijferd door 0,147 Pt/m³, blijkt dat landbezit niet in dezelfde grootteordes ligt en dus verwaarloosd kan worden.

D

Windenergie versus zonne-energie

Om het aanzienlijke verschil in milieu-impact tussen windenergie en zonne-energie te duiden wordt in Figuur D.1 het *network* proces van beide weergegeven. De milieuscores van de verschillende *unit* processen worden weergegeven per kWh.



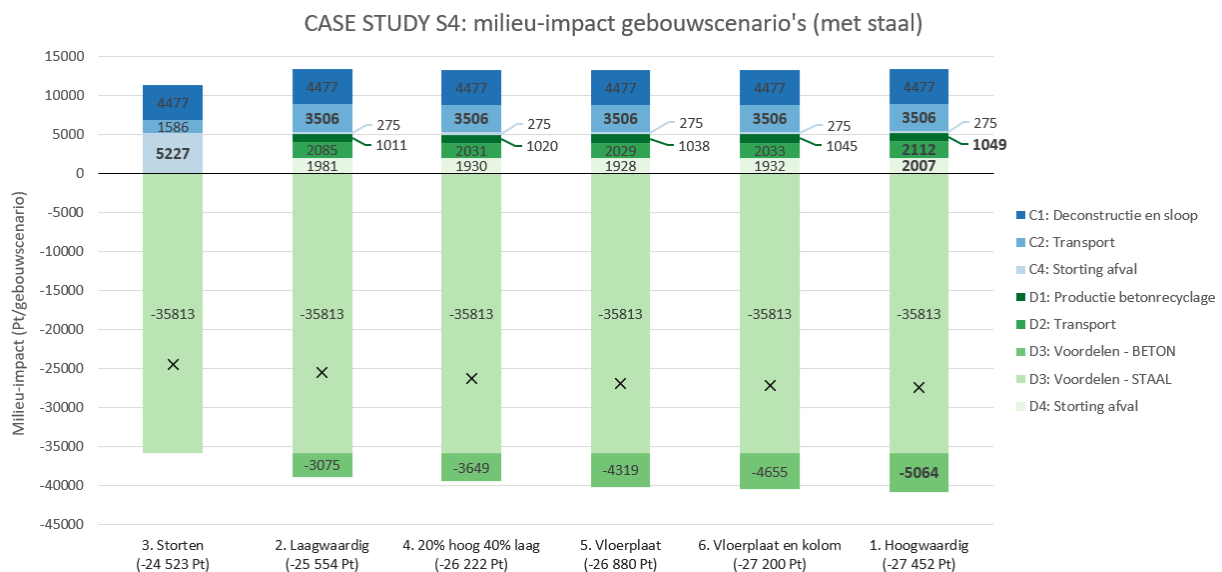
Figuur D.1: Netwerk elektriciteit door zonne-energie en windenergie in SimaPro - De milieu-impactscores zijn per kWh.

E

Case study

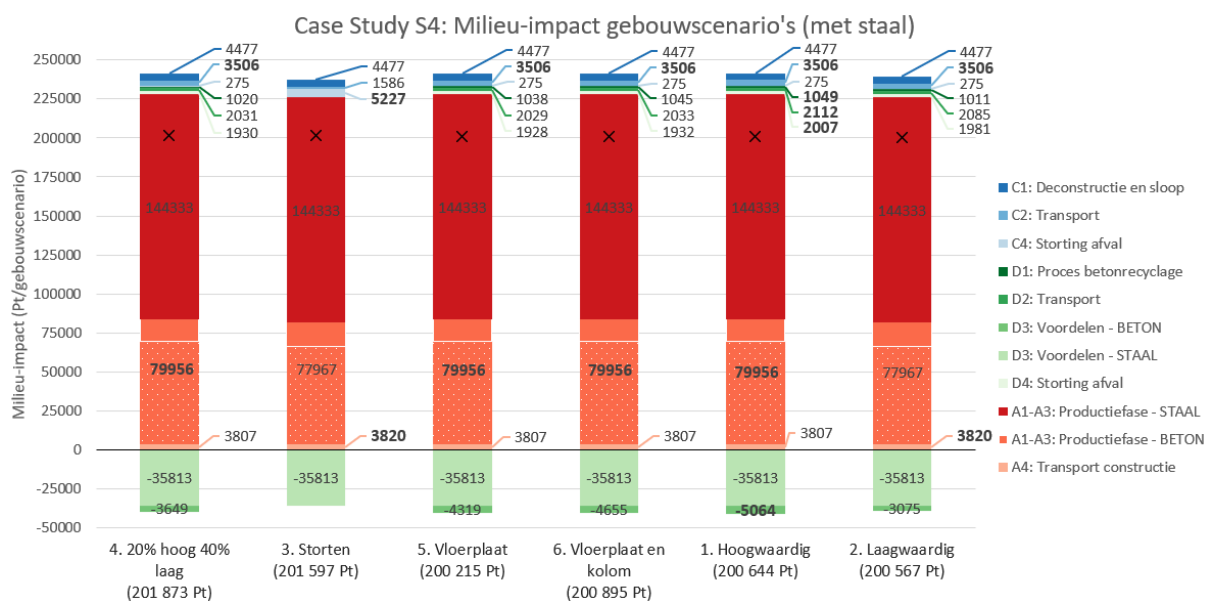
Zoals vermeld in de case study worden er twee deelonderzoeken gedaan. Als eerste wordt enkel de eindelevensduur, met name module C en D, meegenomen en in een tweede onderzoek wordt de invloed van de productie van de tweede levenscyclus ook betrokken. In de zes meegenomen scenario's blijft de milieu-impact van het staal voor zowel de productie als de recyclage onveranderlijk. Hierdoor werd deze impact in Hoofdstuk 5 voor de duidelijkheid in de grafieken achterwege gelaten. In onderstaande grafieken wordt de impact van staal wel meegenomen om het gehele beeld te tonen.

Eindelevensduur



Figuur E.1: Eindelevensduur met staalimpact: Scenario's case study - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis. De scenario's zijn gerangschikt van hoogste naar laagste milieu-impact.

Module C - D - A



Figuur E.2: Eindelevensduur en tweede levenscyclus met staalimpact: Scenario's case study - Voor elke levenscyclusfase wordt het scenario met de hoogste milieu-impact vetgedrukt. De netto-impact is aangegeven met een kruis. De scenario's zijn gerangschikt van hoogste naar laagste milieu-impact. Het patroon in A1-A3: Productiefase - BETON geeft het aandeel cement weer.

Invloed van de eindelevensduurbehandeling op de milieu-impact van betonnen constructies

Suzanne Kelem

Studentennummer: 01708066

Promotoren: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. Nele De Belie
Begeleiders: dr. ir. Philip Van den Heede, Lisa Van Gulck

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2021-2022