

heijmans

avans
hogeschool



Afstudeerscriptie

Circulaire transparantie

Het onthullen van het duurzaamheidspotentieel
van renovatie versus nieuwbouw

Auteurs: J.F. (Jan) Bos & D.J.A. (Daan) van Rijswijk
Bedrijfsbegeleider: T. (Thijs) Huijsmans
1^e afstudeerbegeleider: Mevr. E. (Ella) Braat-Eggen
2^e afstudeerbegeleider: Dhr. B. (Bas) van der Horst
Datum: 12-06-2023

Colofon

Bedrijfsgegevens:

Bedrijf:	Koninklijke Heijmans N.V.
Bezoekadres:	Graafsebaan 65, 5248 Rosmalen
Telefoon:	+31 (0) 40 250 43 00
Website:	www.heijmans.nl
Bedrijfsbegeleider:	Thijs Huijsmans
Functie:	Adviseur Senior
Mobiel begeleider:	06 17418720
E-mail begeleider:	thuijsmans@heijmans.nl

Gegevens studenten:

Naam student:	Jan Bos
Opleiding:	Bouwkunde
Studentnummer:	2156668
Telefoon:	06 13339755
E-mail-school:	jf.bos@student.avans.nl
E-mail bedrijf:	jbos2@heijmans.nl
E-mail privé:	02bosjan@gmail.com

Naam student:	Daan van Rijswijck
Opleiding:	Bouwkunde
Studentnummer:	2155206
Telefoon:	06 12971179
E-mail-school:	dja.vanrijswijck@student.avans.nl
E-mail bedrijf:	drijswijck@heijmans.nl
E-mail privé:	dvanrijswijck@gmail.com

Schoolgegevens:

School:	Avans Hogeschool
Opleiding:	HBO Bouwkunde
Afstudeeratelier:	Toekomstgericht Bouwen
Bezoekadres:	Prof. Cobbenhagenlaan 13, 5037 DA Tilburg
Telefoon:	088 5257500
Afstudeerbegeleider 1:	Ella Braat-Eggen
E-mail:	pe.braat-eggen@avans.nl
Telefoon:	06 53258070
Afstudeerbegeleider 2:	Bas van der Horst
E-mail:	b.vanderhorst@avans.nl
Telefoon:	088 5256649

Voorwoord

Voor u ligt de afstudeerscriptie 'Het onthullen van het duurzaamheidspotentieel van renovatie versus nieuwbouw'. Deze scriptie is geschreven in het kader van het afstuderen aan de opleiding Bouwkunde aan de Avans Hogeschool en in opdracht van het stagebedrijf Koninklijke Heijmans N.V. (in het verslag verder te noemen: Heijmans) te Rosmalen. Het onderzoek dat ten grondslag ligt aan de scriptie is uitgevoerd in de periode van februari 2023 tot en met juni 2023. Het onderzoek dat ten grondslag ligt aan de scriptie is uitgevoerd door Daan van Rijswijck en Jan Bos.

Tijdens het voortraject van het afstuderen vroegen wij onszelf af wat een geschikt en interessant onderwerp is, dat past bij onze interesses binnen de opleiding bouwkunde. Nadat we allebei nagedacht hadden over een geschikt onderwerp voor het afstuderen, waren we het er over eens dat we beide het onderwerp duurzaamheid interessant vinden. Een hot item binnen duurzaamheid is circulariteit. Heijmans is veel bezig met circulair bouwen en is druk bezig om circulariteit te standaardiseren binnen de bouw. Binnen de bouw gaat er een grote opgave plaatsvinden om de bestaande bouw voor 2050 te verduurzamen. Heijmans ziet mogelijkheden om de bestaande bouw op een circulaire wijze te verduurzamen door middel van circulair renoveren, waardoor dit een ideale mogelijkheid voor ons afstudeeronderzoek is.

Voordat we begonnen met het afstudeeronderzoek hebben we een plan van aanpak opgesteld. In het plan van aanpak staat de hoofdvraag van het onderzoek. De hoofdvraag is onderverdeeld in deelvragen om uiteindelijk de hoofdvraag te kunnen beantwoorden. Binnen deze scriptie is de hoofdvraag 'Op welke manier kan een organisatie als Heijmans inzichtelijk krijgen wat het circulair effect van circulair renoveren is, ten opzichte van nieuwbouw?' beantwoord.

Wij willen onze afstudeerbegeleider vanuit Heijmans: Thijs Huijsmans bedanken voor de goede begeleiding en fijne samenwerking tijdens de afstudeerperiode. Ook willen we Bart Breedijk, Roan Buis, Arko van Ekeren, Stef Versantvoort, Verena Vermeulen, Henkjan ten Braven, Daniël Huisman en Jelle Schweigmann bedanken voor de fijne samenwerking. Daarnaast willen wij onze afstudeerbegeleiders vanuit Avans Hogeschool: Ella Braat en Bas van der Horst bedanken voor de ondersteuning en feedback. Verder willen we Heijmans bedanken voor de mogelijkheden die het bedrijf heeft geboden.

Daan van Rijswijck en Jan Bos
Rosmalen, 12-06-2023

Samenvatting

“Jaarlijks worden in Nederland 245 miljard kilogram aan materialen voor binnenlandse consumptie gebruikt” (CBS, 2019). De bouwsector draagt hier veel aan bij, waar bijna 25% van haar productie afval wordt. Dit is enorm veel afval en heeft een negatieve impact op het milieu. Bij het renoveren van een gebouw kunnen materialen hergebruikt worden. Echter is het vaak nog onduidelijk wat het verschil in circulair effect is van renoveren ten opzichte van nieuwbouw.

Het doel van dit onderzoek is om een methodologie (tool) te ontwikkelen, welke inzichtelijk maakt wat de circulaire effecten zijn van circulair renoveren ten opzichte van nieuwbouw voor een bepaald onderwijsgebouw. De tool vormt een startpunt voor Heijmans om meer inzicht te krijgen in de circulaire effecten van typische onderwijsgebouwen. Hiervoor is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

“Op welke manier kan een organisatie als Heijmans inzichtelijk krijgen wat het circulair effect van circulair renoveren is, ten opzichte van nieuwbouw?”.

Door middel van literatuuronderzoek worden meetmethodes en -waardes vastgesteld. Vanuit daar wordt door middel van analyses van referentieprojecten met Solibri en BIMpact kengetallen opgedaan welke verwerkt kunnen worden in een tool om circulaire effecten inzichtelijk te maken.

“Circulair renoveren is het vernieuwen, onderhouden en hergebruiken van gebouwdelen zonder natuurlijke hulpbronnen onnodig uit te putten, de leefomgeving te vervuilen en het ecosysteem aan te tasten” (Handboek Circulair Renoveren Woningcorporaties, 2021). Nieuwe materialen worden geminimaliseerd en bestaande materialen blijven in de kringlopen van de circulaire economie.

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat circulariteit gemeten kan worden door middel van Milieuprestatiegebouw-berekeningen, CO2-waardes, materiaalstroomanalyses en toekomstwaarde. Door het ontwikkelen van een tool kunnen deze circulaire effecten inzichtelijk gemaakt worden. De belangrijkste indicatoren in deze tool zijn gevonden door middel van analyse van referentieprojecten. Deze indicatoren zijn:

- Bruto Vloeroppervlakte
- Geveloppervlakte
- Paalfundering
- Beton- of staalconstructie
- Soort gevel
- Hoeveelheid afbouw
- Percentage zware binnenwanden

De conclusie is daarom dat een organisatie als Heijmans de circulaire effecten van renoveren ten opzichte van nieuwbouw inzichtelijk kan maken met een voorspellingstool. De tool geeft inzicht in de Milieuprestatiegebouw-berekeningen, CO2-waardes en massa's wanneer er gekozen wordt voor renovatie van onderwijsgebouwen.

In dit onderzoek zijn drie representatieve gebouwanalyses gedaan. Nadrukkelijk advies aan Heijmans is daarom om meerdere gebouwen te analyseren en te verwerken in de tool. De gegevenspuntendichtheid wordt hierdoor vergroot en zorgt voor accuratere voorspellingen.

Summary

"Annually, 245 billion kilograms of materials are used for domestic consumption in the Netherlands" (CBS, 2019). The construction sector contributes significantly to this, with nearly 25% of its production becoming waste. This is a substantial amount of waste and has a negative impact on the environment. During building renovation, materials can be reused. However, it is often unclear what the difference in circular effects is between renovation and new construction.

The aim of this research is to develop a methodology (tool) that provides insight into the circular effects of circular renovation compared to new construction for a specific educational building. The tool serves as a starting point for Heijmans to gain a more understanding of the circular effects of typical educational buildings. For this purpose, the following main research question has been formulated:

"In what way can an organization like Heijmans gain insight into the circular effects of circular renovation compared to new construction?"

Through a literature research, measurement methods and values are established. Subsequently, by analyzing reference projects using Solibri and BIMpact, key performance indicators are obtained, which can be incorporated into a tool to visualize circular effects. "Circular renovation involves renewing, maintaining, and reusing building components without unnecessarily depleting natural resources, polluting the environment, or harming the ecosystem" (Handboek Circulair Renoveren Woningcorporaties, 2021). New materials are minimized, and existing materials remain within the cycles of the circular economy.

The literature research has shown that circularity can be measured through Building Environmental Performance calculations, CO2 values, material flow analyses, and future value. By developing a tool, these circular effects can be made transparent. The main indicators in this tool are identified through the analysis of reference projects. These indicators include:

- Gross floor area
- Facade area
- Pile foundation
- Concrete or steel structure
- Type of facade
- Amount of spaceplan
- Percentage of heavy interior walls

Therefore, the conclusion is that an organization like Heijmans can make the circular effects of renovation compared to new construction transparent by utilizing a predictive tool. The tool provides insights into the Building Environmental Performance calculations, CO2 values, and material quantities when choosing to renovate educational buildings.

In this research, three representative building analyses were conducted. It is strongly advised that Heijmans analyze and incorporate multiple buildings into the tool. This will increase the density of data points and provide more accurate predictions.

Leeswijzer

In de inleiding wordt algemene informatie over de scriptie weergegeven. Informatie over de aanleiding en probleemdefinitie, doelstelling en afbakening van het onderwerp. Vervolgens is de hoofdvraag met bijbehorende deelvragen geformuleerd.

Na de inleiding volgt het theoretisch kader. In het theoretisch kader worden kernbegrippen als circulariteit, circulair renoveren en systeemlagen onderzocht. Vervolgens worden circulaire meetmethodes en waardes vastgesteld, welke later toegepast worden voor de gebouwanalyse.

Tijdens de gebouwanalyse worden meerdere referentieprojecten (onderwijsgebouwen) geanalyseerd en uitgetrokken volgens de vastgestelde methodes. Uit deze gebouwanalyses komen resultaten.

Deze resultaten worden vervolgens weergegeven in hoofdstuk 3 en samen met de bevindingen uit het theoretisch kader vormt dit de basis voor de ontwikkelde tool. De tool is het eindproduct voor het inzichtelijk maken van circulaire effecten. Deze tool en de werking hiervan wordt toegelicht in de laatste paragraaf van hoofdstuk 3. Hierop volgen de conclusie en de discussie met aanbevelingen.

Achterin de scriptie staan de literatuurlijst, afbeeldingenlijst en een grafieken- en tabellenlijst. In het bijgevoegde bijlagenboek zijn extra resultaten en toelichtingen te vinden.

Inhoudsopgave

Afkortingenlijst	8
Begrippenlijst	9
1. Inleiding	12
1.1 AANLEIDING EN PROBLEEMDEFINITIE	12
1.2 DOELSTELLING	12
1.3 AFBAKENING	13
1.4 Vraagstelling	14
1.4.1 Hoofdvraag	14
1.4.2 Deelvragen	14
1.5 Onderzoeksmethoden	14
2. Theoretisch kader	15
2.1 Circulair renoveren	15
2.1.1 Lineaire economie	15
2.1.2 Circulaire economie	16
2.1.3 Definitie circulair renoveren	19
2.2 Het meten van circulaire effecten	22
2.2.1 Circulaire effecten	22
2.2.2 Relevante effecten	24
2.2.3 Meetmethodes	27
2.3 Beoordelen van systeemplagen op toekomstwaarde	32
2.3.1 Toekomstwaarde	32
2.3.2 Bepalende factoren van toekomstwaardegebouw	32
2.3.3 Systeemplagen beoordelen op toekomstwaarde	34
2.4 Het inzichtelijk maken van materialen en de herkomst hiervan	36
2.4.1 Materiaalstroomanalyse	36
2.4.2 Relevantie van een materiaalstroom	37
2.4.3 Materialen indelen	39
2.5 De circulaire effecten inzichtelijk maken	42
2.5.1 BIM	42
2.5.2 Methodologie	43
2.5.3 Software	45
3. Resultaten van de gebouwanalyse	48
3.1 De massa en milieu-impact van een onderwijsgebouw verdeeld over de systeemplagen	48
3.1.1 Het typische onderwijsgebouw en zijn systeemplagen	49

3.1.2 Milieu-impact en MFA.....	50
3.1.3 CO ₂	51
3.2 Het inzichtelijk maken van het circulair effect van circulair renoveren in een dashboard	55
3.2.1 Analyse.....	55
3.2.2 Gevonden criteria met bijbehorende formules	64
3.2.3 De tool.....	66
4. Conclusie	68
5. Discussie	69
5.1 Verwachtingen.....	69
5.2 Validiteit	69
5.3 Resultaten interpreteren	69
5.4 Beperkingen	70
5.5 Maatschappelijke relevantie	70
5.6 Aanbevelingen	71
Literatuur en informatiebronnen.....	72
Afbeeldingenlijst	78
Grafieken- en tabellen lijst	79
Bijlage	80

Afkortingenlijst

3D	Driedimensionaal
BVO	Bruto Vloeroppervlak
BIM	Building Information Model
CO₂	Koolstofdioxide
DD	Dubois Domein
GPR	Gemeentelijke Praktijk Richtlijn
GWP	Global Warming Potential
HH	Hanze Hogeschool
IFC	Industry Foundation Classes
Kg	Kilogram
LCA	Levenscyclusanalyse
MFA	Material Flow Analysis
MKI	Milieukostenindicator
MPG	Milieuprestatie gebouwen
m²	Vierkante meter
NMD	Nationale Milieu Database
SC	Science Campus
SDG	Sustainable Development Goals
TU/e	Technische Universiteit Eindhoven

Begrippenlijst

Abiotische grondstoffen

Grondstoffen die niet afkomstig zijn uit de levende natuur.

Adaptief vermogen

Het vermogen van een gebouw om op een duurzame en economisch rendabele wijze zijn functionaliteit te behouden, ook bij verandering van gebruik.

Afval(stof)

stof, preparaat of voorwerp waarvan de houder zich ontdoet, voornemens is zich te ontdoen of zich moet ontdoen en die wordt geloosd in de (leef)omgeving
[BRON: Platform CB'23 Lexicon circulaire bouw]

BIM

Digitale manier van werken, waar gebouwen gemodelleerd zijn. In deze manier van werken zijn gegevens overzichtelijk en makkelijk uit te wisselen.

Bio-cycle

De biologische kringloop bevat organische materialen zoals hout, voedsel en water. Deze materialen kunnen door middel van biologische processen terug opgenomen worden in het ecosysteem en opnieuw worden gebruikt.

Biotische grondstoffen

Grondstoffen die vrij in de natuur voorkomen.

Broeikasgassen

Gassen welke het broeikaseffect versterken en de warmte op aarde houden.

Convenant

Afspraak van de overheid met een of meer partijen gericht op het behalen van bepaalde doelen.

Circulaire economie

"Bij een circulaire economie worden de kringlopen van alle grondstoffen gesloten. Bestaande materialen en producten worden gedeeld, hergebruikt, gerepareerd, opgeknapt en gerecycled."

(Circulaire Economie: Definitie, Belang En Voordelen | Nieuws | Europees Parlement, 2023)

Circulaire strategie

activiteit die wordt uitgevoerd met de intentie om bij te dragen aan een circulaire economie (3.13)

[BRON: Platform CB'23 Lexicon circulaire bouw]

Opmerking 1 bij de term: Voorbeelden van circulaire strategieën zijn levensduurverlenging, het vergroten van adaptief vermogen en de R-principes

Circulair renoveren

"Het onderhouden, vernieuwen en hergebruiken van gebouw(delen) zonder natuurlijke hulpbronnen onnodig uit te putten, de leefomgeving te vervuilen en het ecosysteem aan te tasten. Gebouwen renoveren op een wijze die economisch verantwoord is en bijdraagt aan het welzijn van mens en dier" (Circulair Renoveren - Handboek, z.d.)

CO2-neutraal

Als er een evenwicht is tussen de CO₂-opname en -uitstoot van een materiaal is er sprake van CO₂-neutraliteit. Een voorbeeld is hout.

End-of-life scenario

Hetgeen wat met een materiaal gebeurt na gebruik.

Ecosysteem

Het samenspel tussen planten, dieren en hun omgeving in een gebied, en de onderlinge verhoudingen die hieruit voortbestaan.

Grondstoffen

Natuurlijke hulpbronnen die gebruikt worden voor productie.

Hernieuwbare grondstoffen

Grondstoffen die (bijna) onuitputtelijk zijn, omdat ze weer terug kunnen groeien.

IFC-bestand

Bestandsformaat voor modelleren.

Klimaatverandering

Verandering van het klimaat op de aarde.

Kringloop

Het doorlopen van meerdere stappen om uiteindelijk bij terug de uitgangstoestand te bereiken.

Lineaire economie

"De lineaire economie heeft een hoog grondstofverbruik, wat een grote impact heeft op de aarde. De gebruikte grondstoffen worden aan het eind van de levensfase verwerkt of verbrand."

(Het Groene Brein, 2022)

Losmaakbaarheid

De mate waarin objecten demonteerbaar zijn, zodat het object zijn functie en waarde kan behouden.

Materiaalstroom

De fases die een materiaal doorloopt van verwerving tot einde.

Materiaalstroomanalyse

Het in kaart brengen van de levensloop van materialen.

Methodologie

Manier om een probleem aan te pakken of een doel te behalen.

Milieu-impact

Het gevolg van activiteiten op het milieu, zoals CO₂-uitstoot of impact op de biodiversiteit.

Nationale Milieu Database

Database met gegevens van materialen om milieuberekeningen te kunnen maken.

Primaire grondstoffen

Grondstoffen die uit de natuur gewonnen worden en nog niet bewerkt of verwerkt zijn.

Schaduwkosten

De kosten van een gebouw of product op het milieu.

Secundaire grondstoffen

Grondstoffen die worden gewonnen door recycling of hergebruik.

Systeemlagen

De lagen van een gebouw volgens het model van Stewart Brand. Stuff, spaceplan, services, structure, skin en site.

Techno-cycle

De technische kringloop bevat materialen zoals fossiele brandstoffen, kunststoffen en metalen. De materialen zijn beperkt beschikbaar en kunnen we niet makkelijk opnieuw creëren.

Toekomstwaarde

De waarde van een gebouw met betrekking tot adaptiviteit, waardevastheid, energieverbruik en materiaalgebruik.

1. Inleiding

1.1 AANLEIDING EN PROBLEEMDEFINITIE

“Jaarlijks worden in Nederland 245 miljard kilogram aan materialen voor binnenlandse consumptie gebruikt” (CBS, 2019). De bouwsector draagt hier veel aan bij, waar bijna 25% van haar productie afval wordt. Dit is enorm veel afval en heeft een negatieve impact op het milieu. Daarom streeft de overheid naar de realisatie van een circulaire economie vanaf 2050 (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023). Het hergebruiken van bouwmaterialen en het efficiënt & hoogwaardig omgaan van grondstoffen in bestaande ketens speelt een grote rol bij het behalen van deze doelstelling (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022).

Bij het renoveren van een gebouw kunnen materialen hergebruikt worden. Echter is het vaak nog onduidelijk wat het verschil in circulair effect is van renoveren ten opzichte van nieuwbouw. Wij zien hier mogelijkheden en willen daarom verdiepend onderzoek doen naar het inzichtelijk maken van circulaire effecten bij renovatie. Bij circulaire effecten kan men denken aan impact op milieu, materiaalstroom en toekomstwaarde van het gebouw. Een materiaalstroom is een analyse van materialen waaruit een gebouw bestaat en wat er uiteindelijk met de materialen gedaan kan worden (recycling, hergebruik, refurbish, storten en herfabricage). Onder toekomstwaarde wordt verstaan de levensduur van een gebouw (Herindelen, herbestemmen, uitbreiden of afstoten) (Wat is de toekomstwaarde van uw gebouw? 2023, januari). Ook Heijmans is bezig met deze ontwikkelingen en heeft zelfs een duurzaamheidsteam opgesteld om te innoveren en vooraanstaand te blijven op het gebied van duurzaamheid en circulariteit. In combinatie met Heijmans en haar duurzaamheidsteam kunnen we dit onderzoek tot stand laten komen. (Open overheid, september 2016).

1.2 DOELSTELLING

De doelstelling is om aan het einde van het onderzoek een methodologie (tool) ontwikkeld te hebben, welke inzichtelijk maakt wat de circulaire effecten zijn van circulair renoveren ten opzichte van nieuwbouw voor een bepaald onderwijsgebouw.

De tool vormt een startpunt voor Heijmans om meer inzicht te krijgen in de circulaire effecten van typische onderwijsgebouwen. Het gebruik door Heijmans is tweeledig:

- Tool om bij besluitvorming rondom renovaties de circulaire effecten mee te wegen. Vormen van renovatie zijn bijvoorbeeld slopen/nieuwbouw, renoveren tot casco of alleen binnenwanden verplaatsen.
- Voorspellingstool in de vorm van een dashboard, om voorspellingen te doen en overzicht te geven in circulaire effecten van onderwijsgebouwen, dat weer als input gebruikt kan worden bij besluitvorming en als feedback naar de opdrachtgever.

De tool is een dashboard waarin je per systeemlaag kan zien wat de circulaire effecten zijn. De methodologie wordt ontwikkeld vanuit literatuuronderzoek en analyses van bestaande onderwijsgebouwen in BIM, aangereikt door Heijmans.



Figuur 1: Stappenplan voor het ontwikkelen van de tool

1.3 AFBAKENING

- Binnen het onderzoek zal de focus liggen op circulair renoveren. Binnen circulair renoveren kijken we naar de volgende typen renovatie:
 - Volledig slopen en nieuwbouw
 - Constructie laten staan en overige renoveren
 - Constructie en schil laten staan en overige renoveren
 - Binnenwanden verschuiven
- De tool is een prototype en vormt een startpunt voor Heijmans.
- Bij het ontwikkelen van de methodologie wordt nieuwbouw slechts bestudeerd als referentie.
- De methodologie heeft enkel betrekking op onderwijsgebouwen.
- We doen onderzoek door maximaal 5 referentieprojecten van onderwijsgebouwen uit te trekken en te vergelijken, afhankelijk van de benodigde tijd per gebouw. De referentieprojecten zijn de verkregen BIM-modellen van de onderwijsgebouwen.
- In ons onderzoek wordt de milieu-impact beschreven als MPG (MilieuPrestatieGebouwen) en CO2-uitstoot.
- Wij houden geen rekening met E&W installaties.
- Geld wordt buiten beschouwing gelaten. Echter, de MKI wordt altijd uitgedrukt in Euro's. Wij nemen dit wel mee in het onderzoek, omdat de MKI een goede indicator is van de impact van een materiaal op het milieu.
- De onderzoeksperiode loopt van 30 januari 2023 tot 15 juni 2023.
- Beoordelen van toekomstwaarde wordt slechts beschreven maar niet in de tool verwerkt.

1.4 Vraagstelling

1.4.1 Hoofdvraag

Op welke manier kan een organisatie als Heijmans inzichtelijk krijgen wat het circulair effect van circulair renoveren is, ten opzichte van nieuwbouw?

1.4.2 Deelvragen

Theoretisch onderzoek:

- Wat wordt verstaan onder circulair renoveren?
- Hoe meten we circulaire effecten?
- Wat is de massa en milieu impact van een typisch onderwijsgebouw verdeeld over de systeemplagen?
- Hoe kan een systeemplag, zoals skin, structure en spaceplan beoordeeld worden op toekomstwaarde?

Veldonderzoek:

- Welke methodologie kan gebruikt worden om circulaire effecten inzichtelijk te maken?
- Hoe kan de herkomst van materialen inzichtelijk gemaakt worden?

Ontwerpend onderzoek:

- Hoe ziet het te ontwikkelen dashboard eruit, dat Heijmans helpt met het inzichtelijk maken van het circulair effect van circulair renoveren?

1.5 Onderzoeksmethoden

In deze scriptie wordt onderzoek gedaan door middel van literatuuronderzoek, analyse van referentieprojecten en ontwerpend onderzoek.

Circulair renoveren omvat het duurzaam hergebruiken van materialen en het minimaliseren van milieueffecten. De definitie en principes van circulair renoveren worden onderzocht via literatuuronderzoek.

De meetmethodes worden vastgesteld aan de hand van circulaire doelen. Deze doelen worden gevonden aan de hand van bestaande literatuur.

Beoordeling van de toekomstwaarde van systeemplagen vereist het onderzoeken van criteria en factoren zoals duurzaamheid en flexibiliteit.

Het inzichtelijk maken van de herkomst van materialen wordt onderzocht aan de hand van literatuur en bestaande methodes binnen Heijmans.

Door middel van analyse van referentieprojecten wordt inzicht verkregen in de massa- en milieu-impact van onderwijsgebouwen verdeeld over systeemplagen. Dit helpt bij het begrijpen van het materiaalgebruik en de daarmee samenhangende milieueffecten.

Ten slotte wordt een dashboard ontworpen dat Heijmans kan helpen om het circulaire effect van circulair renoveren inzichtelijk te maken. Dit wordt bereikt via ontwerpend onderzoek en gebruikt de vastgestelde meetwaarden.

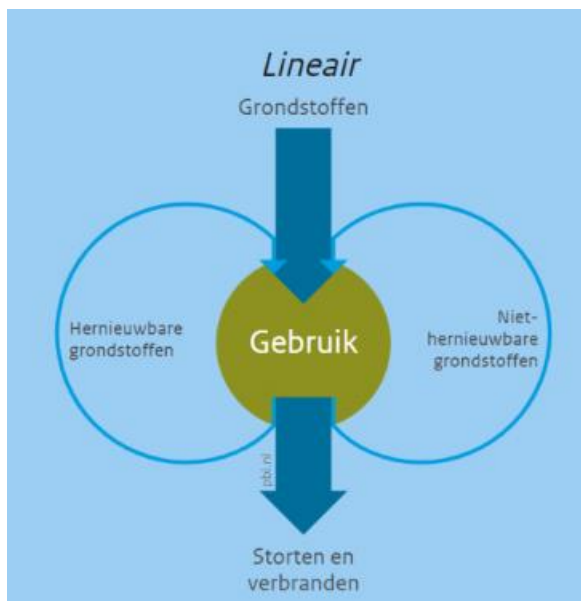
2. Theoretisch kader

2.1 Circulair renoveren

Om beter te begrijpen wat verstaan wordt onder 'circulair renoveren' zal er eerst duidelijk gemaakt moeten worden wat een lineaire en circulaire economie inhoudt. Hierdoor wordt het duidelijker wat circulair renoveren is. Dit omdat circulair renoveren onderdeel is van een circulaire economie.

2.1.1 Lineaire economie

In de huidige economie worden grote hoeveelheden grondstoffen gewonnen en verwerkt tot een product. Dit wordt een Lineaire economie genoemd. Het product wordt gebruikt en aan het eind van de levensfase bestempeld als afval. Afval dat ontstaat wordt verwerkt op de stort. Afval dat niet verwerkt kan worden, wordt verbrand. Slechts een klein deel van de producten wordt gerecycled of hergebruikt.



Figuur 2: Lineaire economie (Bron: Wat Is Het Verschil Tussen Een Circulaire En Een Lineaire Economie? - Kenniskaarten - Het Groene Brein, 2022)

De lineaire economie heeft een hoog grondstofverbruik, wat een grote impact heeft op de aarde. De gebruikte grondstoffen worden aan het eind van de levensfase verwerkt of verbrand. Bij dit proces komen schadelijke stoffen vrij die impact hebben op het milieu. Zo ook broeikasgassen. Dit zorgt voor klimaatverandering. (Het Groene Brein, 2022).

2.1.2 Circulaire economie

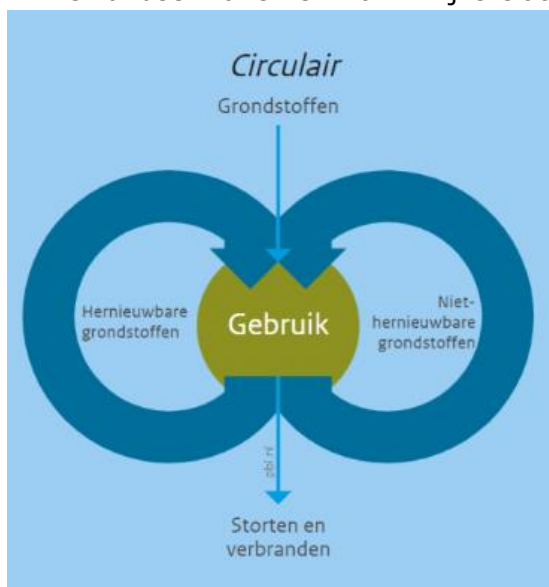
Een circulaire economie is anders opgebouwd dan een lineaire economie. Bij een circulaire economie worden de kringlopen van alle grondstoffen gesloten. Bestaande materialen en producten worden gedeeld, hergebruikt, gerepareerd, opgeknapt en gerecycled. Hierdoor wordt grondstofgebruik gereduceerd en worden er zoveel mogelijk duurzame hernieuwbare grondstoffen gebruikt. (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023) (Circulaire Economie: Definitie, Belang En Voordelen | Nieuws | Europees Parlement, 2023).

Nederland wil voor 2050 een circulaire economie hebben waarin afval niet bestaat. Dit komt uit een Rijksbreed programma gepresenteerd door Rijksoverheid 'Nederland circulair in 2050'. Rijksoverheid heeft dit programma gepresenteerd naar aanleiding van het Klimaatakkoord dat tot stand kwam in 2015 in Parijs. In dit akkoord hebben 195 landen afgesproken om in 2050 de gemiddelde temperatuurstijging in de wereld te beperken tot maximaal twee graden Celsius.

Het Rijksbrede programma 'Nederland circulair in 2050' zal zorgen dat de huidige lineaire economie zal transformeren in een circulaire economie. Rijksoverheid heeft twee doelstellingen geformuleerd om deze ambitie te kunnen halen.

- Het kabinet streeft naar een samenwerking met maatschappelijke partners om in 2030 een reductie van 50% te kunnen realiseren voor het gebruik van primaire grondstoffen.
- Het kabinet wil met haar maatschappelijke partners dat in 2050 grondstoffen efficiënt worden ingezet en worden hergebruikt zonder schadelijke emissies naar het milieu.

(Het ministerie van Infrastructuur en Milieu en het ministerie van Economische Zaken, mede namens het ministerie van Buitenlandse Zaken en het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, 2016).



Figuur 3: Circulaire economie (Bron: Wat Is Het Verschil Tussen Een Circulaire En Een Lineaire Economie? - Kenniskaarten - Het Groene Brein, 2022)

In een circulaire economie wordt de circulatie van materialen opgedeeld in twee aparte kringlopen: De biologische en technische kringloop. Deze twee kringlopen weergeven twee verschillende manieren waarop materiaal langdurig en hoogwaardig kan worden hergebruikt. Het aantal processtappen dat het materiaal doorloopt voor hergebruik bepaalt hoe hoogwaardig dit materiaal in te zetten is. Minder processtappen resulteert in zo min mogelijk waardeverlies, wat zorgt voor een betere inzetbaarheid.

Biologische kringloop

De biologische kringloop wordt ook wel de 'bio-cycle' genoemd. De definitie luidt:

"*Organische materialen* zoals hout, voedsel en water, kunnen we door middel van biologische processen terug laten opnemen in het ecosysteem en zo opnieuw gebruiken. In de *bio-cycle* is het van belang om het ecosysteem zo goed mogelijk haar werk te laten doen. Uit wat de bio-cyclus produceert kunnen we consumeren, zolang de cyclus niet besmet raakt met giftige stoffen en we de ecosystemen niet overbelasten, bijvoorbeeld door overbemesting of overbevissing. Wanneer de consumptie in balans is met het vermogen van de bio-cyclus om grondstoffen op te nemen en te regenereren, kunnen we organische grondstoffen eindeloos opnieuw introduceren." (Ellen MacArthur Foundation, 2015a).

Technische kringloop

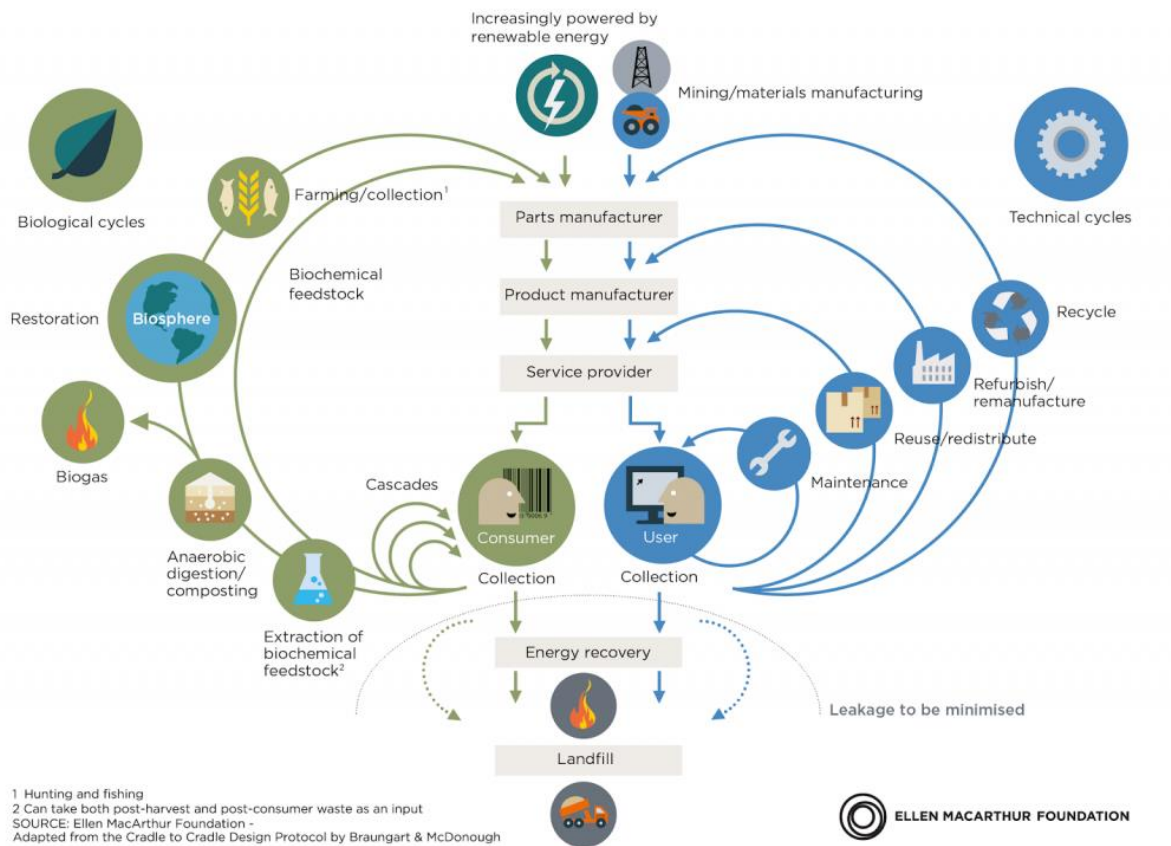
De technische kringloop wordt ook wel de 'techno-cycle' genoemd. De definitie luidt:

"*Technische materialen* zoals fossiele brandstoffen, kunststoffen en metalen, zijn beperkt beschikbaar en kunnen we niet makkelijk opnieuw creëren. In de *techno-cycle* is het belangrijk dat we de voorraden van zulke eindige materialen goed beheren. In een circulaire economie *gebruiken* we materialen enkel nog, in plaats van dat we ze *verbruiken* en afdanken. Na gebruik winnen we de materialen weer met hun oorspronkelijke waarde terug uit reststromen." (Ellen MacArthur Foundation, 2015a).

Het verschil tussen de twee kringlopen is dat bij een technische kringloop gebruik gemaakt wordt van grondstoffen die beperkt beschikbaar zijn. In deze kringloop is het van belang dat het product de waarde zo lang mogelijk behoudt. In de Biologische kringloop worden alleen grondstoffen gebruikt die niet giftig en weer hernieuwbaar zijn uit het **ecosysteem**. Het model dat beide kringlopen weergeeft wordt het vlindermodel genoemd.

Een visualisatie van het 'vlindermodel' ziet er als volgt uit (zie Figuur 5):

CIRCULAR ECONOMY - an industrial system that is restorative by design



Figuur 4: Vlinderdiagram Ellen MacArthur Foundation (Bron: Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition, 2015)

2.1.3 Definitie circulair renoveren

Circulair renoveren is onderdeel van een circulaire economie. De definitie hiervan luidt:

“Het onderhouden, vernieuwen en hergebruiken van gebouw(delen) zonder natuurlijke hulpbronnen onnodig uit te putten, de leefomgeving te vervuilen en het ecosysteem aan te tasten. Gebouwen renoveren op een wijze die economisch verantwoord is en bijdraagt aan het welzijn van mens en dier” (Handboek Circulair Renoveren Woningcorporaties, 2021).

Renoveren zelf is al circulair. Een gebouw wordt opgeknapt waardoor deze langer te gebruiken is. Wanneer een gebouw wordt opgeknapt met materialen die hernieuwbaar zijn en het ecosysteem niet wordt aangetast is er sprake van circulair renoveren.

Het huidige renoveren wordt nog niet op een circulaire manier gedaan. Om circulair te renoveren mogelijk te maken moeten de volgende stappen aangehouden worden:

- Het minimaliseren van nieuw materiaal. Dit houdt in het slimmer ontwerpen, gebruiken en renoveren van gebouwdelen. Hierdoor is er geen of minimaal materiaal nodig.
- Maak gebruik van de binnenste lussen van de technische kringloop (zie afbeelding vlinderdiagram): bestaande gebouwen, componenten, producten en materialen. Zodat deze zo lang mogelijk meegaan in één of meerdere kringlopen.
- Gebruik zo veel mogelijk materialen en grondstoffen die hernieuwbaar, herbruikbaar of afbreekbaar zijn. De materialen moeten teruggebracht kunnen worden in de biologische of technische kringloop.

Voordelen circulair renoveren

Circulair renoveren brengt een aantal voordelen met zich mee.

- Wanneer gebouwen circulair gerenoveerd worden, zal er een grote vermindering van afval zijn binnen de bouw. Met circulair renoveren worden materialen hergebruikt of wordt er gebruik gemaakt van duurzame materialen. Materialen blijven hierdoor binnen de kringlopen van een circulaire economie.
- Het zal op lange termijn kostenbesparend zijn doordat het gebruik van duurzame materialen leidt tot lagere afval- en energiekosten.
- Doordat bij circulair renoveren materialen duurzaam zijn of worden hergebruikt zal de CO₂-uitstoot ook veel minder zijn.
- Circulair renoveren zal de waarde van gebouwen ook verhogen doordat gebouwen een langere levensduur hebben en de restwaarde van gebouwen hoger zal zijn, dit doordat materialen weer her inzetbaar zijn voor andere gebouwen.
- Nog een belangrijk voordeel hiervan is dat er gezonde gebouwen ontstaan voor de mens en het milieu.

(Handboek Circulair Renoveren Woningcorporaties, 2021).

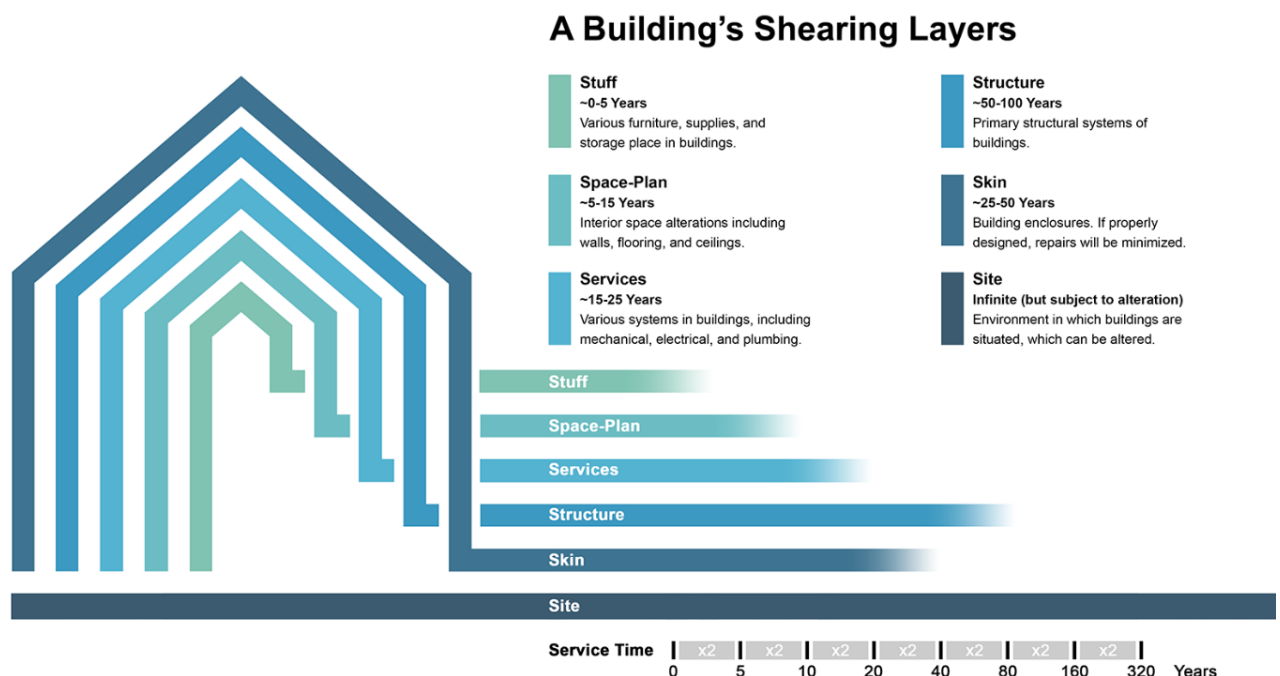
Rol van een circulaire renovatie in een circulaire bouweconomie

Circulair renoveren gaat een steeds belangrijke rol spelen. In het 'Klimaatakkoord' staat dat de gebouwde omgeving in 2050 CO₂-neutraal moet zijn. Dit betekent dat er 8 miljoen gebouwen verduurzaamd dienen te worden. (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2022). Door circulair te renoveren zullen grondstoffen niet meer uitgeput worden en blijven de materialen binnen de kringlopen. De CO₂ uitstoot zal hierdoor drastisch omlaag gaan. Renoveren op een circulaire wijze draagt bij aan het behalen van het klimaatakkoord. Binnen de bouw moet er circulair gebouwd gaan worden en moeten de bestaande gebouwen circulair gerenoveerd worden.

Binnen de bouw zijn modellen ontwikkeld die een belangrijke rol spelen bij circulair renoveren. Eén model hiervan is het model van Stewart Brand.

Dit model maakt onderscheid in de omloopsnelheid van materialen binnen de gebouwde omgeving. Het model maakt onderscheid door een gebouw op te delen in zes verschillende lagen, met iedere laag een andere levensduur.

Een visualisatie van het model van Stewart Brand 'Shearing Layers' ziet er als volgt uit (zie Figuur 6):



Figuur 5: 6 lagen model Stewart Brand (Bron: Building Enclosure, z.d.)

Het model van Stewart brand bestaat uit de lagen:

- Stuff (0-5 jaar).
- Space-Plan (5-15 jaar).
- Services (5-25 jaar).
- Structure (50-100 jaar).
- Skin (25-50 jaar).
- Site (100+ jaar).

(Building Enclosure, z.d.).

Volgens het model kunnen alle lagen los van elkaar gerenoveerd worden. Doordat de lagen los van elkaar gerenoveerd kunnen worden, worden er niet onnodig gebouwdelen afgebroken en worden er dus geen onnodige grondstoffen weer in het gebouw verwerkt. De levensduur van de lagen wordt hierdoor verlengd. Binnen dit onderzoek worden nieuwbouw en drie typen renovatie van onderwijsgebouwen behandeld.

- Gebouw volledig slopen en opnieuw bouwen.
- Constructie laten staan en overige renoveren.
- Constructie en schil laten staan en overige renoveren.
- Binnenwanden verschuiven (afbouw).

Deze drie typen renovatie zijn het meest gewenst bij de opdrachtgevers van Heijmans. Deze zorgen voor een grote verandering in functionaliteit en uiterlijk binnen of buiten het gebouw. In de verdere uitwerking van dit rapport wordt constructie genoemd als structure, schil als skin en afbouw als spaceplan.

Om een gebouw circulair te kunnen renoveren, moet er circulair gesloopt worden. Hiermee wordt bedoeld dat de bestaande bouw afgebroken wordt op een wijze waardoor de vrijkomende materialen hergebruikt of gerecycled kunnen worden. Hierdoor blijven de materialen binnen de kringlopen van de circulaire economie en wordt er op een circulaire manier gesloopt. Wat hiervan de circulaire effecten zijn en hoe de circulaire effecten meetbaar worden, wordt behandeld in het hoofdstuk 'Hoe meten we circulaire effecten'.

Tot slot kan worden geconcludeerd dat circulair renoveren onderdeel is van een circulaire economie. Circulair renoveren is het vernieuwen, onderhouden en hergebruiken van gebouwdelen zonder natuurlijke hulpbronnen onnodig uit te putten, de leefomgeving te vervuilen en het ecosysteem aan te tasten. Gebouwen worden op een duurzame manier onderhouden, vernieuwd en hergebruikt. Nieuwe materialen worden geminimaliseerd, en bestaande materialen blijven in de kringlopen van de circulaire economie. Materialen die worden gewonnen zijn hernieuwbaar, herbruikbaar of afbreekbaar. Circulair renoveren draagt bij aan het welzijn van mens en dier.

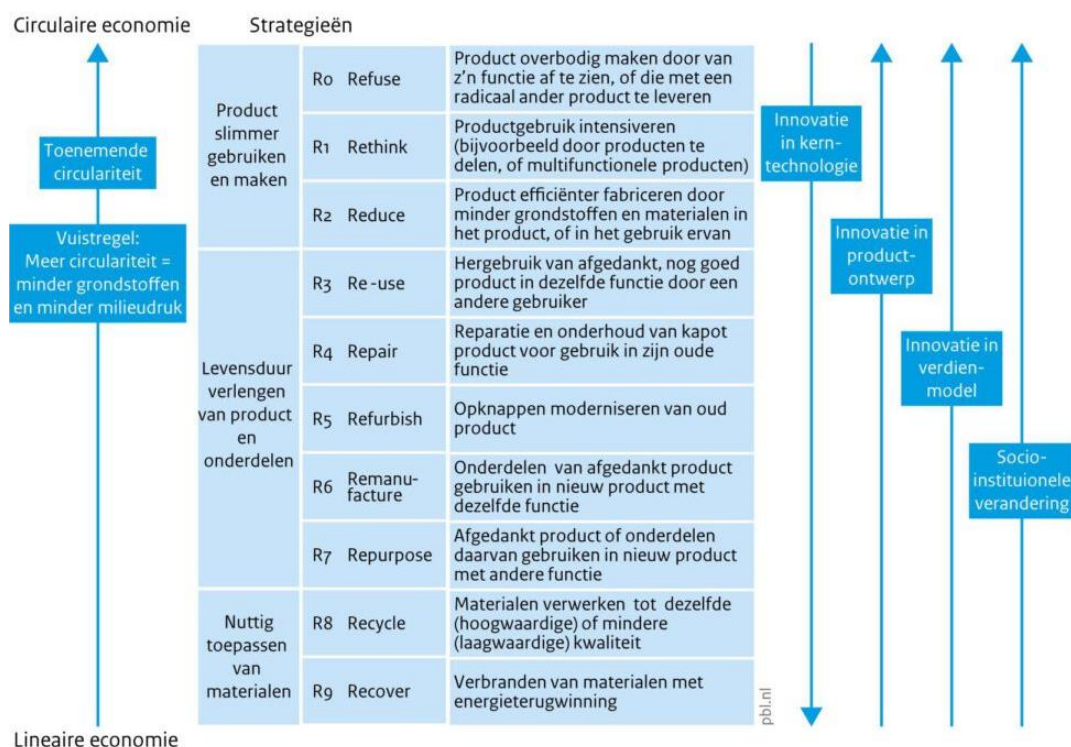
2.2 Het meten van circulaire effecten

Het doel van circulariteit is het beperken van milieuschade. Het is daarom belangrijk om inzichtelijk te krijgen wat uiteindelijk de effecten van circulariteit zijn op het milieu. Door deze effecten te meten kunnen betere circulaire keuzes gemaakt worden.

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat circulaire effecten zijn en welke circulaire effecten relevant zijn bij besluitvorming voor een type renoveren. Verder zal de manier van meten en de relevante waarden vastgesteld worden.

2.2.1 Circulaire effecten

Vaak ligt de R-ladder ten grondslag aan het bepalen van circulariteit. Deze ladder geeft de mate van circulariteit aan. De strategie bovenaan de ladder bespaard meer grondstoffen en is dus meer circulair. De strategie onderaan de ladder is het minst circulair (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2023).



Figuur 6: R-ladder (Bron: PBL, 2016)

Waar met de R-ladder de mate circulariteit wordt gemeten, ligt het zwaartepunt in dit onderzoek voornamelijk bij de effecten van een gekozen strategie.

Zoals vastgesteld in het vorige hoofdstuk zullen de volgende vier strategieën aan bod komen:

Alles slopen opnieuw bouwen	R8/R9
De constructie behouden en het overige renoveren	R5
De constructie en de schil behouden	R4/R5
Binnenwanden verschuiven	R3/R4

Aan de hand van de ladder wordt duidelijk dat alleen binnenwanden verschuiven de meest circulaire strategie is. Met het oog op circulariteit zal dit dus de beste optie zijn van de drie. Echter, de opdrachtgever is dan wel meer beperkt in zijn ontwerp. Ook zal de kwaliteit van het gebouw er dan niet beduidend op vooruitgaan. Dit is dus een overweging die gemaakt zal moeten worden door de opdrachtgever.

De R-ladder geeft dus goed de mate van circulariteit weer, maar niet de circulaire effecten hiervan. Het is niet duidelijk in hoeverre een bepaalde strategie "beter" is dan de andere.

Eerst moet vastgesteld worden waarom de ene circulaire strategie "beter" is dan de andere. Een strategie is beter dan een andere strategie als die sneller tot het doel leidt. Het doel is in dit geval vastgesteld door de overheid. "Nederland moet in 2050 een volledig circulaire economie zijn". De wereldbevolking neemt snel toe, waardoor de vraag naar grondstoffen toeneemt en de voorraad afneemt. Zeker met het oog op de volgende generaties is het daarom van belang om efficiënt en zorgvuldig met grondstoffen om te gaan. Daarbij zorgt grondstoffen langer en efficiënter toepassen voor minder uitstoot van broeikasgassen en dus minder belasting op het milieu. Er is namelijk veel energie nodig voor de productie van materialen. Verder zorgt hergebruik van grondstoffen voor minder afval en minder afhankelijkheid van andere landen. Minder afval leidt dan weer tot minder vervuiling (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022). De bouw zal in de transitie naar circulariteit een van belangrijkste schakels vormen aangezien de bouw verantwoordelijk is voor de helft van de totale afval van alle bedrijfstakken (cbs, 2019). Hier is in hoofdstuk 2.1 dieper op ingegaan.

Hieruit is op te maken dat de overheid een aantal doelen wil halen door middel van circulariteit.

Dit zijn:

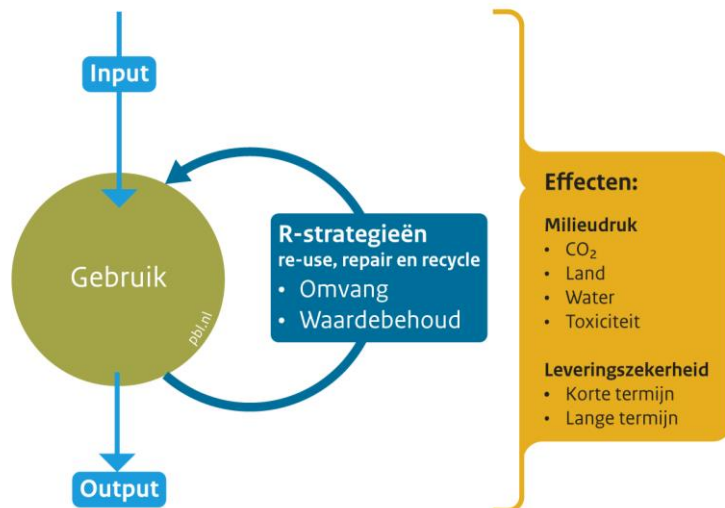
- Minder verbruik grondstoffen
- Minder afval
- Minder uitstoot van broeikasgassen
- Minder afhankelijk van andere landen

Dit zijn de effecten die behaald willen worden met circulariteit. Oftewel, dit zijn circulaire effecten.

Het planbureau voor de Leefomgeving (2019) heeft een artikel geschreven waarin gesteld wordt dat doelen en effecten van circulariteit in ogenschouw genomen moeten worden om tot betere sturing te komen. "Een circulaire economie vraagt niet alleen om sturen op de omvang van grondstoffenstromen, maar ook op de waarde ervan en de beoogde effecten:

minder milieudruk en verbetering van de leveringszekerheid van kritieke materialen”.

Aangrijpingspunten voor doelen circulaire economie



Figuur 7: Aangrijpingspunten voor doelen van de circulaire economie (Bron: PBL, 2019)

Het PBL refereert naar de kabinetsdoelstelling van 2030: een halvering van het gebruik van primaire abiotische grondstoffen.

Abiotische grondstoffen zijn grondstoffen die niet vernieuwbaar zijn (Ensie, 2019). Denk hierbij aan metalen, mineralen en fossiele grondstoffen.

De kabinetsdoelstelling geeft sturing voor het grondstoffengebruik in absoluut gewicht. Echter, geen enkel materiaal is hetzelfde. Er is altijd een verschil in impact op het milieu en toekomstwaarde.

Binnen de abiotische grondstoffen zijn namelijk nog veel onderlinge verschillen qua winning en materiaaleigenschappen. Een ton goud heeft in vergelijking met een ton zand een heel andere milieudruk. Ook levert in de regel het hergebruiken van een product meer milieuwinst op dan bij recycling. Het verminderen van grondstoffen aan de hand van absolute massa's is dus geen garantie op het efficiënt behalen van milieuwinst. Het is daarom belangrijk om milieu-impact van materialen inzichtelijk te maken.

Het PBL (2019) schrijft: "Voor het beleid gericht op een circulaire economie bevelen we aan te werken met een set doelen die kijkt naar de input, het gebruik, en de output van grondstoffen, zowel in tonnen als in euro's (figuur 1). Deze eenheden moeten uitdrukking geven aan de beoogde effecten".

2.2.2 Relevante effecten

In de vorige paragraaf zijn circulaire effecten beschreven. Echter, niet al deze circulaire effecten zijn relevant voor de bouwsector. Het is dus belangrijk om vast te stellen wat van belang kan zijn.

Platform CB'23 (Circulair Bouwen 2023) zet zich in voor afspraken over circulariteit in de bouw. De initiatiefnemers zijn Rijkswaterstaat, het Rijksvastgoedbedrijf, de Bouwcampus en NEN. Binnen het platform gaan mensen van betrokken partijen uit de gehele

bouwsector (onder meer marktpartijen, beleidsmakers en wetenschappers) in gesprek om tot breedgedragen afspraken te komen. Uit een consensusproces met deze betrokken partijen zijn drie doelen van circulair bouwen vastgesteld:



materiaalvoorraden (uitputting voorkomen)



milieu (kwaliteit leefomgeving behouden/verbeteren)



bestaande waarde (kwaliteit en functionaliteit behouden)

Figuur 8: Doelen circulair bouwen (Bron: Platform CB'23)

Materiaalvoorraden

Naarmate de wereldbevolking groeit, de middenklasse groeit en de verstedelijking aanhoudt, neemt de behoefte aan grondstoffen toe. Dit leidt tot uitputting en schaarste, waardoor natuurlijke systemen en leefgebieden onder druk komen te staan. Toenemende schaarste en milieudruk zijn belangrijke aanjagers van de circulaire economie en efficiënt gebruik van grondstoffen (bodem+, z.d.).

In de circulaire economie en efficiënt gebruik van grondstoffen ligt de focus op hergebruik van grondstoffen en deze dusdanig in producten te verwerken dat er aan het einde van de levenscyclus geen afval ontstaat, maar nieuwe bruikbare grondstoffen.

In 2021 had de bouw een aandeel van 50% in de gebruikte grondstoffen. Daarbij was 40% van alle afval afkomstig uit de bouwsector (Bouwend Nederland, 2021). Het effect dat de bouw heeft op de materiaalvoorraden is dus enorm. Deze materiaalstroom is zoals de cijfers aangeven nog lineair en moet echt meer circulair. Door het goed inzichtelijk maken van de materialen en de materiaalstroom kan bij besluitvorming betere circulaire keuzes gemaakt worden. Zo worden de eerder genoemde percentages kleiner en de materiaalvoorraden beschermd.

Milieu

Circulariteit verlaagd de druk op het milieu op verschillende wijzen.

Circulariteit draagt bij aan een lagere CO₂-uitstoot. Er wordt in een circulaire economie namelijk minder fossiele brandstoffen toegepast om nieuwe grondstoffen te winnen en te produceren. Hierdoor komen minder broeikasgassen vrij ten opzichte van het lineaire model. Dit draagt ook weer bij aan het behalen van klimaatdoelstellingen.

Ten tweede vermindert de vervuiling van water en lucht. Bij het maken van nieuwe producten worden in een lineaire economie vaak veel chemicaliën gebruikt, welke water- en luchtvervuiling veroorzaken als ze in het milieu terechtkomen. In een circulaire

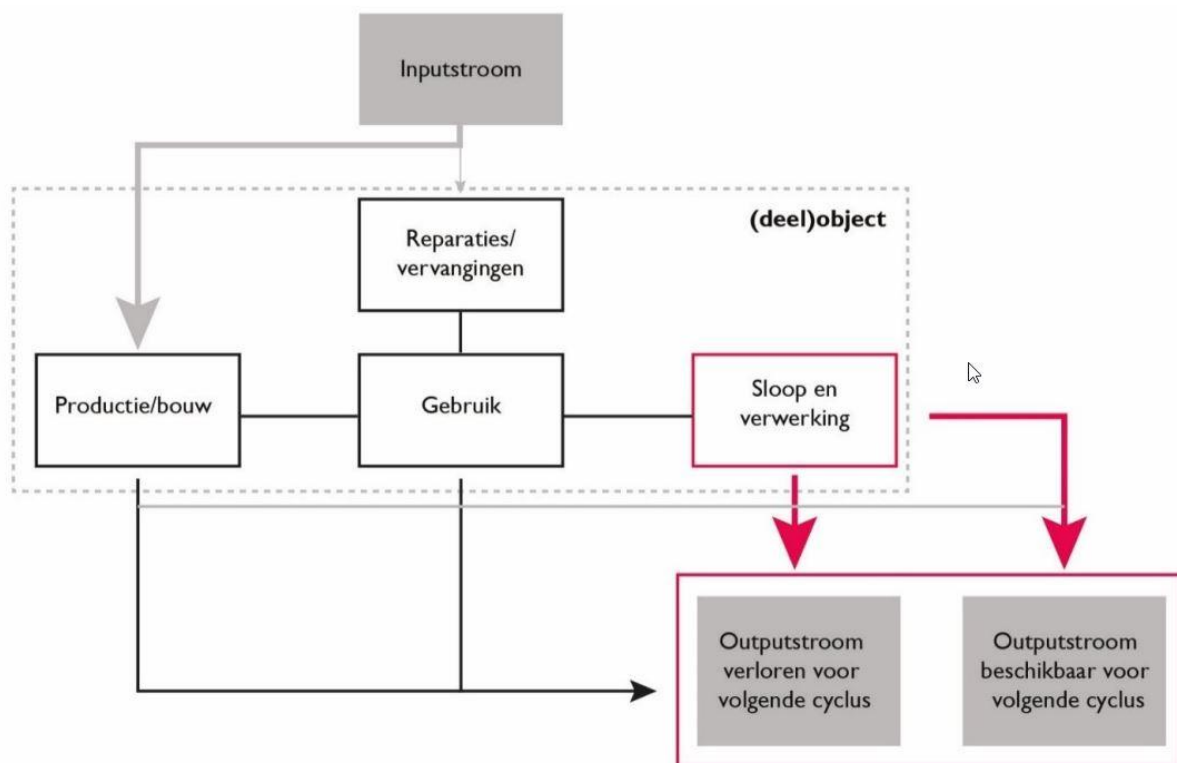
economie worden materialen en producten hergebruikt, gerecycled of gerepareerd, waardoor er minder chemicaliën toegepast worden.

Bij de winning van grondstoffen worden vaak natuurlijke leefomgevingen vernietigd. Dit gaat ten koste van de biodiversiteit. In een circulaire economie worden minder grondstoffen gebruikt, waardoor de leefomgeving van planten en dieren intact kan blijven.

Wel moet meegenomen worden dat het circulaire effect op het milieu afhankelijk is van de juiste toepassing van het circulaire model. Het is mogelijk dat de milieu-impact groter is bij recycling op een niet-duurzame manier, dan bij winning van nieuwe grondstoffen (Bocken, N. M. P., Bakker, C., & Pauw, I. De., 2016).

Bestaande waarde

Bij deze pijler kijkt CB'23 vooral naar de waarde en kwaliteit van het materiaal aan het einde van de levenscyclus. In het schema hieronder is schematisch weergegeven wat de outputstroom van materialen kan zijn.



Figuur 9: Levensloop van materialen (Bron: Platform CB'23, 2022)

In welke stroom een materiaal valt is afhankelijk van de kwaliteit van het materiaal. De kwaliteit is zeer belangrijk, omdat deze bepaalt of het materiaal geschikt is voor bijvoorbeeld hergebruik, recycling of upcycling.

In het rapport 'Circulair Bouwen: Kansen en Randvoorwaarden' (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2018) wordt aangegeven dat de kwaliteit van circulaire bouwmaterialen kan variëren en afhankelijk is van verschillende factoren, zoals de conditie van het materiaal, de samenstelling van het materiaal en de herkomst van het materiaal. Naast rekening houden met deze factoren, is het ook van belang om kwaliteitseisen op te stellen bij bepaling van outputstroom.

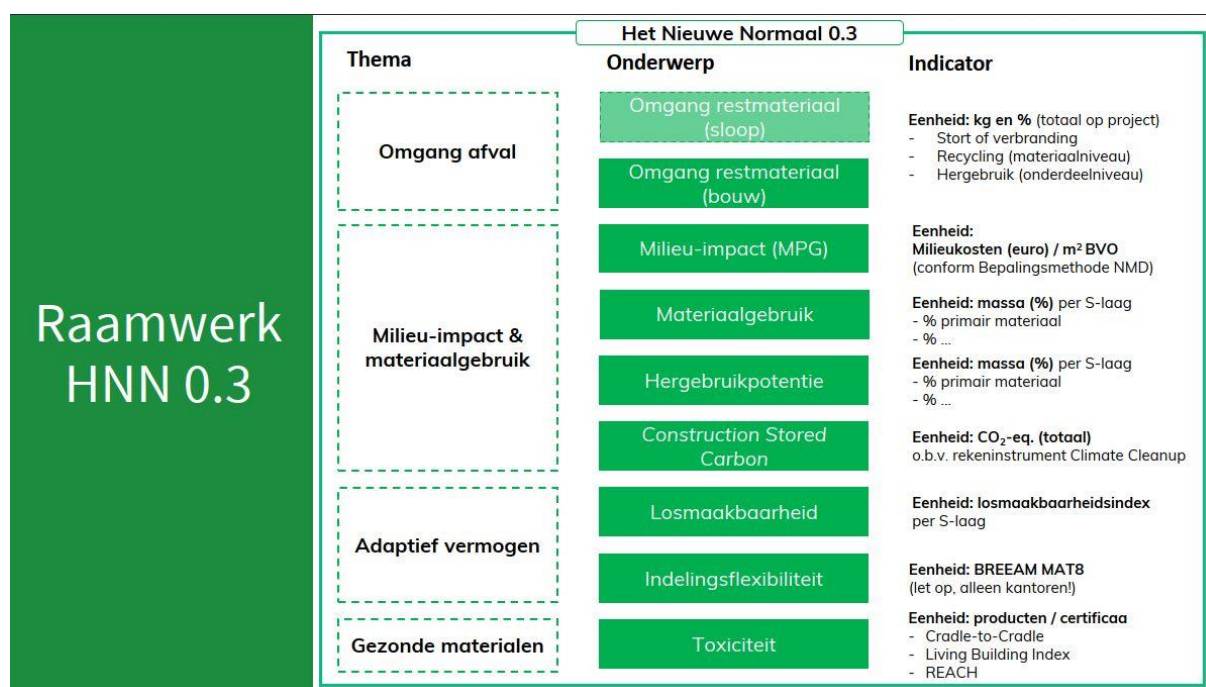
2.2.3 Meetmethodes

Om te meten aan de hand van de drie vastgestelde pijlers, moeten deze specifieker uitgewerkt worden. Daarbij moeten verschillende waardes bepaald worden, waarmee de circulaire effecten inzichtelijk gemaakt kunnen worden. Cirkelstad heeft een convenant opgesteld waarin deze waardes gespecificeerd worden.

Cirkelstad is een collectief van publieke en private ondernemers om uitdagingen op het gebied van circulair bouwen aan te pakken. Cirkelstad heeft initiatief genomen om onder opdracht van Rijksvastgoedbedrijf, Rijkswaterstaat, gemeente Amsterdam, Rotterdam, Den Haag en Utrecht een convenant op te stellen samen met Dura Vermeer, Volker Wessels, van Wijnen, BAM en Synchroon. Bij het opstellen hiervan zijn meerdere experts betrokken. Dit zijn Alba Concepts, Metabolic en Copper. De wetenschappelijke borging viel onder de hoede van de Technische Universiteit Delft.

Dit alles is mede mogelijk gemaakt door het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Accez (Cirkelstad, z.d.).

In het convenant zijn aan de hand van vier thema's verschillende onderwerpen vastgesteld. Het thema 'Gezonde materialen' valt buiten de scope van dit onderzoek.



Figuur 10: Thema's circulariteit (Bron: Cirkelstad, 2023)

Het eerste thema 'Omgang afval' is gekoppeld aan omgang restmateriaal (sloop) en omgang restmateriaal (bouw). Deze twee onderwerpen vormen de materiaalstroom van de bouw. Het gaat hier om het materiaal dat het gebouw in komt en het materiaal wat uiteindelijk het gebouw verlaat voor een volgende cyclus. Beide worden weergegeven in kilo's en percentages.

Het tweede thema is Milieu-impact & Materiaalverbruik. De onderwerpen 'Materiaalgebruik' en 'Hergebruikpotentie' worden samen met het eerste thema geschaard

onder de pijler 'Materiaalvoorraden' uit de vorige paragraaf. Deze wordt gespecificeerd en uitgewerkt in hoofdstuk 2.4.

Het thema 'Adaptief vermogen' valt onder het behouden van kwaliteit en functie. Hier wordt in hoofdstuk 2.3 dieper op ingegaan.

Er zijn twee onderwerpen binnen het tweede thema die gericht zijn op de impact van materialen op het milieu. Het convenant formuleert de indicator van milieu-impact als milieukosten per vierkante meter bruto vloeroppervlak. Conform de bepalingmethode van de Nationale Milieu Database.

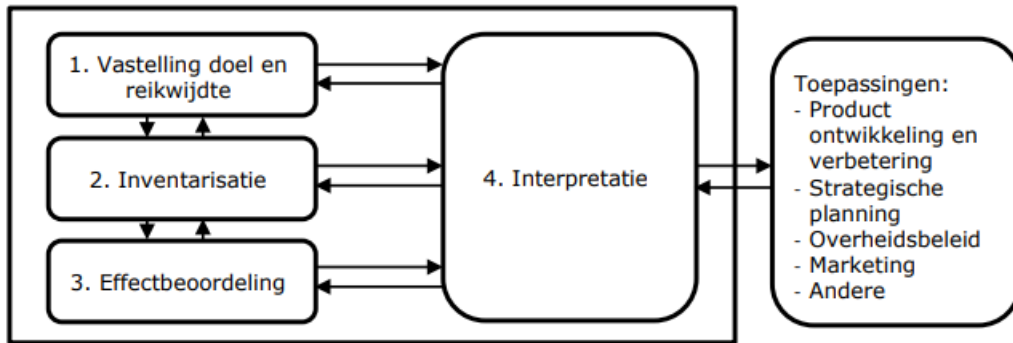
Verder spreekt het van *Construction Stored Carbon* met CO₂ als indicator.

In de huidige situatie is in de levenscyclus van een gebouw het gebouwgebonden energieverbruik goed voor ongeveer 80% van de totale broeikasemissie. Het overige, dus de uitstoot veroorzaakt bij productie van materialen voor de nieuwbouw, verbouw en herstel, beslaat de resterende 20% van de CO₂ uitstoot van een gebouw (energieverbruik door bouwactiviteiten zijn hierbij niet meegenomen). De komende jaren zal de focus steeds meer op duurzaamheid liggen en door de innovaties die hieruit voortvloeien, zal het gebouwgebonden energieverbruik ook afnemen. Als bijvoorbeeld meer zonnepanelen, warmtepompen en isolatie het gevolg hier van is, zal het aandeel van ingebedde CO₂ emissies toenemen. Minder materiaalgebruik en duurzame keuzes kunnen dus gevolgen hebben op de uitstoot van CO₂ emissies in de keten (EIB en Metabolic, 2020). De CO₂-waardes van de referentieprojecten worden berekend aan de hand van een Paris Proof berekening waarin vastgehouden wordt aan de volgende uitgangspunten:

- Het milieueffect 'klimaatverandering' wordt opgeteld voor de levenscycli fasen in module A: Productie- en Bouwfase (zie figuur 13).
- De som van de betreffende fasen wordt gedeeld door het bruto vloeroppervlak (BVO).
- De uitkomst van deze berekening wordt uitgedrukt in CO₂ equivalenten per vierkante meter BVO.

De milieu-impact beschreven volgens het convenant is een MPG-berekening. Deze berekening is een totaalscore welke aangeeft wat de milieubelasting is van de materialen die in een gebouw worden toegepast. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (2021) schrijft: "De MPG van een gebouw is de som van de schaduwkosten van alle toegepaste materialen in een gebouw. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met de materialen die worden vervangen tijdens de levensduur van het gebouw. De totale som wordt gedeeld door de levensduur en door het bruto vloeroppervlak van een gebouw. De MPG wordt vervolgens uitgedrukt in de schaduwkosten per vierkante meter BVO per jaar."

De levensduur van de materialen is een belangrijk aspect in deze berekening. Dit wordt ook wel de levenscyclusanalyse (LCA) genoemd.



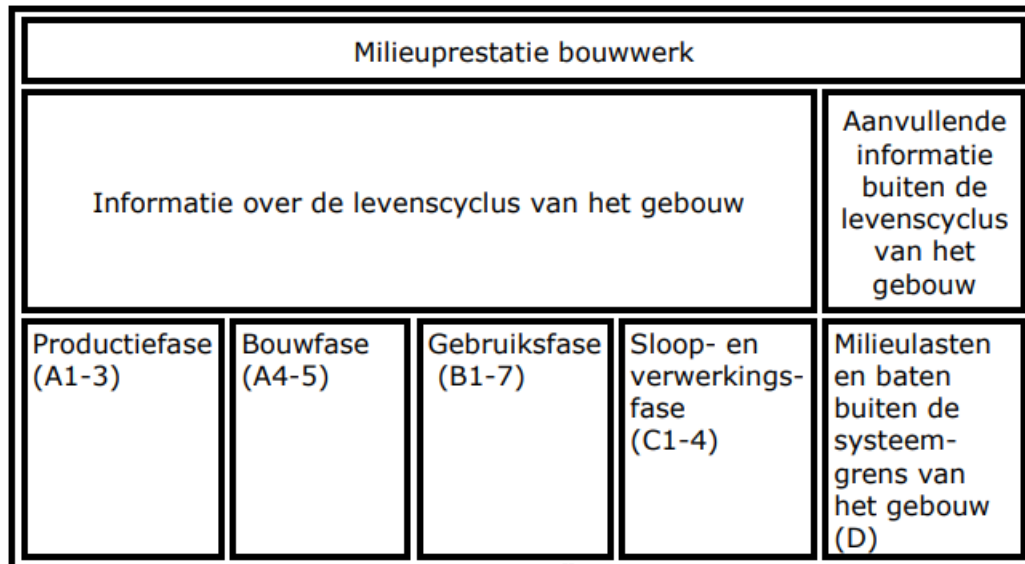
Figuur 11: Levenscyclusanalyse van materialen (Bron: de Valk, E., & Quik, J., 2017)

De levenscyclusanalyse bestaat uit de volgende punten:

- Doel en afbakening bepalen: Het doel en de reikwijdte van de LCA. Dit omvat het definiëren van de functionele eenheid, de systeemgrenzen en de levenscyclusfasen die worden meegenomen in de analyse.
- Inventariseren van gegevens: Gegevens over de materialen, energie en water die worden gebruikt tijdens de levenscyclusfasen van het bouwwerk . Dit omvat ook gegevens over emissies naar de lucht, water, bodem en afval.
- Levenscyclusimpactbeoordeling: Milieu-impact van de geïnventariseerde gegevens. Dit omvat het gebruik van een impactcategorisatiemethode om de impact van de gegevens op verschillende milieuaspecten te bepalen, zoals klimaatverandering, verzuring en toxiciteit.
- Interpretatie van de resultaten: De resultaten van de levenscyclusimpactbeoordeling worden vastgesteld. Dit omvat het identificeren van belangrijke milieuaspecten en het zoeken naar mogelijkheden voor verbetering (Guinée et al., 2002).

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland schrijft (2021): "De LCA resulteert in 11 indicatoren voor de milieubelasting van een product. Deze 11 indicatoren worden samengevoegd tot één waarde: de schaduwkosten per eenheid van het product (kg, m3, m2 o.i.d.)." Voor elk materiaal worden deze stappen doorlopen en de resultaten worden vastgelegd in de Nationale MilieuDatabase.

Deze scores van de materialen worden samengevoegd tot een totale MPG-score.



Figuur 12: Milieuprestatie bouwwerk (Bron: de Valk, E., & Quik, J., 2017)

Hierboven is schematisch weergegeven hoe de MPG-berekening is opgebouwd. Fase A tot en met C zijn omvat met de levenscyclusanalyse van alle materialen gecombineerd. De LCA-scores mogen alleen uit de Nationale MilieuDatabase opgehaald worden (de Valk, E., & Quik, J., 2017).

De MPG-score is dus een afspiegeling van verscheidene indicatoren. Een lagere score staat gelijk aan een kleinere impact op het milieu. Alleen voor nieuwbouw woningen is er een maximum MPG-waarde vastgesteld, welke stapsgewijs wordt aangescherpt richting 2030. Deze grenswaarde ligt nu op 0,8.

Hergebruik materialen

Bij renovatie blijft een deel van het gebouw intact. Dit wordt vanzelfsprekend weer onderdeel van het nieuwe, gerenoveerde gebouw. Bij berekening van de milieuprestatie gebouwen wordt dit gedeelte van het gebouw nog steeds meegenomen en niet gelijk gesteld aan nul. Wel is de milieuprestatie bij hergebruik aanzienlijk verbeterd ten opzichte van toepassing van "nieuwe" materialen.

De NMD (2022) heeft een hergebruiksfactor opgesteld welke altijd toegepast kan worden bij bepaling van de nieuwe MPG-score van een gerenoveerd gebouw.

"Onvoorzien hergebruik wordt toegepast op het niveau van een productkaart waarbij het product in dezelfde functionele toepassing wordt gebruikt. De rekenregel is uitgewerkt in een generieke factor voor hergebruik (H). Deze factor is bepaald (expert judgement) op basis van de volgende uitgangspunten;

- Eenvoudig en transparant;
- Acceptabele benadering van de werkelijke milieulast bij hergebruik (dus geen 0);
- Gemiddeld zullen hergebruikte producten nog niet alle oorspronkelijke milieulast hebben "afgeschreven" maar wel een substantieel deel. Op basis hiervan is het principe free of burden niet toegepast op productniveau in het geval van onvoorzien hergebruik.

- Onvoorzien hergebruik in de toekomst verder zal afnemen door het faciliteren van productkaarten voor hergebruik op basis van voorzien hergebruik.

Bij onvoorzien hergebruik is de hergebruikfactor standaard vastgesteld op 0,2. Dit betekent dat de MKI wordt vermenigvuldigd met 0,2, toegepast op modules (zie figuur 11): A1-A3; C3, C4 en D van het initiële of het meest representatieve product beschikbaar in de NMD.”

Factor hergebruik (H) = 0,2.

Samenvattend kunnen we stellen dat circulaire effecten het resultaat zijn van het toepassen van circulariteit volgens de circulaire economie. Deze effecten dragen bij aan het behalen van de overheidsdoelstellingen voor 2050 en zijn als volgt geformuleerd:

- Minder verbruik grondstoffen
- Minder afval
- Minder uitstoot van broeikasgassen
- Minder afhankelijk van andere landen

Er zijn meerdere meetmethodes voor circulaire effecten en deze komen neer op drie pijlers. Deze pijlers slaan terug op de overheidsdoelstellingen. Vanuit deze pijlers zal in het in dit onderzoek ook verder gewerkt worden.

- Het beschermen van de materiaalvoorraden
- De impact op het milieu verlagen
- Het beschermen van de bestaande waarde

De impact op het milieu is te meten aan de hand van de MPG-berekening. Deze bestaat uit de gecombineerde levenscyclusanalyses van de materialen. Verder ook de opgeslagen CO₂, welke één van de indicatoren is van de milieu-impact.

Als materialen hergebruikt worden, wordt een factor van 0,2 op de MPG-score toegepast.

Het inzichtelijk maken van het gebruik van grondstoffen en de afvalstroom wordt in paragraaf 2.4 uitgewerkt.

Het beschermen van de bestaande waarde wordt in paragraaf 2.3 uitgewerkt.

2.3 Beoordelen van systeemplagen op toekomstwaarde

2.3.1 Toekomstwaarde

Toekomstbestendig en flexibel bouwen wordt geassocieerd met duurzaam bouwen. Een duurzaam gebouw beweegt flexibel met haar gebruikers mee. Er wordt steeds vaker nagedacht over de toekomst van gebouwen. Gebouwen moeten toekomstbestendig zijn. Hiermee wordt bedoeld dat gebouwen waardevast en flexibel moeten zijn. De definitie van toekomstwaarde luidt: "Toekomstwaarde is het zorgen dat een gebouw in gebruik is en blijft." (Brink Management en Advies, 2019).



Figuur 13: Toekomstwaarde van gebouwen (Bron: Toekomstwaarde - Toekomstwaardegebouw, 2023)

2.3.2 Bepalende factoren van toekomstwaardegebouw

Een toekomstwaarde van een gebouw wordt bepaald door vier factoren:

- Adaptiviteit of adaptief vermogen
- Waardevastheid
- Energieverbruik
- Materiaalverbruik

(Hermans, MMN., Geraedts, RP., Remoy, HT., & van Rijn, E. 2013) & (Toekomstwaarde - Toekomstwaardegebouw, 13 januari 2023).

Een goede balans tussen de vier factoren resulteert een gebouw met een hoge toekomstwaarde.

Adaptief vermogen is het eerste criterium dat onderdeel is voor het bepalen van de toekomstwaarde van een gebouw.

De definitie van adaptiviteit luidt:

“Het Adaptief vermogen van een gebouw omvat alle eigenschappen die het mogelijk maken dat het gebouw op een duurzame en economisch rendabele wijze zijn functionaliteit behoudt gedurende zijn technische levensduur, bij veranderende behoeften en omstandigheden.” (Hermans, MMN., Geraedts, RP., Remoy, HT., & van Rijn, E., 2014).

Een gebouw moet dus flexibel en aanpasbaar zijn. Gebouwen zijn flexibel en aanpasbaar wanneer er elementen gebruikt worden, zoals modulaire constructies, open plattegronden, demonteerbare wanden en multifunctionele ruimtes. Het gebouw kan zich hierdoor aanpassen aan gebruikers, de veranderende omstandigheden en wordt de ruimte optimaal gebruikt. Dit draagt bij aan een efficiënter en duurzamer gebruik van het gebouw.

Hoe de adaptiviteit van een systeemlaag beoordeeld wordt, wordt verder in dit hoofdstuk beschreven.

Het tweede criterium dat bepalend is voor de toekomstwaarde is waardevastheid.

Bij waardevastheid wordt gekeken naar de totale levenscycluskosten. Een voorbeeld hiervan is het doen van aanpassingen aan een gebouw waardoor de levensduur hiervan verlengt wordt. De elementen waaruit een gebouw bestaat worden hierdoor meer waard. Factoren die hierin meespelen zijn losmaakbaarheid en restwaardes van de elementen die gebruikt worden. Het begrip restwaarde kan duidelijk gemaakt worden aan de hand van een simpel voorbeeld. Bijvoorbeeld een stalen balk die je in het gebouw stopt kan er uiteindelijk ook weer worden uitgehaald bij het slopen of aanpassen van een gebouw. De balk is na het er uit halen weer herbruikbaar of aanpasbaar en heeft een hierdoor een bepaalde waarde, wat de restwaarde genoemd wordt. De waardevastheid bestaat dus uit verschillende factoren en kan door methoden die hierboven beschreven staan, meetbaar en bepaald worden.

Energieverbruik is ook een criterium dat bepalend is voor de toekomstwaarde.

Met het energieverbruik wordt bedoeld alle energie die voor de bouw, het gebruik en de sloop van gebouwen en gebouwdelen gebruikt en verbruikt wordt. Een lager energieverbruik resulteert hier in een beperking van CO₂-uitstoot. MPG is een belangrijk begrip als het gaat om het energieverbruik van gebouwen. “MPG geeft aan wat de milieubelasting is van de materialen die in een gebouw worden toegepast” (MilieuPrestatie Gebouwen - MPG, z.d.).

Het laatste criterium waardoor de toekomstwaarde bepaald kan worden is materiaalgebruik.

Met materiaalgebruik wordt bedoeld al het materiaal dat ingezet wordt voor de bouw, het gebruik en de sloop van de gebouwen en gebouwdelen. Factoren die bij materiaalgebruik meewegen zijn:

- Circulariteit
- Losmaakbaarheid
- Hergebruik
- Gezonde materialen

(Toekomstwaarde - Toekomstwaardegebouw, 2023).

De toekomstwaarde van gebouwen wordt dus beoordeeld op de beschreven vier criteria. Binnen dit onderzoek wordt onderzocht hoe een systeemlaag beoordeeld kan worden op toekomstwaarde. Om dit te kunnen doen moet er eerst duidelijk gemaakt worden wat er met een systeemlaag bedoeld wordt.

Onder systeemlagen wordt verstaan de lagen waaruit een gebouw bestaat (Copper8, 2020). Denk hierbij aan het 6 lagen model van Stewart Brand. Zoals meubilair, vaste inrichting, installaties, de schil (dak en gevels), constructie en locatie (grond). Binnen dit onderzoek wordt er een methode gecreëerd om een systeemlaag te beoordelen.

2.3.3 Systeemlagen beoordelen op toekomstwaarde

Een gebouw bestaat uit zes lagen met alle lagen een andere functie. Bij gebouwen wordt er gekeken naar vier criteria voor het bepalen van een toekomstwaarde. Wanneer er gekeken wordt naar een systeemlaag wordt er onderzocht of dezelfde vier criteria bepalend zijn voor de toekomstwaarde van de systeemlagen.

De factoren die van belang zijn om een systeemlaag te kunnen beoordelen op toekomstwaarde zijn:

- Adaptiviteit
- Duurzaamheid (materiaalgebruik)

Deze twee factoren zijn bepalend voor de toekomstwaarde, omdat het iets zegt over de prestaties en levensduur van de systeemlagen.

De factoren waardevastheid en energie zijn factoren die niet meewegen voor het bepalen van toekomstwaarde van systeemlagen. Dit omdat waardevastheid en energie hier niet meer dezelfde rol spelen. Waardevastheid en energie valt hier onder het criteria Duurzaamheid. Materialen die gebruikt worden moeten circulair zijn. Dit houdt in dat de materialen die gebruikt worden weinig energie kosten om te produceren en dat de materialen weer terug gebracht moeten kunnen worden in de kringlopen van de circulaire economie.

Om de toekomstwaarde van een systeemlaag te beoordelen moet er als eerst de adaptiviteit van de laag beoordeeld worden. Adaptiviteit wordt beoordeeld door de flexibiliteit. Het begrip flexibiliteit kan worden onderverdeeld in vier typen:

- Indelingsflexibiliteit: "Is de mogelijkheid om de ruimtelijke indeling binnen het gebouw te wijzigen" (Geraedts, 2013).
- Uitbreidingsflexibiliteit: Is de mogelijkheid om een gebouw of een gebruikersunit uit te breiden (horizontaal en/of verticaal). Dat kan in zowel horizontale als verticale richting plaatsvinden op een of meer van de drie beschouwingsniveaus: locatie, gebouw of gebruikseenheid (Hermans, MMN., Geraedts, RP., Remoy, HT., & van Rijn, E. 2013).
- Afstootflexibiliteit: Is de mogelijkheid om delen van een gebouw of van een gebruikersunit af te stoten (horizontaal en/of verticaal) naar aanleiding van

veranderde (gekrompen) functionele eisen en wensen (Hermans, MMN., Geraedts, RP., Remoy, HT., & van Rijn, E. 2013).

- Losmaakbaarheid: "Is de mate waarin objecten demonteerbaar zijn op alle schaalniveaus binnen werken en gebouwen, zodat het object de functie kan behouden en hoogwaardig hergebruik realiseerbaar is" (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2019).

De adaptiviteit wordt dus bepaald door vast te stellen hoe flexibel een systeemlaag is. Een gebouw met flexibele systeemlagen heeft een hoge adaptiviteit.

Duurzaamheid (materiaalgebruik) is het tweede begrip dat onderdeel is van de beoordeling van systeemlagen. De lagen worden beoordeeld door dezelfde vier factoren als bij het bepalen van toekomstwaarde van gebouwen. Alle vier de factoren zijn factoren die ook belangrijk zijn binnen een circulaire economie. De duurzaamheid wordt uiteindelijk bepaald door een goede verdeling tussen de vier factoren wat resulteert in een duurzame systeemlaag.

Om een systeemlaag met een hoge toekomstwaarde te creëren, moet de systeemlaag een goede verdeling hebben op de twee bovengenoemde factoren.

Samenvattend kan worden gesteld dat onder een systeemlaag wordt verstaan de lagen waaruit een gebouw bestaat zoals meubilair, vaste inrichting, installaties, de schil (dak en gevels), constructie en locatie (grond). Een gebouw wordt beoordeeld op vier factoren zoals beschreven. Een systeemlaag kan beoordeeld worden door twee hoofdcriteria: adaptiviteit en duurzaamheid. Een goede verdeling in de twee hoofdcriteria zorgt voor een hoge toekomstwaarde van systeemlagen.

2.4 Het inzichtelijk maken van materialen en de herkomst hiervan

Circulariteit gaat voornamelijk over de manier waarop we omgaan met materialen. Het is van belang om de kringlopen te sluiten en materialen her te gebruiken. Voor optimale resultaten en besluitvorming is het essentieel om goed zicht te hebben op het gebruik van materialen.

In dit hoofdstuk wordt beschreven wat materiaalstromen zijn en hoe materiaalstromen inzichtelijk gemaakt kunnen worden. Materialen worden in categorieën ingedeeld om een materiaalstroomanalyse mogelijk te maken.

De circulaire economie draait op grondstoffen en de realisatie hiervan vraagt om inzicht in regionale goederen- en grondstoffenstromen en de impact van het gebruik daarvan op het milieu. Dit vormt de basis en geeft overzicht. Zo worden aanknopingspunten gevonden en kan via bestaande ketens de materiaalkringloop gesloten worden. Hierdoor ontstaat ook zicht op kansen om de waarde van materiaalstromen te vergroten door middel van nieuwe verdienmodellen en duurzame cases. Echter, het is nog een hele opgave om een materiaalstroom gedreven circulaire economie te realiseren. Het idee moet breed gedragen zijn en vereist samenwerking van verschillende branches. Alleen op die manier kan de bestaande waarde van materialen in de kringloop behouden blijven.

Door het sluiten van de materiaalstromen zal afval uitgesloten zijn en draait alles om hergebruik. Een circulaire economie is dan gerealiseerd en een gesloten systeem. De waarde van de grondstoffen blijft gewaarborgd en deze grondstoffen worden op een dussdanige manier gebruikt, dat ze gemakkelijk opnieuw toegepast kunnen worden. Met het sluiten van de materiaalstromen worden weinig tot geen uitputbare grondstoffen gebruikt, waardoor de druk op de natuurlijke bronnen en de biodiversiteit verminderd. In de huidige situatie wordt de helft van uitstoot van broeikasgassen, veroorzaking van waterstress en zelfs 90% van vermindering van biodiversiteit veroorzaakt door uitputting van deze natuurlijke bronnen (Circulair West, z.d.).

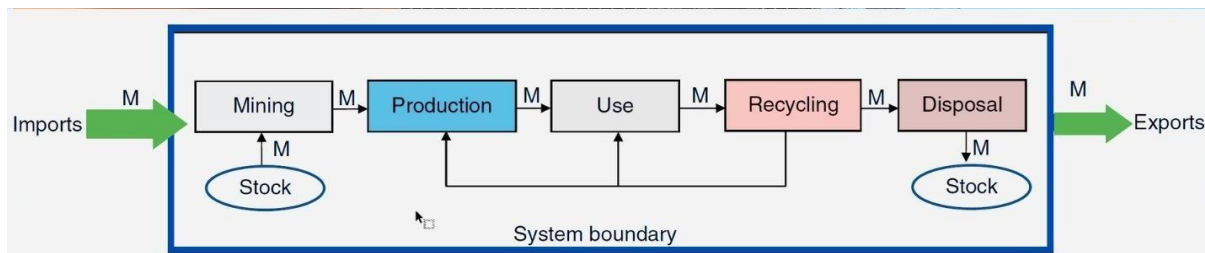
Zoals beschreven in hoofdstuk 2.2 is het minder toepassen van grondstoffen één van de circulaire effecten. Zoals het planbureau voor de Leefomgeving (2019) schreef, zorgt reductie van grondstofverbruik voor minder milieudruk en verbetering van leveringszekerheid van kritieke materialen. Bescherming van de materiaalvoorraden is ook een van de circulaire pijlers van CB'23, een initiatief van Rijkswaterstaat, het Rijksvastgoedbedrijf, de Bouwcampus en NEN. Het PBL beveelt een manier van meten aan die kijkt naar de input, het gebruik en de output van grondstoffen. Een materiaalstroomanalyse is hier uitermate geschikt voor.

2.4.1 Materiaalstroomanalyse

Een materiaalstroomanalyse is het systematisch in kaart brengen van flows (bewegingen) van materialen in een proces. Dit kan voor allerlei processen zijn. Materialen zijn in dit geval grondstoffen, bouwstoffen of producten. Een materiaalstroomanalyse ofwel MFA genoemd, is een massabalans. De basis van MFA is dus massabehoud. Dit betekent dat

de totale massa welke in de balans gestopt wordt, aan de andere kant gelijk is. Er is een evenwicht en er kan dus geen verlies zijn. MFA kan de levenscyclus van een materiaal omvatten. Dus van winning en gebruik tot end-of-life scenario. Een materiaalstroomanalyse brengt een proces in kaart, waardoor het uitermate geschikt is voor bestudering ten behoeve van procesoptimalisatie. Dit is ook het doel van MFA. Materiaalstromen en voorraden kunnen onderzocht worden om te optimaliseren, kosten te verlagen en efficiëntie te verhogen.

Figuur 15 is een relatief simpel voorbeeld van een materiaalstroomanalyse. De hele levenscyclus van het materiaal is te vinden, van oorsprong tot end-of-life scenario. Zoals te zien gaan de materialen die de stroom inkomen, er ook weer uit in dezelfde massa. In het midden van het figuur staat het gebruik. Dit staat altijd centraal.



Figuur 14: Materiaalstroomanalyse (Bron: Deiso, z.d.)

2.4.2 Relevantie van een materiaalstroom

Een belangrijk punt van de circulaire economie is het reduceren van uitstoot van broeikasgassen en impact op het milieu. Dit wordt voornamelijk uitgedrukt in een MPG-score. Echter, de massa en de milieu impact van een materiaal zijn niet evenredig en lopen uiteen. Zware materialen hebben niet altijd de hoogste impact in MKI. Zo vertegenwoordigen massieve materialen in de fundering en de ruwbouw zeker 80% van de totale massa van een gebouw. Echter, deze massieve materialen beslaan daarentegen slechts 45% van de MKI. Het is daarom van belang om naast een MPG berekening, ook een materiaalstroomanalyse te genereren van een gebouw om een zo volledig mogelijk beeld te krijgen van de circulaire effecten. Een grote massa wil dus niet gelijk staan aan een hoge milieu-impact en vice versa (EIB en Metabolic, 2020).

Verder is het inzicht in het gebruik van materiaal enorm belangrijk om de circulaire doelen te bewerkstelligen. Eén van de circulaire doelen van de overheid is bijvoorbeeld het limiteren van gebruik van abiotische grondstoffen. Een materiaalstroom geeft weer waar de oorsprong van een materiaal weer. Door de materiaalstroom kunnen dan betere keuzes gemaakt worden met betrekking tot het beperken van gebruik van abiotische grondstoffen.

Aan de andere kant van het spectrum staat het end-of-life scenario. Hierin is dus af te lezen in welke keten het materiaal terecht zal komen. Dit deel is ook zeer belangrijk. Vanuit deze kant van het spectrum kunnen overwegingen gemaakt worden met betrekking tot circulariteit en het efficiënt toepassen van materialen.

De overheid gebruikt ook materiaalstroomanalyses voor het inzichtelijk maken van de materiaalstromen. Dit heeft vooral betrekking op de concurrentiepositie en duurzaamheidsdoelstellingen. Een materiaalstroomanalyse kan van enorme waarde zijn.

In 2011 is er een grondstoffennotitie opgesteld om het nationale beleid te veranderen met betrekking tot deze doelstellingen en concurrentiepositie. In deze notitie is het uitgangspunt controle van voorraad voor biotische en a-biotische grondstoffen. Duurzaamheid op de lange termijn is wel een voorwaarde. Een aantal punten waren hier relevant:

- De aanvoer van grondstoffen zeker krijgen door te innoveren op het gebied van recycling
- Door grondstoffen efficiënt toe te passen, de vraag naar grondstoffen te beperken
- Duurzamere grondstoffen gebruiken, waardoor minder grondstoffen nodig zijn

Een overzicht geeft ook kansen op het gebied van innovatie, hergebruik en substitutie van materialen. Voor een handelsland als Nederland biedt dit ook economische kansen. Een materiaalstroomanalyse was de perfecte tool om tot dit overzicht te komen (Centraal Bureau voor de Statistiek, 2013).

Aan het begin van de materiaalstroom staan de materialen ingedeeld op de manier van winning. De basis van de materialen vallen onder de volgende drie groepen:

- Primaire grondstoffen

Dit zijn grondstoffen die direct uit de natuur gewonnen worden en nog niet bewerkt of verwerkt zijn. Deze grondstoffen vormen de basis voor de productie van vele materialen, zo ook dus bouwmaterialen. Voorbeelden van de belangrijke grondstoffen zijn olie, kolen, ijzererts, hout en koper. De winning van deze grondstoffen kan een negatieve invloed hebben op het milieu. Bij de winning kan door afgifte van schadelijke stoffen bijvoorbeeld lucht, bodem en water vervuilen. Ook kan het ecosysteem verstoord worden en levensgebieden van dieren en insecten verdwijnen. Daarom is het belangrijk om grondstoffen op een verantwoorde manier te winnen, om de impact op de omgeving zo klein mogelijk te maken. Daarbij is het ook van groot belang om goed en efficiënt met deze grondstoffen om te gaan, zodat ze uiteindelijk in een bepaalde vorm hergebruikt kunnen worden.

- Secundaire grondstoffen

Secundaire grondstoffen zijn grondstoffen die worden gewonnen door recycling of hergebruik van gebruikte materialen. Deze gebruikte materialen kunnen belangrijke bronnen van grondstoffen voor nieuwe producten vormen, die kunnen helpen om de afvalberg te verminderen.

Het gebruik van secundaire grondstoffen heeft veel voordelen. Het bespaart grondstoffen, vermindert verspilling van afval en vermindert de uitstoot van koolstofdioxide. Bovendien kan het gebruik van grondstoffen helpen de afhankelijkheid van grondstoffen te verminderen en voorraadzekerheid te vergroten, waardoor een duurzamere economie wordt geholpen.

Er zijn echter ook uitdagingen bij het gebruik van secundaire grondstoffen. Niet alle materialen zijn even gemakkelijk te recyclen en het recyclen van materialen kan kostbaar zijn. Bovendien is het vaak lastig om de kwaliteit van secundaire grondstoffen te

waarborgen en ervoor te zorgen dat ze voldoen aan de eisen van de productie van nieuwe producten.

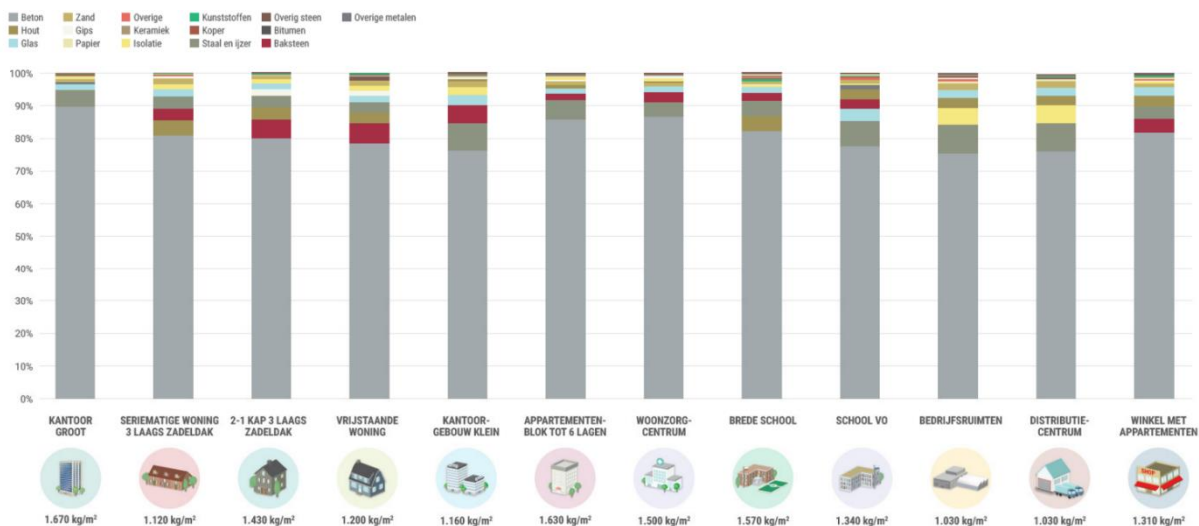
- Hernieuwbare grondstoffen

Hernieuwbare grondstoffen zijn grondstoffen die (bijna) onuitputtelijk zijn, omdat ze weer terug kunnen groeien. Deze grondstoffen kunnen binnen korte tijd terug groeien. Dit maakt ze dus bijna onuitputtelijk. Het is voornamelijk biomassa van een levende bron en kan doorlopend hernieuwd worden. Denk hierbij aan producten als hout of hennep. Hout is een heel belangrijke hernieuwbare grondstof. Het is namelijk een van de meest gebruikte

bouwmaterialen en kan als hernieuwbare grondstof dus een grote rol spelen in circulariteit (Eurabo, z.d.).

2.4.3 Materialen indelen

In dit onderzoek houden we vast aan 12 materialen die veel worden toegepast in de utiliteitsbouw. Deze materialen kunnen invloed hebben op de milieu-impact van een gebouw en zijn daarom van belang. In de figuur hieronder is in een overzicht weergegeven hoe de materiaalverdeling in de bouw zich weergeeft. Dit zijn massaverhoudingen.



Figuur 15: Massaverhoudingen in de bouw (Bron: Metabolic, z.d.)

- Aluminium

Aluminium wordt steeds vaker toegepast. Bijvoorbeeld voor kozijnen. Het is een licht, maar sterk materiaal en heeft een lange levensduur.

- Baksteen

Bakstenen dienen al lange tijd als betrouwbaar materiaal in de bouw. Alhoewel de productie veel energie kost en hierbij veel CO₂ vrijkomt, weegt de lange levensduur hier tegenop (Jelyta, 2021).

- Beton

Beton is een veelvuldig toegepast materiaal in de bouw. Denk aan funderingen, vloeren en wanden. Aangevoerd is, dat beton van alle materialen de grootste milieu-impact heeft. Beton is verantwoordelijk voor wel 40 tot 60% van de milieu-impact van bouwmaterialen. De klimaatimpact van beton wordt voor 95% veroorzaakt door cement. (CE Delft, 2013).

- Bitumen

Bitumen wordt nog vaak gezien als milieuonvriendelijk en soms ook wel teer genoemd. Toch is bitumen niet hetzelfde als teer. Teer wordt namelijk verkregen uit hout- of steenkool en bitumen is een mengsel van verschillende koolwaterstoffen. Bitumen kan dus in de natuur gevormd worden. Verder kan bitumen jarenlang mee en is goed recyclebaar (Schampers, 2019).

- Gips

Gips scoort goed op beschikbaarheid, flexibiliteit, veiligheid en impact op het milieu. Het wordt veel toegepast bij niet-dragende wanden en kan gemakkelijk afgewerkt worden (Partner, 2022).

- Glas

Glas wordt in elk gebouw toegepast en kan grote vlakken van een gevel beslaan. Glas heeft een grote invloed op het gevelaanzicht en is niet weg te denken uit de bouw.

- Hout

In de bouw wordt hout veelvuldig gebruikt. Het is een natuurlijk materiaal en CO₂ neutraal. Dit zorgt ervoor dat hout een geringe milieu-impact heeft en daarom ook als duurzaam wordt gezien. Er moet dan wel de juiste houtsoort voor de toepassing gebruikt worden en het hout moet goed bewerkt en onderhouden zijn.

- Isolatie

In alle gebouwen wordt isolatie toegepast. Isolatie is dan ook altijd vertegenwoordigd in de materiaalstromen. Er zijn verschillende soorten isolatie en niet elke soort is even duurzaam. Dit heeft te maken met het productieproces, maar zeker ook met het end-of-life scenario. Isolatie kan ook duurzaam zijn als er wordt gekeken naar besparing op energie met betrekking op temperatuurregulatie binnen een gebouw.

- Kalkzandsteen

Kalkzandsteen is een van de belangrijkste materialen in de bouw. Het overgrote deel van de woningen wordt gebouwd met kalkzandsteen en daarbij neemt het qua volume ook een groot deel van de totale materialen voor zijn rekening. Kalkzandsteen heeft een lage milieu-impact. Dit komt door het productieproces waarbij de CO₂ uitstoot en de energievraag beperkt zijn. Kalkzandsteen is ook 100% recyclebaar (NMD, z.d.).

- Kunststoffen

Kunststoffen kunnen op meerdere manieren toegepast worden en zijn ook goed vertegenwoordigd in een woning. Denk aan kozijnen, leidingen en installaties.

- Staal

Staal heeft een groot aandeel in de bouwwereld. Er wordt in vele bouwwerken staal toegepast, omdat het veel voordelen heeft. Echter, staal is een vervuiler en zorgt voor enorm veel CO₂ uitstoot. Het voordeel van staal is dat het met geringe onderhoud toch een lange levensduur heeft (Kuijpers, 2020).

- Steen

Denk hierbij aan vooral aan natuursteen. Dit is vanzelfsprekend een natuurproduct en heeft een enorm lange levensduur. Verder kan natuursteen vanzelfsprekend hergebruikt worden.

Aan de hand van gegevens van Metabolic en de NMD kan een tabel opgesteld worden om de materialen in te delen in de materiaalstroomanalyse. De bronnen bij deze getallen zijn in de uitgebreide tabel te vinden in de bijlage.

Verwijst naar 'materialenkolom' in volgende tabbladen	content/uploads/2022/04/EIB-Metabolic Branche			database.nl/wp-content/uploads/2022/05/Forfaitaire waarden					
	gemiddelden 2021			Forfaitaire waarden NMD (mei 2022)					
Materiaal	Primair	Secundair	Hernieuw	laten zitten	Stort	AVI	Recycle	Herfabrica	Hergebru
Aluminium	93%	7%	0%	0%	3%	3%	94%	0%	0%
Beton	97%	3%	0%	0%	1%	0%	99%	0%	0%
Bitumen	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
Isolatie	86%	7%	7%	0%	0%	35%	65%	0%	0%
Gips	94%	6%	0%	0%	95%	0%	5%	0%	0%
Glas	87%	13%	0%	0%	30%	0%	70%	0%	0%
Hout	0%	4%	96%	0%	5%	95%	0%	0%	0%
Kalkzandsteen	80%	20%	0%	0%	1%	0%	99%	0%	0%
Kunststoffen	86%	7%	7%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Metalen (overig)	50%	50%	0%	0%	5%	5%	90%	0%	0%
Staal (profielen, platen, leidingen)	28%	72%	0%	0%	1%	0%	87%	0%	12%
Natuursteen	100%	0%	0%	0%	1%	0%	99%	0%	0%

Figuur 16: Levensloop van materialen (Bron: Heijmans, 2023)

Samenvattend kan gesteld worden dat de herkomst van materialen inzichtelijk gemaakt kan worden door middel van een materiaalstroomanalyse ofwel MFA. Een materiaalstroomanalyse laat zien welke en hoeveel materiaal is gebruikt, wat de oorsprong van het materiaal is en wat het end-of-life scenario is. Het is dan gelijk duidelijk waar een materiaal zich bevindt in de circulaire kringloop.

Primaire grondstoffen zijn grondstoffen die direct uit de natuur gewonnen worden. Secundaire grondstoffen zijn grondstoffen die uit een eerdere kringloop verkregen zijn. Hernieuwbare grondstoffen zijn grondstoffen die onuitputtelijk zijn, groeien binnen korte tijd weer aan en kunnen weer opnieuw gewonnen worden.

Het is belangrijk om inzicht te hebben in de materiaalstromen. Bij goed inzicht kunnen betere circulaire keuzes gemaakt worden.

De materialen waarmee gewerkt wordt in dit onderzoek zijn:

- Aluminium
- Glas
- Kalkzandsteen
- Steen
- Baksteen
- Gips
- Kunststoffen
- Beton
- Hout
- Overige materialen
- Bitumen
- Isolatie
- Staal

2.5 De circulaire effecten inzichtelijk maken

Binnen dit hoofdstuk wordt onderzocht welke methodes Heijmans gebruikt voor het inzichtelijk maken van de circulaire effecten.

Uit gesprekken met Thijs Huijsmans (adviseur senior circulair bouwen) en Daniël Huisman (BIM-coördinator) kwamen een aantal methodes naar voren die Heijmans gebruikt. Heijmans gebruikt methodes met BIM-modellen.

Eerst wordt er beschreven wat BIM is en verder in het hoofdstuk wordt er beschreven welke methodologieën er worden gebruikt.

2.5.1 BIM

Om snel zo veel mogelijk gegevens van de casusprojecten beschikbaar te hebben, is het werken met BIM-modellen een voor de hand liggende optie.

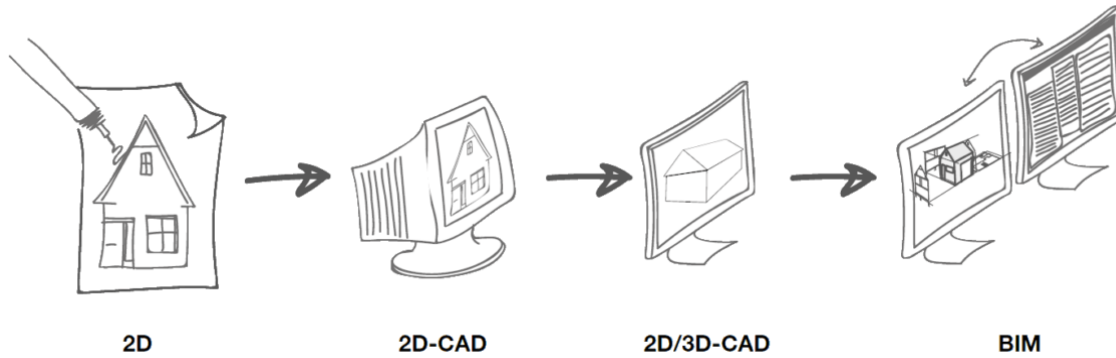
BIM kan gedefinieerd worden in drie definities:

- Bouwwerk Informatie Model
- Bouwwerk Informatie Modeling
- Bouwwerk Informatie Management

BIM staat voor Building Information Modelling of Building Information Model. Dit is een digitale manier van werken, waar gebouwen gemodelleerd zijn. Alle eigenschappen en informatie van dit gebouw zijn beschikbaar en aan elkaar gekoppeld. Doordat deze informatie en gegevens zo gemakkelijk uit te wisselen en te beheren zijn, wordt BIM ook wel gezien als Building Information Management.

Naast de twee genoemde betekenissen wordt de afkorting BIM alsmaar vaker gebruikt in de zin van Building Information Management, met andere woorden het beheren en uitwisselen van deze informatie.

Er is geen eenduidige definitie van BIM. Het kan gebruikt worden op verschillende manieren, afhankelijk van de mogelijkheden en voordelen. BIM kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor alleen het modelleren van gebouwen en het afleiden van tekeningen en hoeveelheden uit deze 3D-modellen. Het kan toegepast worden om fouten van tevoren te kunnen identificeren en later op de computer op te lossen, in plaats van op de bouwplaats. BIM wordt soms ook alleen als software voor het maken van modellen gezien. Geen van deze opvattingen is echt verkeerd, maar elk belicht slechts één aspect van BIM. (Lemoine, z.d.).



Figuur 17: Evolutie van bouwproces naar BIM (Bron: BIMportal, z.d.)

Als een gebouw volgens het concept van BIM gemodelleerd is, zijn er enorm veel gegevens en informatie beschikbaar over het gebouw in zijn geheel, maar ook over de materialen in het gebouw.

Het werken met BIM-modellen is dus de ideale manier om snel veel gegevens beschikbaar te krijgen.

2.5.2 Methodologie

In hoofdstuk 2.2 zijn de circulaire effecten vastgesteld op welke de circulariteit beoordeeld wordt.

Deze effecten zijn:

- Milieu Impact (MPG en CO₂)
- Beschermen van materiaalvoorraden
- Behouden van bestaande waarde

Alhoewel het behouden van de bestaande waarde buiten de scope van de tool valt, zijn er voor de andere circulaire effecten enkele methodes om deze effecten inzichtelijk te krijgen.

De tool wordt ontwikkeld als hulpmiddel bij besluitvorming voor eventuele circulaire renovatie van een gebouw. Dit betekent dat de tool ook bruikbaar moet zijn als het betreffende pand wat ouder is en dit gebouw niet volledig uitgewerkt is in moderne 3D-modellen. Aan de hand van in te vullen parameters moet een overzicht verschijnen met weergave van de circulaire effecten.

Zoals beschreven in hoofdstuk 2.1 heeft een gebouw verschillende systeemplagen. Deze systeemplagen worden toegepast volgens het model van Steward Brand (zie Figuur 4).

Per systeemplaat (of type renovatie) zal een analyse gedaan moeten worden om kengetallen of gemiddeldes te verkrijgen. Deze kengetallen kunnen vervolgens onder de tool gelegd worden, waardoor aan de hand van de in te vullen parameters de circulaire effecten inzichtelijk worden.

De in te vullen parameters moeten genoeg informatie bevatten, zodat de circulaire effecten vastgesteld kunnen worden.

Zo zijn de volgende parameters vastgesteld:

- Locatie
- Bouwjaar
- Gebruiksfuncties
- Lengte
- Breedte
- Omtrek gevel
- Hoogte
- Totale bruto vloeroppervlakte
- Aantal lagen
- Bouwmethode
- Type fundering
- Constructie (Staal / beton)
- Schil (materialisatie)
- Lichte/zware gevel
- Gevel (open of dichte configuratie)
- Spaceplan

Deze parameters zijn voorgelegd aan Heijmans.

Aan de hand van deze parameters is genoeg informatie beschikbaar voor de tool. Zo is door de lengte, breedte, omtrek en hoogte van het gebouw, het totale geveloppervlak te bepalen. Ook is het type gevel aangegeven. Met de kengetallen uit de analyse van beschikbare casusprojecten kan nu een inschatting gemaakt worden van bijvoorbeeld de milieu-impact van deze gevel.

Heijmans heeft meerdere projecten die relatief recent opgeleverd zijn, beschikbaar gesteld voor de analyse. Al deze projecten zijn onderwijsgebouwen en BIM-gemodelleerd.

Het betreft de volgende projecten:

- Duboisdomein*
- UNS50
- Science Campus*
- TU Delft Physics
- TU/e Gemini*
- Hanze Hogeschool*
- Radboud

*De gebouwen met een * zijn geanalyseerd binnen dit onderzoek.*

2.5.3 Software

De analyse zal gedaan worden door middel van verscheidene softwareprogramma's. Deze programma's zijn na instructies en oefenen uiteindelijk onder de knie gekregen en hebben de basis gevormd voor de analyse.

Dit zijn:

- Bimpact
- Solibri
- Power BI

Voor het bepalen van de impact op het milieu zijn de indicatoren CO2 en MPG-berekening vastgesteld. Bimpact is het ideale programma om deze indicatoren uit een gebouw te halen. Binnen Heijmans zijn er genoeg experts die ervaring hebben met deze software.

Bimpact fungeert aan de hand van Revit en IFC-bestanden. Voor de duidelijkheid is hieronder een korte toelichting gegeven.

Wat is een IFC-bestand?

Een IFC "Is een bestandsformaat voor bouwwerk informatie modellen (BIM-informatie). In een IFC-bestand wordt een driedimensionaal geometrisch model van een bouwwerk vastgelegd, inclusief de gegevens van de daarin gebruikte elementen." (*Forum Standaardisatie*, z.d.). Een IFC is een standaard bestandextensie die in veel software gebruikt kan worden. Het delen van IFC-bestanden is een veilig proces. Aan een IFC-bestand kunnen geen aanpassingen gedaan worden.

Wat is een Revit-model?

Revit is "Een BIM-software die architectuur-, techniek- en bouwteams helpt om gebouwen en infrastructuur van hoge kwaliteit te creëren." (Autodesk, z.d.). Revit wordt gebruikt om driedimensionale modellen te openen. In Revit is de mogelijkheid om verschillende software te openen. Zo ook de tool Bimpact.

Bimpact:

"Bimpact is een MPG-toetshulp binnen Revit die de MPG kan toetsen voor driedimensionale modellen." (Thijs Huijsmans). "De MPG-tool wordt gebruikt door projectgegevens en materiaaleigenschappen samen te voegen." (Bimpact, 2023). De elementen van het gebouw worden gelinkt aan materiaaleigenschappen uit de NMD (Nationale Milieu Database). "De NMD is een database waarin informatie zoals naam, levensduur, functionele eenheid en milieu-impact verkregen uit een LCA-analyse van verschillende producten is opgeslagen." (Stichting Nationale Milieudatabase, 2023). Door de MPG-toetshulp in te laden in Revit is het mogelijk om de gegevens van de NMD te koppelen aan de elementen in het driedimensionale model. Wanneer alle elementen binnen het model toegekend zijn aan de juiste materialen uit de NMD kan de tool een rapportage maken met een overzicht van de MPG-score. In de rapportage wordt per element de MKI-score weergegeven. Het rapport maakt dus inzichtelijk hoeveel impact elk materiaal heeft. Dit is een methode die door Heijmans gebruikt wordt om van gebouwen de MPG-score te

bepalen. Binnen de rapportage die de tool genereerd wordt ook de materiaal gebonden CO₂-uitstoot inzichtelijk gemaakt. Heijmans kan met BimImpact dus inzichtelijk maken wat de milieu-impact is van materialen en totale gebouwen.

Zie bijlage 1 voor het stappenplan van BimImpact.

Verder is er nog een andere methode om de MPG-score van een gebouw te berekenen:

Met GPR Materiaal kan men sinds kort voor nieuwbouw snel en eenvoudig een MPG-berekening, geheel volgens het Bouwbesluit, maken.

Met GPR materialen is het mogelijk om een MPG berekening van een gebouw te maken. Met GPR materiaal wordt er een MPG berekening gemaakt, de berekening die hiermee gemaakt wordt is minder precies en volledig dan die van BimImpact. De MPG berekening van GPR materialen is meer een grove quickscan. GPR materialen is dus opgebouwd om snel een MPG van het gebouw te berekenen. Uit gesprekken met Arko van Ekeren hebben we uiteindelijk gekozen om met BimImpact de MPG berekeningen te maken. Met BimImpact is het mogelijk om preciezer de MPG berekening te maken. Het voordeel van BimImpact is dat er een overzichtelijke rapportage gegenereert wordt. Er wordt dus gekozen om de MPG berekening wanneer mogelijk met BimImpact te maken.

Als de kengetallen met betrekking tot de impact op het milieu bekend zijn, wordt de bescherming van materiaal voorraden het volgende circulaire effect.

De werkwijze is hier vergelijkbaar met de analyse ten behoeve van de milieu-impact. Door middel van software kunnen de referentieprojecten geanalyseerd worden om materiaalgebruik inzichtelijk te maken. Echter, hier zijn twee programma's nodig. Solibri en Power BI.

Solibri:

Solibri is een softwareplatform dat gebruikt wordt binnen de bouwsector voor modelcontrole en kwaliteitsborging. BIM-modellen kunnen gecontroleerd en geanalyseerd worden of ze aan de gestelde eisen voldoen. Het doel van Solibri is de kwaliteit van de bouwmodellen verhogen, wat zorgt voor een beter bouwproces. In Solibri kunnen de IFC-modellen van de onderwijsgebouwen ingeladen worden. Solibri kan door middel van een tool binnen het programma de elementen in materialen indelen. De tool geeft weer uit welk materiaal de elementen bestaan en hoeveel materiaal er in het model zit. Dit kan Solibri doen doordat er een Excel model gemaakt door Heijmans is ingeladen in Solibri. Solibri linkt de materialen met de elementen. De hoeveelheid materiaal wordt gebruikt om een materiaalstroomanalyse te genereren.

Power BI:

"Power BI is een geharmoniseerd, schaalbaar platform voor self service en business intelligence (BI) voor ondernemingen." (*Microsoft PowerBI*, z.d.). In het softwareprogramma Power BI is het mogelijk om een materiaalstroomanalyse te genereren. Dit doet Heijmans door hoeveelheden van materialen uit Solibri te importeren in Power BI. Heijmans heeft in Power BI een tool ontwikkeld die de gegevens omzet tot een materiaalstroomanalyse.

Zie bijlage 2 voor het stappenplan van Solibri.

De vastgestelde parameters worden in een Excel-bestand verwerkt, waar in een overzicht vergelijkingen gemaakt kunnen worden. Alle projecten worden naast elkaar gezet in de horizontale richting. De parameters in de verticale richting. In dit overzicht zijn ook de MPG- en CO2-scores verwerkt, evenals de materiaalanalyse. Aan de hand van dit overzicht wordt een analyse gemaakt om patronen te vinden. Er wordt dan bepaald welke parameters de meeste invloed hebben op bijvoorbeeld de MPG-score.

Uit onderzoek kan geconcludeerd worden dat Heijmans drie methodes gebruikt om de circulaire effecten inzichtelijk te maken. Bimpact, Solibri en Power BI maken de MPG, CO2 en materiaalstromen inzichtelijk van gebouwen. De methodes van Heijmans kunnen gebruikt worden wanneer er van het gebouw online bouwmodellen zijn als IFC- & Revit-model.

3. Resultaten van de gebouwanalyse

3.1 De massa en milieu-impact van een onderwijsgebouw verdeeld over de systeemplagen

Binnen deze paragraaf wordt onderzocht wat een typisch onderwijsgebouw is. Er wordt onderzoek gedaan naar de kenmerken van een onderwijsgebouw. Vervolgens wordt er onderzocht wat de massa en milieu impact is van de onderwijsgebouwen.

De methodes die in het vorige hoofdstuk zijn onderzocht kunnen bepalen wat de massa is van het onderwijsgebouw en uit wat voor materiaal het gebouw bestaat. De MPG-score van het gebouw en de CO₂-waarde die opgeslagen is in de materialen wordt inzichtelijk gemaakt.

Dit wordt gedaan aan de hand van een tabel in Excel. In deze tabel staan de verschillende referentieprojecten op horizontale as. Gebouwgegevens en -kenmerken, eigenschappen, materialen, MPG-scores en CO₂-waarden op de verticale as. Deze tabel wordt ingevuld na verwerving van gegevens uit BIMpact en Solibri.

Deze tabel vormt de basis voor de tool en analyse van de gegevens.

Tijdens het analyseren van de modellen, het uitvoeren van MFA en het berekenen van de MPG werd duidelijk dat het niet mogelijk was om alle gebouwen uit te trekken en de gewenste data te verzamelen. Na aanlevering van de MFA en de totale BVO, heeft een expert binnen Heijmans gpr-quicksans uitgevoerd voor de Hanzehogeschool en het Duboisdomein. Een gpr-quicksan is minder accuraat dan een MPG-berekening met BIMpact.

Tabel 1: Resultaten gebouwenanalyse

		Duboisdomein	Science Campus	TU/e Gemini	Hanze Hogeschool
Locatie		Maastricht	Leiden	Eindhoven	Groningen
Bouwjaar		1993	2023	1974	
Gebruiksfuncties		Labatoria	Labatoria / Collegezalen	Labatoria en onderwijszalen	Collegezalen en onderwijszalen
Lengte	Meter		90	110	
Breedte	Meter		136	45	
Geveloppervlakt	Meter		12789	3410	15147
Hoogte	Meter		24,5	11	12,5
Bvo-totaal	M2	9700	29.942	13.074	30700
Aantal lagen		4	7	3	4
Bouwmethode		Montagebouw	Montagebouw	Skeletbouw	Montagebouw
Fundering		Balkenfundering	Balkenfundering	Balkenfundering	Balkenfundering
Constructie		Beton en staal	Beton en staal	Beton en staal	Beton en staal
Schil		Gevelbekleding	Gevelelementen	Vliesgevel	Gevelbekleding en prefab elementen
Licht/zwaar		Licht	Licht	Licht	Licht en zwaar
Gevel		Dicht	Open	Open	Open en dicht
Spaceplan		75% Dicht - 25% open	80% Dicht - 20% open	40% Dicht - 60% Open	90% Dicht - 10% Open
MFA	spaceplan aluminium		7,98	9,08	1,43
	spaceplan baksteen			1,63	0,29
	spaceplan beton		179,95	185,62	66,02
	spaceplan gips		21,19	5,83	10,80
	spaceplan glas		8,87	12,03	6,03
	spaceplan hout		9,13	5,54	19,46
	spaceplan isolatie		0,43	2,04	0,79
	spaceplan kalkzandsteen		1,27	12,82	74,23
	spaceplan kunststof		2,66		4,43
	spaceplan metalen				35,78
	spaceplan staal		27,43		26,36
	spaceplan steen		4,00	12,60	0,24
	constructie beton	475,89	963,97	905,80	1.195,18
	constructie hout	0,25	1,12		0,12
	constructie kalkzandsteen	1,52	24,07	22,70	20,00
	constructie staal	52,96	85,35	117,19	36,46
	fundering beton	114,67	260,81	95,84	316,70
	skin aluminium		21,26	2,67	14,39
	skin baksteen				19,33
	skin beton			2,25	
	skin glas		12,50	33,95	11,16
	skin hout				5,13
	skin isolatie		4,52	0,91	3,65
	skin kunststoffen				1,33
	skin staal		16,94		2,01
	Totaal	6.259.423	49.507.805	18.676.415	57.449.982
	kg/BVO	645	1.653	1.429	1.871
MPG	Structure	10,25	10,35	10,24	10,35
	Skin		10,10	10,10	10,12
	Spaceplan		10,13	10,08	10,19
	Totaal	10,25	10,58	10,42	10,66
CO2-emissie	kg/m2(BVO)	123	410,11	329,37	372,35

3.1.1 Het typische onderwijsgebouw en zijn systeemlagen

Als typisch onderwijsgebouw wordt een gemiddelde genomen van de referentieprojecten die ter beschikking zijn. Na invullen van de tabel blijkt dat, zoals verwacht, de gebruiksfuncties overeenkomen. De onderwijsgebouwen hebben laboratoria en collegezalen. De onderwijsgebouwen hebben een constructie van staal en beton. De fundering is een balkenfundering. Als schil wordt voornamelijk een elementengevel toegepast. De onderwijsgebouwen hebben lichte gevels. Verder valt op dat de meeste gebouwen een redelijk gesloten spaceplan hebben.

De systeemlagen worden toegepast aan de hand van het model van Steward Brant. In dit onderzoek wordt gewerkt met:

- Structure
- Skin
- Spaceplan

3.1.2 Milieu-impact en MFA

Wat direct opvalt is het hoge aandeel van de structure in de MPG-score van de gebouwen. Zowel bij de quickscans als bij de uitgebreide analyses beslaat de structure meer dan 60% van de totale MPG-score. Materialen die onder structure vallen zijn hout, kalkzandsteen, staal en beton.

In het MPG-rapport van de gebouwen is te vinden dat staal en beton een groot aandeel hebben in de hoge waarde van de structure.

Het staal komt qua kilo per m² BVO en MPG-score goed overeen met elkaar.

€0,12 voor TU Eindhoven Gemini

28.3: Hoofddraagconstructies; ruimte eenheden		
<i>Onderdeel 'Verankeringen' wordt niet afgedekt!</i>		
<i>Onderdeel 'Verzwaringen' wordt niet afgedekt!</i>		
Cat. 2 - Zwaar constructiestaal, design for reuse, overspanning groter dan 25 meter 7820 kgm³, incl. conservering	1532094,000 kg	€ 0,12
Embodied CO ₂ -eq.	139,21 kg CO ₂ -eq. per m ² BVO	

Figuur 18: Resultaat staalconstructie TU Eindhoven Gemini

€0,09 voor Science Campus Leiden

28.3: Hoofddraagconstructies; ruimte eenheden		
<i>Onderdeel 'Verankeringen' wordt niet afgedekt!</i>		
<i>Onderdeel 'Verzwaringen' wordt niet afgedekt!</i>		
Cat. 2 - Zwaar constructiestaal, design for reuse, overspanning groter dan 25 meter 7820 kgm³, incl. conservering	2555670,000 kg	€ 0,09
Embodied CO ₂ -eq.	101,39 kg CO ₂ -eq. per m ² BVO	

Figuur 19: Resultaat staalconstructie Science Campus

Wat bij beton opvalt is dat de gebouwen qua kilo's per m² BVO en MPG-score niet in lijn liggen met elkaar. Bij de Science Campus Leiden wordt een hogere MPG-score behaalt per kilo beton.

De hypothese is dat de Science Campus een hogere sterkteklasse beton bevat, omdat het gebouw veel groter is en de constructie dus sterker moet zijn.

Beton wordt namelijk geclassificeerd op basis van de druk die het kan weerstaan. Deze sterkteklassen hebben verschillende eigenschappen. Zo is dus ook de sterkteklasse van het beton een bepalende factor voor de milieu-impact van het materiaal. Dit komt door

het cement in beton. Cement is namelijk verantwoordelijk voor 95% van de milieu-impact van beton (CE Delft, 2013). Als beton een hoge sterkteklasse heeft, is er meer en sterker cement in verwerkt en is de milieu-impact dus groter.

De betonsterkte in de constructie van Science Campus is voornamelijk C55/67. Daarentegen is de betonsterkte in de constructie van TU Eindhoven Gemini voornamelijk C30/37.

Binnen Heijmans zijn er enkele experts op het gebied van MKI-scores. Na raadplegen van expert Jeroen van Oosten wordt duidelijk dat de MKI-score van C55/67 wel 50% groter is dan die van C30/37. Dit komt overeen met de hypothese en verklaart het verschil in milieu-impact van beton in beide gebouwen.

Uit de resultaten is op te maken dat qua spaceplan en skin de Hanzehogeschool een stuk slechter scoort op de MPG-score. Dit is voornamelijk toe te schrijven aan de bakstenen gevel van het gebouw. Baksteen scoort relatief slecht op de MKI-score, namelijk €28,80/m³. De overige materialen vallen redelijk in lijn met massa en volume. Verder zit er een marge in de MPG-waarde van de Hanzehogeschool vanwege het toepassen van een quickscan.

3.1.3 CO₂

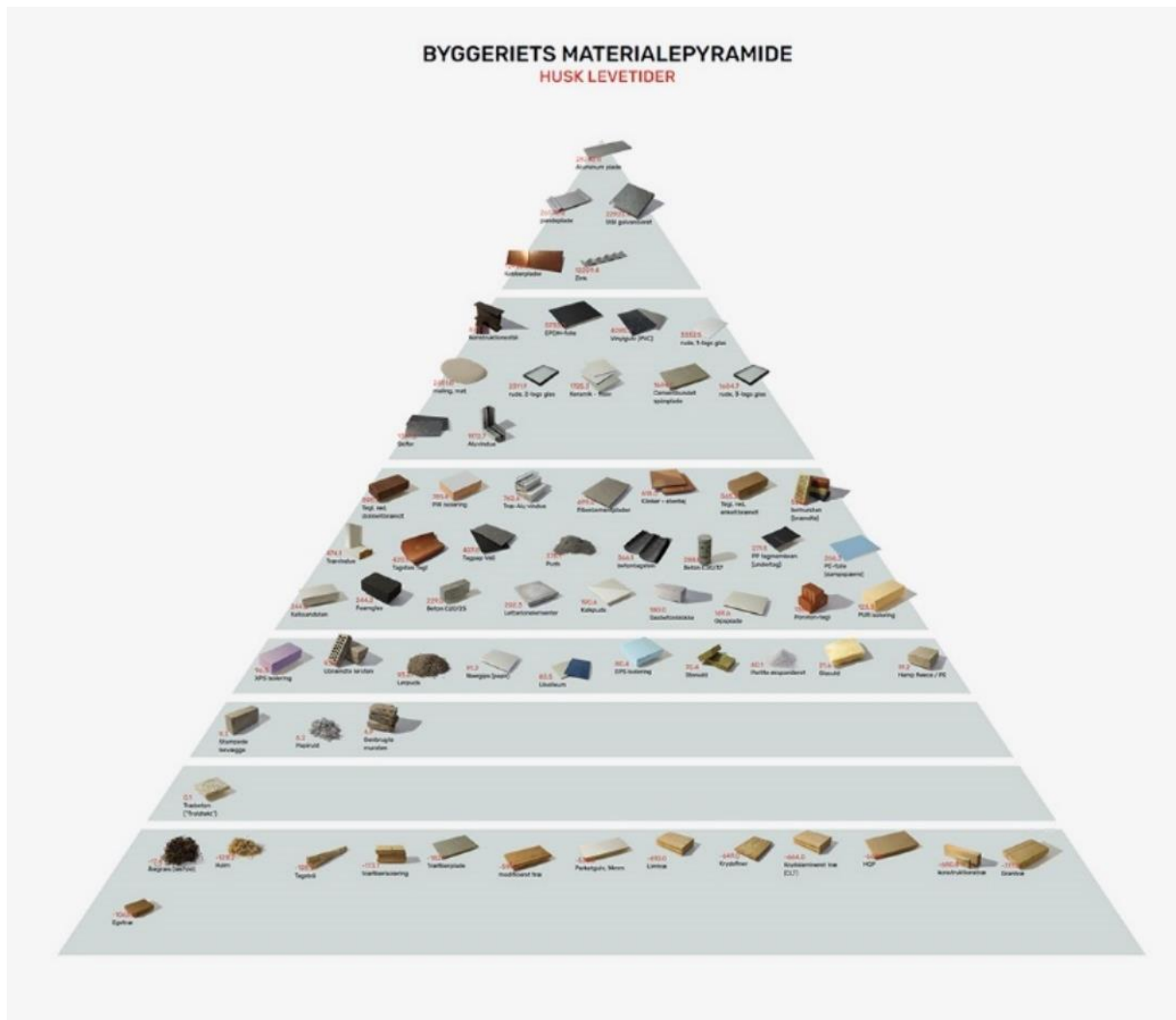
Buiten de MKI en MPG is ook CO₂-uistoot een indicatie van milieu-impact. Dit wordt dus ook meegenomen om te bepalen of een materiaal goed of slecht is voor het milieu. Aan de hand van een studie van de Royal Danish Academy (2019), is een piramide opgesteld om inzichtelijk te maken wat de CO₂-uitstoot van bouwmaterialen is. De piramide geeft overzicht en laat zien welke materialen de grootste uitstoot hebben. Deze materialen worden beoordeeld op Global Warming Potential, ofwel GWP. De piramide is interactief en gebaseerd op dezelfde gegevens als de LCA.

De eenheid is GWP [kg CO₂ eq /kg]. Het getal geeft dan de hoeveelheid CO₂-uitstoot per kilo per kilo materiaal weer.



Figuur 20: Materiaalpiramide in GWP [kg CO₂ eq / kg] (Bron: Royal Danish Academy, 2019)

Wat opvalt in de piramide is dat aluminium enorm hoog en dus slecht scoort. Aluminium is meer dan twee maal zo belastend als het eerstvolgende materiaal, EPDM. Constructiestaal scoort bijna tien keer beter dan aluminium. Echter, er moet wel in ogenschouw genomen worden dat omgerekend naar kubieke meters, de indeling van de piramide er anders uit zal zien. Staal heeft bijvoorbeeld een veel hogere dichtheid dan aluminium, maar zelfs dan blijft aluminium een enorm belastend materiaal.



Figuur 21: Materiaalpiramide in GWP [m^3 CO₂ eq /kg] (Bron: Royal Danish Academy, 2019)

De waarden uit de piramide worden in dit onderzoek gebruikt voor de CO₂-waarden van de materialen. Verder wordt in dit onderzoek gewerkt met kilo's per vierkante meter BVO, dus de piramide op basis van kilo's en niet op basis van kubieke meters wordt gehandhaafd.

Wat opvalt is dat beton relatief goed scoort op MKI en CO₂-uitstoot. Beton heeft namelijk een intensief productieproces, waar veel energie gebruikt wordt. Beton is goed voor zo'n 5 tot 7% van de wereldwijde CO₂-uitstoot (Kreijveld, 2018). Toch komt uit de Nationale Milieu Database en de CO₂ materiaalpiramide dat beton, ook de hogere sterkteklassen, niet heel belastend is. Echter, door de enorme hoeveelheden waarin beton geproduceerd wordt, heeft het toch een significante impact op het milieu.

Samenvattend kan gesteld worden dat voor het typische onderwijsgebouw een gemiddelde genomen wordt van de referentieprojecten die ter beschikking zijn. De onderwijsgebouwen hebben laboratoria en collegezalen. Verder hebben ze een constructie van staal en beton. De fundering is een balkenfundering. Als schil wordt voornamelijk een elementengevel toegepast. De onderwijsgebouwen hebben lichte gevels. Verder valt op dat de meeste gebouwen een redelijk gesloten spaceplan hebben.

De systeemplagen worden toegepast aan de hand van het model van Steward Brant. In dit onderzoek wordt gewerkt met:

- Structure
- Skin
- Spaceplan

Voor de CO₂-waardes per materialen wordt de piramide uit de studie van de Royal Danish Academy toegepast. De CO₂-waardes worden uitgedrukt in GWP [kg CO₂ eq /kg].

3.2 Het inzichtelijk maken van het circulair effect van circulair renoveren in een dashboard

Binnen de organisatie Heijmans wordt er veel geïnvesteerd in innovatie. Voorbeelden hiervan zijn programma's als BIMpact, GPR materiaal, Solibri, Revit en Power BI. Binnen dit onderzoek is er onderzocht wat circulair renoveren is, wat de circulaire effecten zijn, hoe deze circulaire effecten meetbaar worden gemaakt en wat de massa en milieu-impact is van een onderwijsgebouw. Hiervan zijn in de vorige paragraaf analyses gemaakt en wordt er binnen dit hoofdstuk omschreven wat de indicatoren zijn die bepalen wat de massa en milieu-impact is van een onderwijsgebouw.

Vanuit onderzoek wordt er een dashboard ontwikkeld dat een startpunt is voor Heijmans om de milieu-impact & materiaalstroom van een onderwijsgebouw te voorspellen. Het dashboard wordt ontwikkeld om circulaire effecten mee te wegen rondom besluitvorming.

De output is een dashboard waarin je per systeemlaag kan zien wat de circulaire effecten zijn.

3.2.1 Analyse

De resultaten uit de vorige paragraaf staan in tabel 1. In deze tabel zijn alle gegevens van de gebouwen opgenomen en naast elkaar gezet. De bovenste helft van de tabel vormt de praktische informatie en in de onderste helft van de tabel staat de verkregen MFA, MPG en CO₂ data vanuit de gebouwanalyse door middel van de Solibri en BIMpact. Op basis van deze stamtabel kan een analyse gemaakt worden om trends en patronen te vinden. Als duidelijke trends en patronen gevonden zijn, kunnen indicatoren opgesteld worden welke de basis vormen voor een voorspellingstool om inzichtelijk te maken wat de circulaire effecten van circulair renoveren zouden zijn.

De data wordt omgerekend naar waardes per vierkante meter BVO. Doordat alle data naar deze eenheid is omgerekend, kunnen de gegevens beter vergeleken worden. Vanaf hier zullen in dit rapport alle waardes van kilo's en CO₂ al omgerekend zijn naar waardes per vierkante meter BVO tenzij anders vermeld. De MPG-score is van zichzelf al per vierkante meter BVO.

Zie bijlage 2 voor de materiaalstromen van de gebouwen.

De volgende gebouwen zijn geanalyseerd:

Tabel 2: Kenmerken van de onderwijsgebouwen

Gebouw	Dubois Domein	Science Campus Leiden	TU Eindhoven Gemini	Hanzehogeschool Groningen
BVO	9700 m2 BVO	29942 m2 BVO	13074 m2 BVO	30700 m2 BVO
Type gevel	Elementengevel	Elementengevel	Vliesgevel	Elementengevel
Type fundering	Balkenfundering	Balkenfundering	Balkenfundering	Balkenfundering
Openheid gevel	Dichte gevel	Open gevel	Open gevel	Open en dichte gevel
Dichte of open indeling	75% dicht	80% dicht	40% dicht	90% dicht

Deze praktische gegevens zijn van belang bij de analyse en het bepalen van de indicatoren. Het Dubois Domein bestaat alleen uit een constructief model en heeft dus geen gegevens over de schil en afbouw. Wel kan het gebruikt worden om vergelijkingen te maken voor constructie.

Vanwege tijdsdruk zijn de milieu-impact van het Dubois Domein en de Hanzehogeschool verkregen door middel van een quickscan met een GPR-berekening. Op deze gegevens zit een foutmarge van 0 tot 30%.

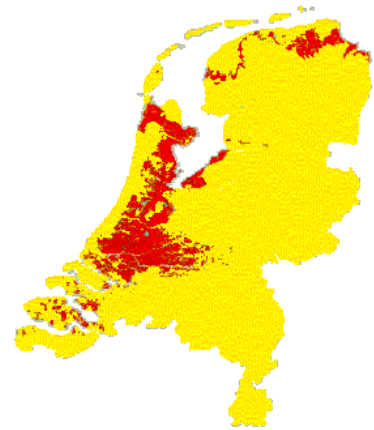
3.2.1.1 Structure

De Hanzehogeschool is het zwaarst met in totaal 1871 kg per m2 BVO. Daarna volgen Science Campus met 1653kg en TU/e met 1429kg. Dit verschil in gewicht zit voornamelijk in de structure van het gebouw. De structure van de Hanzehogeschool bestaat hoofdzakelijk uit beton. Een betonnen constructie is zwaarder dan een stalen constructie, omdat staal een veel hogere sterkte/gewichtsverhouding heeft. Het gewicht van een stalen constructie is dus relatief klein (Skyciv, 2019).

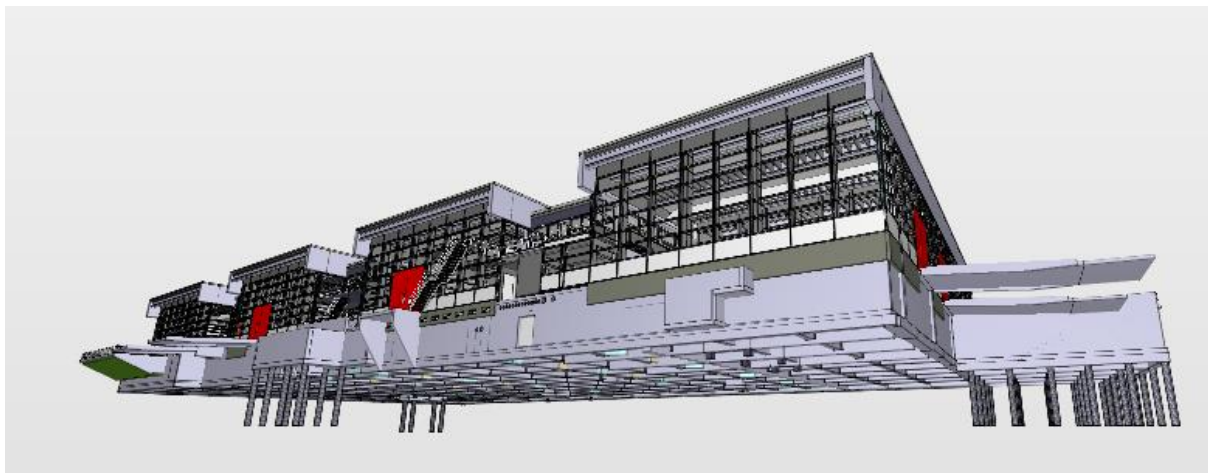
Tabel 3: Gebouwanalyse van de systeemplagen

Systeemplagen	TU/e	Science Campus	Hanze Hogeschool
Skin {kg/m2 BVO}	39,79	55,22	57,00
Structure {kg/m2 BVO}	1141,53	1335,32	1568,46
Spaceplan {kg/m2 BVO}	247,19	262,92	245,88

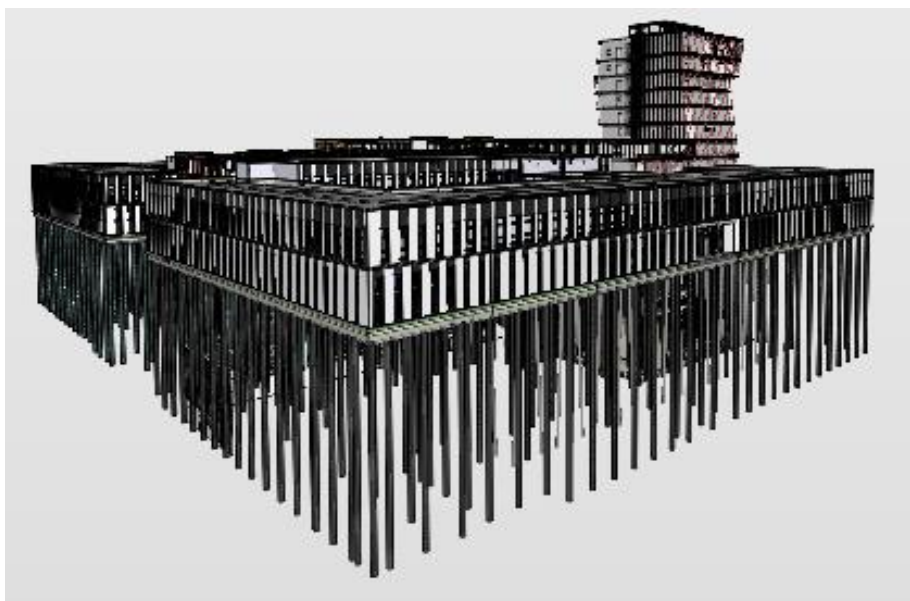
Onder deze genoemde kilo's valt ook de fundering van het gebouw inclusief de palen. Een palenfundering wordt toegepast waar de draagkrachtige laag te diep in de grond zit. Dit heeft te maken met de grondsoort waarop gebouwd wordt. In de randstad en in het noorden van Nederland komt dit vaker voor en worden relatief veel palen toegepast (Joostdevree, z.d.). Dit is ook te zien aan de hand van de 3d-modellen (zie afbeeldingen). De locatie van het gebouw is dus een indicator voor het gewicht van de fundering.



Figuur 22: Indicatie gebruik paalfunderingen in Nederland (Bron: Joostdevree,z.d.)



Figuur 23: TU/e Gemini



Figuur 24: Hanze Hogeschool

Tabel 4: Constructieve gebouwanalyse

Systeemplagen	TU/e	Science Campus	Hanze Hogeschool
Constructie beton {kg/m2 BVO}	905,80	927,18	1195,18
Fundering beton {kg/m2 BVO}	95,84	297,60	316,70

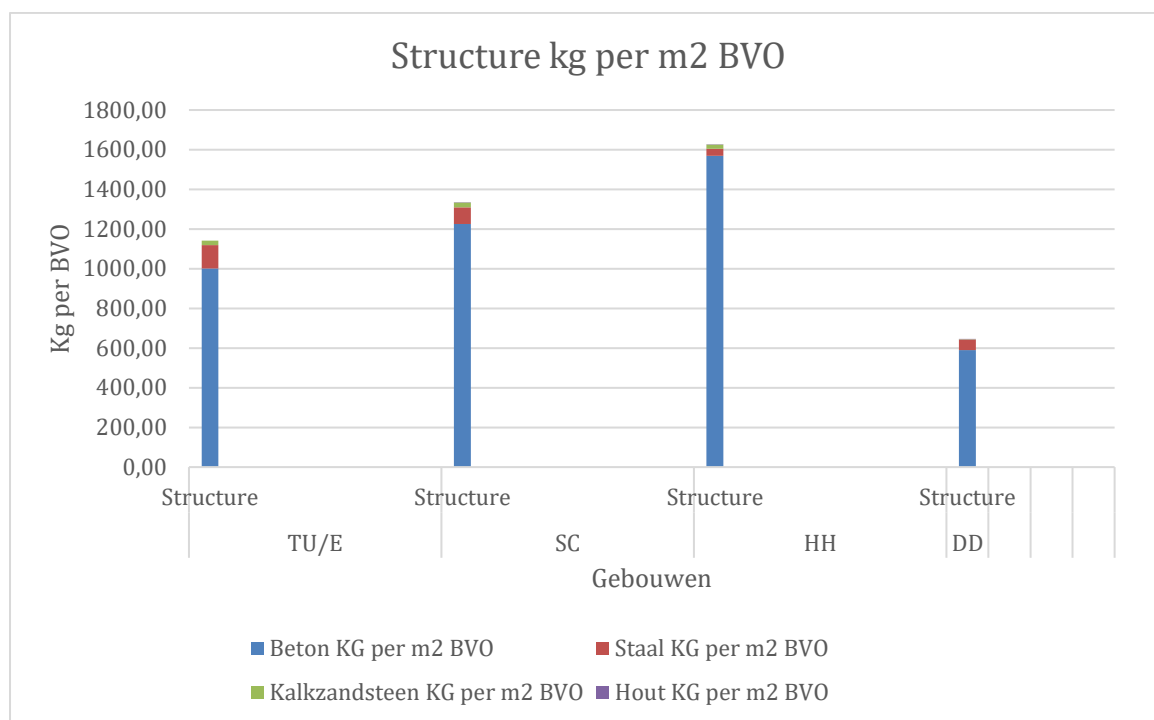
Het is opvallend dat de palenfundering dicht bij elkaar ligt. Deze gebouwen zijn ook vergelijkbaar. Hieruit valt een bandbreedte op te stellen. Een fundering op palen zal ongeveer rond de 300 kilo per m2 BVO liggen (met foutmarge). Voor een fundering met weinig tot geen palen richting de 100 kilo per m2 BVO.

De Hanzehogeschool heeft een betonconstructie, terwijl de TU en Science Campus ook overwegend staal hebben. Dit is goed terug te zien in grafiek 1. Staal heeft een hoge CO₂- en MKI-waarde zie tabel 4. Alhoewel de structure van de Hanze hogeschool zwaarder is, is de MPG-score gelijk met Science Campus zie grafiek 3. Science Campus heeft zelfs een hogere CO₂-waarde dit is vanwege het grotere aandeel staal zie grafiek 2. Beton heeft een hoog aandeel in de structure, vanwege de fundering, de vloeren en de dragende betonwanden.

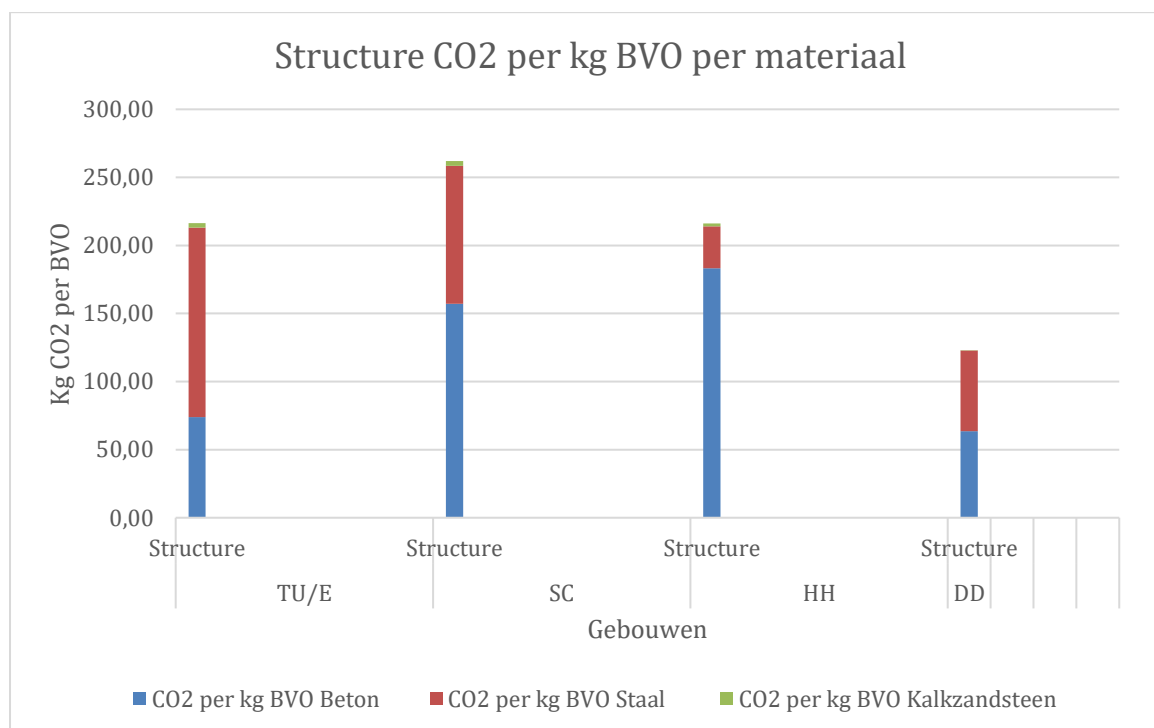
Tabel 5: Indicatie materialen MKI & CO₂

	MKI [euro/kg]	CO ₂ [kg CO ₂ eq/kg]
Structure:		
Structure Beton C30/37	0,007	0,13
Structure Beton C55/67	0,010	0,20
Structure Hout	0,010	-1,30
Structure Kalkzandsteen	0,004	0,14
Structure Staal	0,070	1,12
Fundering Beton	0,007	0,13

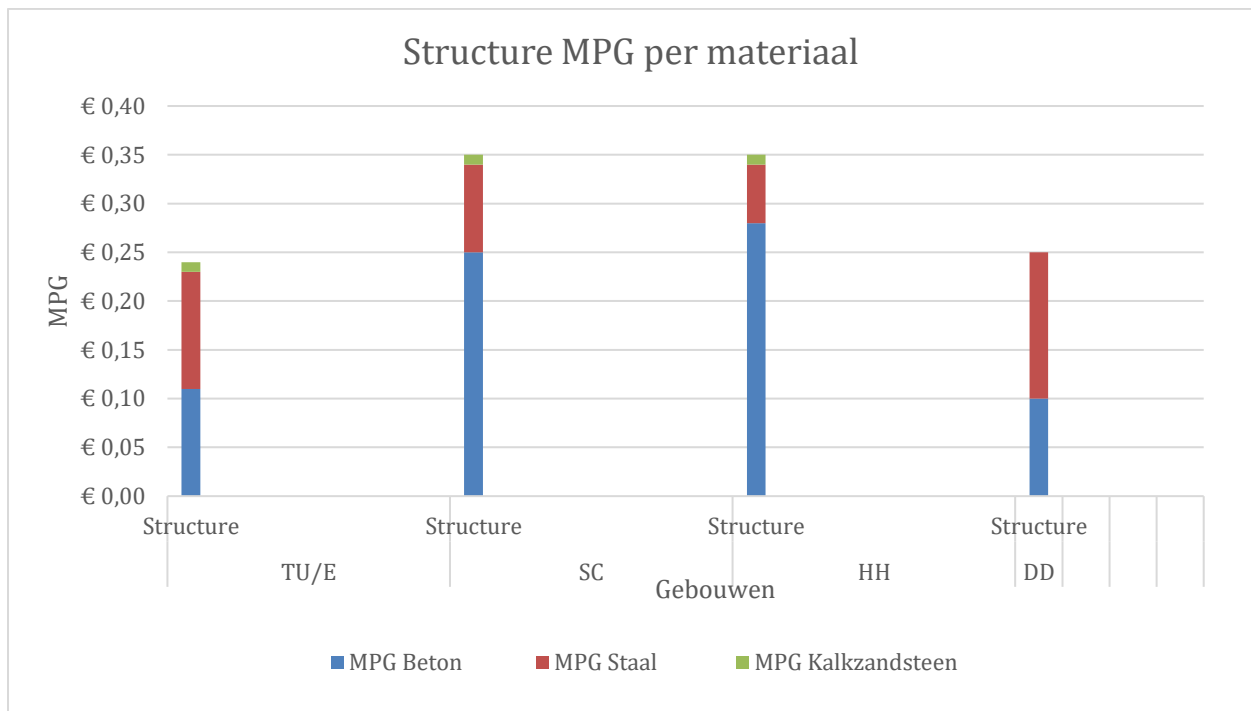
Grafiek 1: Kilo's materiaal in de structure per m2 BVO



Grafiek 2: Kilo's CO2 per materiaal in de structure per BVO



Grafiek 3: Aandeel MPG per materiaal van de structure



3.2.1.2 Skin

De zwaarte van de gevel per BVO wordt buiten de gebruikte materialen ook bepaald door de hoeveelheid gevel. De vierkante meters gevel zijn niet per se inherent aan het BVO en zal dus los bepaald moeten worden om goed inzicht te kunnen krijgen in de massa's. Dit zal dan ook een indicator worden in de tool.

Tabel 6: Skin indicatie gebouwen kg/m² BVO & MPG

Gebouwen	Systeemlaag	Kg/ m ² BVO	MPG
TU/e	Skin	39,79	€ 0,10
SC	Skin	55,22	€ 0,10
HH	Skin	57,00	€ 0,12

Tabel 7: Skin indicatie gebouwen kg/m² BVO & CO₂/m² BVO

De TU Eindhoven Gemini heeft een vliesgevel en de twee andere gebouwen een elementengevel. De TU heeft een kleinere massa, maar dezelfde MPG-score als de Science Campus. Dit betekent dat de materialen in de vliesgevel van de TU een hogere MKI-score hebben dan in de Science Campus en aan de grafiek af te lezen ook de Hanzehogeschool. Het lijkt dus dat een elementengevel een betere milieu-impact heeft dan een vliesgevel. De CO₂-waarde van de vliesgevel ligt wel mooi in lijn met de twee andere gebouwen.

Echter, een vliesgevel heeft dezelfde functie als een elementengevel; het is een gevel. Deze functie wordt bij de TU met minder kilo's, dezelfde MPG en minder CO₂-uitstoot ook behaald. Vanuit circulair oogpunt en op basis van de beschikbare gegevens is de conclusie te trekken dat de vliesgevel een minder belastende gevel is dan de elementengevel.

Gebouwen	Systeemlaag	Kg/m ² BVO	CO ₂ /m ² BVO
TU/e	Skin	39,79	42,37
SC	Skin	55,22	57,24
HH	Skin	57,00	59,94

Met betrekking tot de tool kunnen deze gegevens ook gebruikt worden. Vanuit de stamtabel kan er onderscheid gemaakt worden in vliesgevel en elementengevel per vierkante meter gevel. Ook hier kan een bandbreedte opgesteld worden en ligt de MPG-score dicht bij elkaar (zie bijlage 4 voor de gegevens). Vliesgevel rond de 150 kilo per m² gevel. Elementengevel rond de 115 tot 130 kilo per m² gevel. Het verschil in MPG-score tussen de Science Campus en de Hanzehogeschool is te verklaren door het relatief grote geveloppervlak van de Hanzehogeschool ten opzichte van het BVO.

3.2.1.3 Spaceplan

Uit de analyses van de drie gebouwen komen de volgende resultaten voor de spaceplan (zie tabel 7).

Tabel 8: Spaceplan indicatie gebouwen kg/m2 BVO, MPG & CO2 kg/m2 BVO

Gebouwen:	Systeemlaag	Kg/m2 BVO	MPG	CO2 kg/m2 BVO
TU/e Gemini	Spaceplan	247,19	€ 0,08	70,69
Science Campus	Spaceplan	262,92	€ 0,13	90,96
Hanze hogeschool	Spaceplan	245,88	€ 0,19	85,41

Uit tabel 7 is af te lezen dat Science Campus het meeste kg/m2 BVO spaceplan heeft. Science Campus heeft een dichte spaceplan. Hiermee wordt bedoeld dat er weinig grote en open ruimtes zijn. Het gebouw is dus ingedeeld in veel kleine hokjes.

Wat opvalt in de tabel is dat Hanze hogeschool ook een dichte spaceplan heeft, maar dat de kg/m2 BVO lager ligt dan dat van de Science Campus. Toch behaalt de Hanzehogeschool een stuk hogere MPG-score. TU/e Gemini daarentegen heeft open spaceplan, maar wel ongeveer evenveel kg/m2 BVO als dat van de Hanze Hogeschool maar daarbij een twee keer zo lage MPG-score.

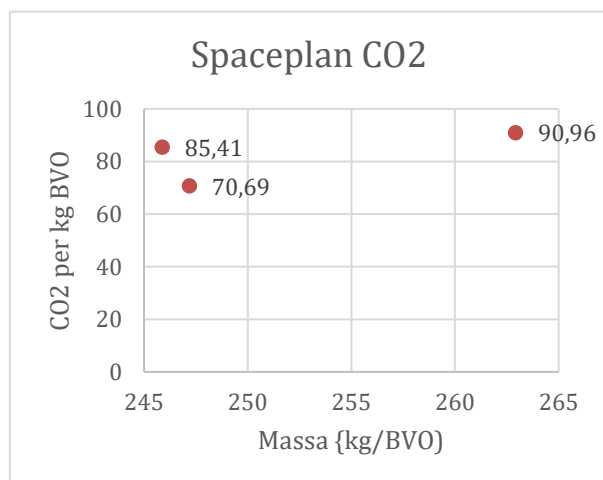
Steenachtige binnenwanden zijn zwaarder dan metal-stud wanden. Dit resulteert dus in een relatief zware spaceplan voor een gebouw met een open indeling. Steenachtige materialen als kalkzandsteen scoren veel beter op de MKI-schaal dan de materialen die toegepast worden in lichte scheidingswanden als metal-stud (zie tabel 8).

De kilo's per vierkante meter BVO van de drie gebouwen liggen dus dicht bij elkaar, maar de MPG-score van de TU/e is dus een stuk lager. Een indicator voor de tool is dus of een gebouw steenachtige binnenwanden heeft. Een gebouw met steenachtige binnenwanden is zwaarder dan een vergelijkbaar gebouw met lichte binnenwanden. Het gebouw met lichte binnenwanden scoort in dat geval wel een stuk slechter op de MPG. Dit komt doordat in een lichte scheidingswand vooral materialen zitten die een hoge MKI-score hebben.

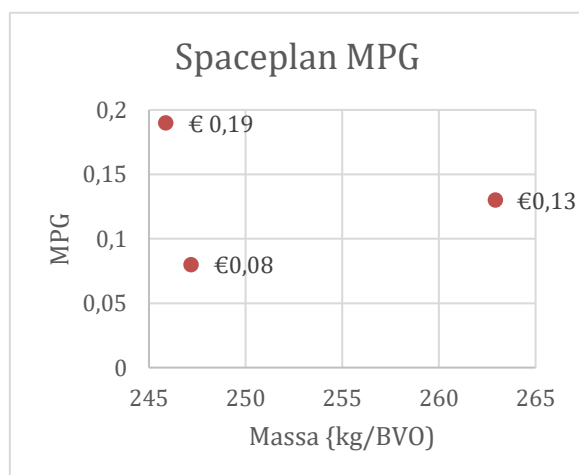
Tabel 9: Materialen in de spaceplan MKI & CO2

	MKI [euro/kg]	CO2 [kg CO2 eq/kg]
Spaceplan Aluminium	0,220	10,46
Spaceplan Baksteen	0,020	0,50
Spaceplan Beton	0,007	0,13
Spaceplan Gips	0,022	0,21
Spaceplan Glas	0,161	1,86
Spaceplan Hout	0,010	-1,30
Spaceplan Isolatie	0,138	1,52
Spaceplan Kalkzandsteen	0,004	0,14
Spaceplan Kunststof	0,358	2,48
Spaceplan Metalen	0,247	1,52
Spaceplan Staal	0,070	1,12
Spaceplan Steen	0,135	0,31

Grafiek 4: Analyse van de Spaceplan in CO2



Grafiek 5: Analyse van de spaceplan in MPG



De MPG-score van de Science Campus is zes cent lager dan van de Hanzehogeschool. De CO₂-waarde is daarentegen hoger. Dit zit in het aandeel aluminium in de spaceplan van de Science Campus. Aluminium is qua GWP enorm belastend met wel meer dan 10 kilo CO₂ eq. per kilo aluminium. Het verschil in MPG is te verklaren door de vele kilo's aan overige metalen in de Hanze hogeschool. Deze scores hoog op met de MKI, waardoor de Hanze hogeschool met de lichtste afbouw toch de hoogste MPG-score haalt.

3.2.2 Gevonden criteria met bijbehorende formules

Bij de gevonden criteria horen formules waarmee de tool kan werken. Deze formules liggen achter de tool, waardoor er tijdens het invullen van de tool de juiste resultaten weergegeven worden.

De formules voor de verschillende soorten fundering:

$$\text{Massa veel palen} = \frac{\text{Som van kilo's per m2 BVO beton in de fundering met veel palen}}{\text{aantal gebouwen met veel palen in de fundering}} * \text{BVO}$$

$$\text{Massa weinig palen} = \frac{\text{Som van kilo's per m2 BVO beton in de fundering met weinig palen}}{\text{aantal gebouwen met weinig palen in de fundering}} * \text{BVO}$$

$$\text{MPG veel palen} = \text{totale kilo's beton in fundering} * 0,007 / (\text{BVO} * 50)$$

$$\text{MPG weinig palen} = \text{totale kilo's beton in fundering} * 0,007 / (\text{BVO} * 50)$$

$$\text{CO2 veel palen} = \text{totale kilo's beton in fundering} * 0,13$$

$$\text{CO2 weinig palen} = \text{totale kilo's beton in fundering} * 0,13$$

De formules voor de betonconstructie:

$$\text{Massa beton in betonconstructie} = \frac{\text{Som van kilo's per m2 BVO beton in de betonconstructie}}{\text{aantal gebouwen betonconstructie}} * \text{BVO}$$

$$\text{Massa staal in betonconstructie} = \frac{\text{Som van kilo's per m2 BVO staal in de betonconstructie}}{\text{aantal gebouwen met een betonconstructie}} * \text{BVO}$$

$$\text{MPG beton in betonconstructie} = \frac{\text{Totale kilo's beton in de betonconstructie} * 0,007}{\text{BVO} * 50}$$

$$\text{MPG staal in betonconstructie} = \frac{\text{Totale kilo's staal in de betonconstructie} * 0,070}{\text{BVO} * 50}$$

$$\text{CO2 beton in betonconstructie} = \text{totale kilo's beton in de betonconstructie} * 0,13$$

$$\text{CO2 staal in betonconstructie} = \text{totale kilo's staal in de betonconstructie} * 1.12$$

De formules voor de staalconstructie:

$$\text{Massa beton in staalconstructie} = \frac{\text{Som van kilo's per m2 BVO beton in de staalconstructie}}{\text{aantal gebouwen met een staalconstructie}} * \text{BVO}$$

$$\text{Massa staal in staalconstructie} = \frac{\text{Som van kilo's per m2 BVO staal in de staalconstructie}}{\text{aantal gebouwen met een staalconstructie}} * \text{BVO}$$

$$\text{MPG beton in staalconstructie} = \frac{\text{Totale kilo's beton in de staalconstructie} * 0,007}{\text{BVO} * 50}$$

$$\text{MPG staal in staalconstructie} = \frac{\text{Totale kilo's staal in de staalconstructie} * 0,070}{\text{BVO} * 50}$$

$$\text{CO2 beton in staalconstructie} = \text{totale kilo's beton in de staalconstructie} * 0,13$$

CO_2 staal in staalconstructie = totale kilo's staal in de staalconstructie * 1.12

De formules voor de verschillende soorten gevel:

$$\text{Massa vliesgevel} = \frac{\frac{\text{Som van de totale kilo's van de materialen in de vliesgevel van gebouw 1}}{\text{geveloppervlakte gebouw 1}} + \text{gebouw 2} + \text{enz ...}}{\text{aantal gebouwen met vliesgevels}} * \text{geveloppervlakte}$$

$$\text{Massa elementengevel} = \frac{\frac{\text{Som van de totale kilo's van de materialen in de elementengevel van gebouw 1}}{\text{geveloppervlakte gebouw 1}} + \text{gebouw 2} + \text{enz ...}}{\text{aantal gebouwen met elementengevels}} * \text{geveloppervlakte}$$

$$\text{MPG Vliesgevel} = \frac{\text{massa vliesgevel}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som MPG vliesgevels}}{\text{som gewicht vliesgevels per bvo}}$$

$$\text{MPG Elementengevel} = \frac{\text{massa elementengevel}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som MPG elementengevels}}{\text{som gewicht elementengevels per bvo}}$$

$$\text{CO}_2 \text{ Vliesgevel} = \frac{\text{massa vliesgevel}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som CO}_2 \text{ vliesgevels}}{\text{som gewicht vliesgevels per bvo}}$$

$$\text{CO}_2 \text{ Elementengevel} = \frac{\text{massa elementengevel}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som CO}_2 \text{ elementengevels}}{\text{som gewicht elementengevels per bvo}}$$

De formules voor de afbouw:

$$\text{Aantal m2 binnenwand per m2 bvo per procent dichte afbouw} = \frac{\left(\frac{\text{kilo's lichte binnenwanden per m2 BVO gebouw 1}}{24 \text{ kilo}} + \frac{\text{kilo's zware binnenwanden per m2 BVO gebouw 2}}{175 \text{ kilo}} \right)}{\text{percentage dichte afbouw gebouw 1}} + (\text{gebouw 2}) + \text{enz...}}{\text{aantal gebouwen}}$$

Massa zware binnenwanden

$$= \text{percentage zware binnenwanden} * 100$$

$$* \text{aantal m2 binnenwanden per m2 BVO per procent} * \text{percentage afbouw} * 175 \text{ kilo}$$

$$* \text{m2 BVO}$$

Massa lichte binnenwanden

$$= (100 - \text{percentage zware binnenwanden})$$

$$* \text{aantal m2 binnenwanden per m2 BVO per procent} * \text{percentage afbouw} * 24 \text{ kilo}$$

$$* \text{m2 BVO}$$

$$\text{MPG zware binnenwanden} = \frac{\text{kilo's zware binnenwanden}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som MPG zware binnenwanden}}{\text{aantal gebouwen}}$$

$$\text{MPG lichte binnenwanden} = \frac{\text{kilo's lichte binnenwanden}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som MPG lichte binnenwanden}}{\text{aantal gebouwen}}$$

$$\text{MPG zware binnenwanden} = \frac{\text{kilo's zware binnenwanden}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som CO}_2 \text{ zware binnenwanden}}{\text{aantal gebouwen}}$$

$$\text{MPG licht binnenwanden} = \frac{\text{kilo's lichte binnenwanden}}{\text{BVO}} * \frac{\text{som CO}_2 \text{ lichte binnenwanden}}{\text{aantal gebouwen}}$$

3.2.3 De tool

Heijmans wil meer inzicht krijgen in circulaire effecten van renoveren. Dit wil Heijmans in de vorm van een tool, waarmee ze bij besluitvorming rondom renovaties de circulaire effecten mee kunnen laten wegen. Binnen de tool willen ze inzichtelijk krijgen wat de circulaire effecten zijn over vier verschillende typen renovatie. De tool moet dus voorspellingen kunnen doen voor de circulaire effecten van onderwijsgebouwen.

Een vereiste van de tool is dat het bruikbaar moet zijn voor medewerkers van Heijmans. Heijmans wil de tool gebruiken bij besluitvorming rondom renovaties daarom is het belangrijk dat de tool wordt ingericht zodat het voor men in een oogopslag duidelijk is hoe de tool werkt en wat de resultaten van de tool zijn.

Aan de hand van de vastgestelde indicatoren kan de tool opgebouwd worden. Dit wordt gedaan in Excel.

De tool heeft de indicatoren nodig om voorspellingen te kunnen maken en daarom is gekozen om links de indicatoren weer te geven. Hier kan de gebruiker de gegevens en eigenschappen van het gebouw invoeren aan de hand van de instructies welke weergegeven als de cel wordt geselecteerd. Bovenin kan praktische informatie ingevuld worden en vervolgens kan men daaronder de indicatoren invullen.

Rechts van de indicatoren zijn de resultaten te vinden. Bovenin de totalen, daaronder de resultaten welke onderdeel zijn van de totalen. Deze kolommen representeren de massa's, MPG-scores en CO2-waarden. Bij de MPG-score is voor referentie een kleurenindicatie toegevoegd waarin, vanzelfsprekend, rood slecht en groen goed is.

Onderin de tool staan taartdiagrammen welke visueel een overzicht geven van het aandeel van de materialen. Ook hier gaat het om aandeel van de totale massa, totale MPG-score en totale CO2-waarde.

Rechts in de tool staat een tabel met de circulaire eigenschappen van de basismaterialen. In deze tabel is in percentages de oorsprong en end-of-life scenario van de materialen weergegeven. Deze waardes blijven altijd gelijk en zijn onafhankelijk van de ingevulde indicatoren.

Door middel van de formules uit de vorige paragraaf worden de resultaten berekend en weergegeven.

Op een ander tabblad in het Excel-bestand staan deze formules en de mogelijkheid om meerdere projecten toe te voegen aan de database van de tool.



Figuur 25: Voorspellingstool in circulaire effecten (Bron: Eigen werk, 2023)

De tool is opgebouwd uit vijf verschillende onderdelen.

- Algemene informatie (gebouw, locatie, BVO, oppervlakte gevel)
- Type renovatie (keuze uit vier typen renovatie)
- Structure (Paalfundering, Hoofdconstructie)
- Skin (Soort gevel)
- Spaceplan (percentage dichte afbouw, percentage zware binnenwanden)

Elk onderdeel resulteert in verschillende waarden. Door te kiezen tussen de verschillende typen renovatie veranderen de getallen in de kolommen. Na keuze van het type renovatie laat de tool door middel van kleuren zien welke waarden staan voor het deel van het gebouw dat blijft staan en welk deel van het gebouw nieuw gebouwd wordt. De waarden die staan voor nieuwbouw worden geel gemarkeerd en de waarden die staan voor het deel van het gebouw dat intact blijft zijn wit gemarkeerd. Deze kleurmarkering staat ook aangegeven in de legenda bovenaan de tool.

De diagrammen onderin geven een visueel overzicht en daarmee ook een beter inzicht in de gevolgen van de keuzes van renovatie.

4. Conclusie

Dit onderzoek staat in het teken van de vraag:

“Op welke manier kan een organisatie als Heijmans inzichtelijk krijgen wat het circulair effect van circulair renoveren is, ten opzichte van nieuwbouw?”

Het doel van dit onderzoek is om een methodologie te ontwikkelen welke inzichtelijk maakt wat het circulair effect van circulair renoveren is, ten opzichte van nieuwbouw.

Dit is behaald door een grondige literatuurstudie, een diepgaande analyse en een methodisch ontwerpend onderzoek.

Circulair renoveren is onderdeel van een circulaire economie. Circulair renoveren is het vernieuwen, onderhouden en hergebruiken van gebouwdelen zonder natuurlijke hulpbronnen onnodig uit te putten, de leefomgeving te vervuilen en het ecosysteem aan te tasten. Nieuwe materialen worden geminimaliseerd en bestaande materialen blijven in de kringlopen van de circulaire economie.

Uit literatuuronderzoek blijkt dat de relevante circulaire effecten voor Heijmans en daarbij de bouwsector vooral milieu-impact en behouden van materiaalvoorraden zijn. De impact op het milieu wordt gemeten door middel van een MPG-berekening en CO₂-waardes. De omgang met materialen kan inzichtelijk gemaakt worden door middel van MFA ofwel materiaalstroomanalyse.

De toekomstwaarde van een systeemlaag kan beoordeeld worden door twee hoofdcriteria: adaptiviteit en duurzaamheid. Een goede verdeling in de twee hoofdcriteria zorgt voor een hoge toekomstwaarde van de systeemlagen.

In een materiaalstroomanalyse wordt inzichtelijk gemaakt hoeveel en welke materialen er in een gebouw zitten. Verder wordt duidelijk hoe het materiaal gewonnen is en wat het end-of-life scenario is.

Uit analyse van referentieprojecten zijn de volgende indicatoren gevonden voor circulaire effecten:

- Bruto Vloeroppervlakte
- Geveloppervlakte
- Paalfundering
- Beton- of staalconstructie
- Soort gevel
- Hoeveelheid afbouw
- Percentage zware binnenwanden

Door middel van het ontwikkelen van een tool kunnen de circulaire effecten inzichtelijk gemaakt worden. In deze tool wordt het type renovatie en de indicatoren ingevuld om de circulaire effecten aan de hand van vastgestelde formules te voorspellen en inzichtelijk te maken.

Door het gebruik van de ontwikkelde tool kan Heijmans de circulaire effecten van circulaire renovatie inzichtelijk maken. Hierdoor is het mogelijk om bij besluitvorming rondom renovatie van onderwijsgebouwen de circulaire effecten mee te laten wegen.

5. Discussie

5.1 Verwachtingen

Voorafgaand aan het onderzoek werd verwacht dat door middel van een tool de circulaire effecten rondom renovaties van onderwijsgebouwen voorspeld konden worden. Er werd verwacht dat de tool voorspellingen zou maken aan de hand van vijf tot zeven analyses van bestaande onderwijsgebouwen. De tool zou voorspellingen maken over impact op het milieu, materiaalstromen en toekomstwaarde.

5.2 Validiteit

In het plan van aanpak zijn de kaders van het onderzoek aangegeven. De opgestelde deelvragen zijn op de juiste manier beantwoord volgens de opgestelde randvoorwaarden. Door deze deelvragen te beantwoorden is het antwoord op de hoofdvraag verkregen.

Tijdens de afstudeerperiode zijn er veel gesprekken geweest met medewerkers binnen Heijmans om kennis te kunnen verkrijgen op het gebied van: methodieken, tooling, belangrijke gegevens en eerdere onderzoeken. De bronnen/artikelen zijn voor gebruik getoetst op betrouwbaarheid en actualiteit, wat resulteert in een valide en relevant onderzoek.

De tool is getoetst aan resultaten van geanalyseerde projecten. De tool kan voorspellingen maken voor onderwijsgebouwen rondom renovaties in milieu-impact en massa's van gebouwen.

Tijdens het onderzoek zijn uiteindelijk vier gebouwen geanalyseerd. Eén van deze gebouwen bestond alleen uit een constructief model en de milieu-impact is berekend aan de hand van een quickscan. Dit samen zorgt ervoor dat het gebouw niet representatief genoeg is om mee te nemen in de berekeningen. Wel zijn de gegevens gebruikt om verbanden vast te kunnen stellen.

De drie overige gebouwen zijn wel representatief en deze data is dus gebruikt om tot de tooling te komen. Echter, bij verbanden vinden en vaststellen tussen drie gebouwen is sprake van onvoldoende gegevenspuntendichtheid waardoor de gevonden verbanden en indicatoren met grove gemiddeldes vastgesteld zijn.

De indicatoren en verbanden zijn van toepassing. Deze zijn getoetst aan de hand van literatuur en de verkregen data.

5.3 Resultaten interpreteren

Uit onderzoek is gebleken dat Heijmans circulaire effecten rondom renovaties inzichtelijk kan maken. Dit voldoet aan onze verwachting voorafgaand het onderzoek. Zoals verwacht is het mogelijk om deze voorspellingen te doen in milieu-impact met een zelfontwikkelde tooling. Voorafgaand werd verwacht dat de tool ook een materiaalstroom zou kunnen genereren met toekomstwaarde van materialen aan de hand van voorspelde uitkomsten. Echter, is dit niet gelukt door het gebrek aan benodigde vaardigheden en tijd.

5.4 Beperkingen

In deze scriptie over circulariteit is het belangrijk om te erkennen dat er beperkingen zijn met betrekking tot de beschikbaarheid en hoeveelheid gegevens die verkregen zijn, zoals gesteld in paragraaf 5.2. Hoewel er uitgebreid onderzoek is verricht en relevante gegevens zijn verzameld, zouden meer gebouwanalyses leiden tot sterkere conclusie en verbanden. Circulariteit is een complex onderwerp en omvat vele processen. Er zijn enorm veel mogelijkheden en er worden nog steeds nieuwe bevindingen gedaan, waardoor er inconsistenties kunnen zijn in de beschikbare literatuur. Er is in deze scriptie zo veel mogelijk gewerkt met recente en consistente gegevens.

5.5 Maatschappelijke relevantie

De maatschappelijke relevantie van dit onderzoek wordt uitgedrukt door middel van de sustainable development goals. Het onderzoek draagt bij aan twee SDG-doelen, namelijk: doel 12 verantwoorde consumptie en productie en doel 13 klimaatactie.

Het target van verantwoorde consumptie en productie is “tegen 2030 de afvalproductie aanzienlijk beperken via preventie, vermindering, recyclage en hergebruik” (SDG Nederland, 2023). Door te meten wat de circulaire effecten zijn van circulair renoveren wordt inzichtelijk wat voor impact er bespaard kan worden op het milieu, wanneer er materiaal wordt hergebruikt, gerecycled of er minder materiaal wordt gebruikt. Dit onderzoek zal binnen Heijmans zorgen voor inzicht op circulaire effecten en zal leiden tot vermindering van impact op het milieu. Hiermee specificeert dit onderzoek zich op target 12,5.

Het target van klimaatactie is “de opvoeding, bewustwording en de menselijke en institutionele capaciteit verbeteren met betrekking tot mitigatie, adaptatie, impactvermindering en vroegtijdige waarschuwing inzake klimaatverandering” (SDG Nederland, 2023). Door te meten wat de circulaire effecten zijn van circulair renoveren wordt inzichtelijk wat voor impact er bespaard kan worden op het milieu. Dit onderzoek zal binnen Heijmans zorgen voor inzicht op circulaire effecten en zal leiden tot vermindering van impact op het milieu. Hiermee specificeert dit onderzoek zich op target 13,3.

5.6 Aanbevelingen

Aan de hand van de resultaten uit het onderzoek wordt aan Heijmans geadviseerd vervolgonderzoeken uit te voeren. De volgende vervolgonderzoeken worden aanbevolen omdat kansen worden gezien ter verbeteren van de tool.

- Uit het onderzoek blijkt dat een materiaalstroom inzichtelijk maakt, welk materiaal er in een gebouw zit en de toekomstwaarde van de materialen weergeeft. Dit zorgt voor een beter inzicht in het gebouw. Daarom wordt geadviseerd om een automatische materiaalstroom generatie te koppelen aan de voorspellingtool.
- Heijmans wordt nadrukkelijk geadviseerd om meerdere gebouwen te analyseren en te verwerken in de tool. Er zijn in de huidige staat van de tool maar drie representatieve gebouwen verwerkt, waardoor de kengetallen in de tool een foutmarge hebben. Door de gegevenspuntendichtheid te vergroten worden de kengetallen accurater. De tool biedt een sterk startpunt voor Heijmans en daarom is het advies om meer gegevens te verwerken.
- Om de tool zo volledig mogelijk te maken, wordt geadviseerd om gegevens van verschillende gebouwen mee te nemen. Denk hierbij aan bijvoorbeeld een gebouw met een constructie van hout. Zo kunnen meerdere opties in de tool verwerkt worden, waardoor voor meerdere onderwijsgebouwen circulaire effecten accuraat voorspeld kunnen worden.
- Binnen dit onderzoek zijn installaties niet meegenomen. Advies voor Heijmans is om installaties mee te nemen aangezien deze ook invloed hebben op de massa, milieu-impact en CO₂-waarde van een gebouw. Advies voor Heijmans is om hier onderzoek naar te doen en mee te nemen in de tooling. Wat zal resulteren in een complete voorspelling van een totaal onderwijsgebouw.

Literatuur en informatiebronnen

Autodesk. (z.d.). *Revit-software | Officiële Revit 2022-prijzen en kopen*. Geraadpleegd op 4 maart 2023 van, <https://www.autodesk.nl/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Bimpact. (2023, 11 januari). *Bouwwerken toetsen op MPG wordt een fluitje van een cent - BIMPACT*. BIMPACT. Geraadpleegd op 4 maart 2023 van, <https://www.bimpact.nl/toetshulpen/mpg-toetshulp/>

Bocken, N. M. P., Bakker, C., & Pauw, I. De. (2016). *Product design and business model strategies for a circular economy*

Bodem+ (z.d.). *Grondstoffen*. Geraadpleegd op 7 maart 2023, van <https://www.bodemplus.nl/opgaven/grondstoffen/#:~:text=Met%20een%20toenemend%20wereldbevolking%2C%20een,natuurlijk%20systeem%20en%20de%20leefomgeving.>

Bouwend Nederland. (2021, 27 juli). *Circulair bouwen: waarom en hoe dan?* Geraadpleegd op 7 maart 2023, van <https://www.bouwendnederland.nl/actueel/nieuws/20030/circulair-bouwen-waarom-en-hoe-dan>

Brink Management en Advies. (2019, 23 september). *Validatietraject Toekomstwaarde van gebouwen*. Geraadpleegd op 20 maart 2023 van, https://duurzamemetaalbouw.nl/app/uploads/2021/11/19003123-eindrapport_validatietraject_definitief.pdf

Building Enclosure. (z.d.). Geraadpleegd op 2 maart 2023 van, <https://www.buildingenclosureonline.com/blogs/14-the-be-blog/post/90583-embodied-carbon-and-the-shearing-layers-of-change>

C-creators. (2021, 5 maart). *Handboek Circulair Renoveren Woningcorporaties*. <https://c-creators.org/>. Geraadpleegd op 22 februari 2023 van, https://c-creators.org/wp-content/uploads/2022/09/Handboek_circulair_renoveren_woningcorporaties_C-Creators.pdf.pdf

CE Delft. (2013, april). *Milieu impact van betongebruik in de Nederlandse bouw. Status quo en toetsing van verbeteropties*. Geraadpleegd op 17 april 2023, van https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/CE_Delft_2828_Milieu-impact_van_betongebruik_DEF_1411033477.pdf

Centraal Bureau voor de Statistiek. (2013). *Monitor Materiaalstromen*. Geraadpleegd op 24 maart 2023, van <file:///C:/Users/jabo23/Downloads/2013-Monitor-materiaalstromen-pub.pdf>

Centraal Bureau voor de Statistiek. (2019, 4 november). *Meeste afval en hergebruik materialen in bouwsector*. Geraadpleegd op 31 januari 2023, van <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/45/meeste-afval-en-hergebruik-materialen-in-bouwsector>

Circulairwest. (z.d.). *Materiaalstromen*. Geraadpleegd op 4 april 2023, van https://www.circulairwest.nl/index.php?page=16&sid=2&are_cookies_accepted=13;CKI:20230403154120;83.82.236.40;904e820f7209c11dc37287e26511e1b0

Cirkelstad. (2023, 7 maart). *Samen Versnellen: "Het Nieuwe Normaal."* Geraadpleegd op 10 maart 2023. <https://www.cirkelstad.nl/project/samen-versnellen/>

Copper8. (2020, November). *Circulaire ambities Berlijnplein*. bestuurlijkeinformatie.nl. Geraadpleegd op 28 maart van, <https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAMQw7AJahcKEwi4zdSLtf79AhUAAAAAHQAAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Futrecht.bestuurlijkeinformatie.nl%2FDocument%2FView%2Fa1e7a450-7027-4714-9a7e-5b1299cfa731&psig=AOvVaw1pCVBxRLVXLcQNN--RWPk1&ust=1680085698424533>

Deiso. (2022, 18 oktober). Wat zijn materiaalstroomanalyse (MFA) en stofstroomanalyse (SFA)? - *DEISO*. *DEISO*. Geraadpleegd op 4 april 2023, van <https://deiso.co.jp/nl/what-are-material-flow-analysis-mfa-and-substance-flow-analysis-sfa/>

EIB en Metabolic. (2020, januari). *Materiaalstromen, milieu-impact en energieverbruik in de woning- en utiliteitsbouw*. Geraadpleegd op 22 maart 2023, van https://openresearch.amsterdam/image/2021/3/31/rapport_materiaalstromen_in_de_woning_en_utiliteitsbouw_klein.pdf

Eurabo. (z.d.) *Hernieuwbare grondstoffen*. Geraadpleegd op 20 april 2023, van <https://www.eurabo.be/nl/lexicon/hernieuwbaar>

Europees Parlement. (2015, 12 februari). *Circulaire economie: definitie, belang en voordelen* | *Nieuws* | *Europees Parlement*. Geraadpleegd op 1 maart 2023 van, <https://www.europarl.europa.eu/news/nl/headlines/economy/20151201STO05603/circulaire-economie-definitie-belang-en-voordelen>

Forum Standaardisatie. (z.d.). *IFC*. Geraadpleegd op 4 maart 2023 van, [https://www.forumstandaardisatie.nl/open-standaarden/ifc#:~:text=Industry%20Foundation%20Classes%20\(IFC\)%20is,bouwproces%20over%20met%20name%20bouwwerken](https://www.forumstandaardisatie.nl/open-standaarden/ifc#:~:text=Industry%20Foundation%20Classes%20(IFC)%20is,bouwproces%20over%20met%20name%20bouwwerken).

Geraedts, R. (2014, 3 juli). *Adaptief Vermogen*. <https://repository.tudelft.nl/>. Geraadpleegd op 7 maart 2023 van, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:9baadb74-94de-41ec-93a0-c41736a0e714/datastream/OBJ>

Guinée, ., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, HA., de Bruijn, JA., van Duin, JHR., & Huijbregts, MAJ. (2002). *Levenscyclusanalyse. De ISO-normen uitgewerkt in een praktijkgerichte handleiding*. Ministerie van VROM en Centrum voor Milieukunde (CML). Geraadpleegd op 20 maart 2023.

Heijmans. (z.d.). *Ons verhaal*. Geraadpleegd op 30 Januari 2023. <https://www.heijmans.nl/nl/over-heijmans/ons-verhaal/>

Heijmans. (z.d.). *Strategie*. Geraadpleegd op 2 februari 2023.

<https://www.heijmans.nl/nl/over-heijmans/strategie/>

Hermans, MMN., Geraedts, RP., Remoy, HT., & van Rijn, E. (2014). *Bepalingsmethode adaptief vermogen van gebouwen ter bevordering van flexibel bouwen (conceptrapport)*.

Jelyta, F. (2021, 18 augustus). *7 kansen voor duurzaam bouwen met bakstenen*. Geraadpleegd op 17 april 2023, van <https://www.change.inc/infra/7-kansen-voor-duurzaam-bouwen-met-bakstenen-18933>

Joostdevree.nl. (2014, 3 juli). *Gebouwen met toekomstwaarde!* <https://www.joostdevree.nl/>. Geraadpleegd op 6 maart 2023 van, https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgo/open_bouwen_21a_gebouwen_met_toekomstwaarde_2014_www_adaptiefvermogen_nl.pdf

Joostdevree.nl. (z.d.) *Paalfundering*. Geraadpleegd op 23 mei 2023, van <https://www.joostdevree.nl/shtmls/paalfundering.shtml>

Kreijveld, M. (2018, 26 oktober). *Minder CO2-uitstoot in de bouwsector*. Geraadpleegd op 18 mei 2023 van <https://www.oneworld.nl/lezen/schone-energie/hoe-de-bouw-co2-uitstoot-kan-vastleggen/#:~:text=Beton%20is%20na%20water%20het,een%20van%20de%20grootste%20sectoren>

Kuijpers, M. (2020, 21 september). *Staal is onmisbaar én supervervuילend. Hoe ziet een duurzame ijzertijd eruit?* De Correspondent. <https://decorrespondent.nl/11473/staal-is-onmisbaar-en-supervervuילend-hoe-ziet-een-duurzame-ijzertijd-eruit/d531b79c-e9f5-0238-3994-f4010a113a7b>

Lemoine, T. (z.d.). *Wat is BIM*. BIMportal. Geraadpleegd op 29 maart 2023, van <https://www.bimportal.be/nl/bim/algemeen/bim/>

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2022, 4 februari). *Gebouwde omgeving*. Klimaatakkoord. Geraadpleegd op 2 maart 2023 van, <https://www.klimaatakkoord.nl/gebouwde-omgeving>

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2021, 26 januari). *Wat is het doel van het Klimaatakkoord?* Klimaatakkoord. Geraadpleegd op 15 maart 2023 van, <https://www.klimaatakkoord.nl/klimaatakkoord/vraag-en-antwoord/wat-is-het-doel-van-het-klimaatakkoord>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022, 6 april). *Grondstoffenakkoord*. Rapport | Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd op 1 februari 2023, van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2017/01/24/grondstoffenakkoord-intentieovereenkomst-om-te-komen-tot-transitieagenda-s-voor-de-circulaire-economie>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022, 17 januari). *Nederland circulair in 2050*. Circulaire economie | Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd op 11 december 2022. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2023, 6 februari). *Nederland circulair in 2050. Circulaire economie* | Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd op 1 februari 2023, van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050>

Ministerie van Infrastructuur en Milieu en het ministerie van Economische Zaken, mede namens het ministerie van Buitenlandse Zaken en het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2016, September). *Nederland circulair in 2050*. Open Overheid. Geraadpleegd op 15 maart 2023 van, <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-a6ce8220-07e8-4b64-9f3d-e69bb4ed2f9c/pdf>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022, 31 maart). *Noodzaak van circulaire economie*. Circulaire economie | Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd op 28 februari 2023, van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/noodzaak-van-circulaire-economie#:~:text=Een%20circulaire%20economie%20kan%20een,grondstoffen%20vermindert%20uitstoot%20van%20broeikasgasen>

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2023, 6 februari). *Nederland circulair in 2050. Circulaire Economie* | Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd op 28 februari 2023 van, <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050>

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. (2022, 1 november). *Voortgang klimaatdoelen*. Klimaatverandering | Rijksoverheid.nl. Geraadpleegd op 12 december 2022. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/voortgang-klimaatdoelen>

Nederlandstalige WikiWoordenboek. (2023, 6 maart). *Ensie*. <https://www.ensie.nl/betekenis/abiotisch?q=abiotisch>

Open overheid. (2016, september). *Nederland circulair in 2050. Documenten* | open.overheid.nl. Geraadpleegd op 14 februari 2023, van <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-a6ce8220-07e8-4b64-9f3d-e69bb4ed2f9c/pdf>

Partner, B. (2022). *Gips als circulair product*. Geraadpleegd op 17 april 2023, van <https://www.bouwwereld.nl/bouwkennis/duurzaamheid/gips-als-circulair-product/>

Planbureau voor de Leefomgeving. (2019, 17 december). *Sturen circulaire economie vergt meerdere doelen*. Geraadpleegd op 6 maart 2023, van <https://www.pbl.nl/nieuws/2019/sturen-circulaire-economie-vergt-meerdere-doelen>

Platform CB'23. (2022, 30 juni). *Metten van circulariteit*. Geraadpleegd op 7 maart 2023, van https://platformcb23.nl/images/downloads/2022/final/Leidraad_Meten-van-circulariteit-3.pdf

Portal Platform CB'23. (z.d.). Geraadpleegd op 2 februari 2023. <https://platformcb23.nl/>

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2018). *Circulair bouwen: Kansen en Randvoorwaarden*. Geraadpleegd op 9 maart 2023.

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2019, juli). *HANDREIKING LOSMAAKBAARHEID*. PIANO. Geraadpleegd op 20 maart 2023 van, <https://www.pianoo.nl/sites/default/files/media/documents/2019-08/Handreiking-Losmaakbaarheid-V6-juli2019.pdf>

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2021). *MilieuPrestatie Gebouwen - MPG*. Geraadpleegd op 18 maart 2023, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/milieuprestatie-gebouwen-mpg>

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2022, mei). *Artikel 6 EED renovatieplicht gebouwen publieke instellingen*. <https://www.rvo.nl/>. Geraadpleegd op 1 maart 2023 van, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-05/artikel-6-eed-renovatieplicht-gebouwen-publieke-instellingen.pdf>

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (z.d.). *R-ladder – Strategieën van circulariteit*. Geraadpleegd op 27 februari 2023, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/r-ladder>

Rijksvastgoedbedrijf. (2021, februari). *De waarde van biobased bouwen*. Geraadpleegd op 19 mei 2023, van <https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2020/12/De-waarde-van-biobased-bouwen-voor-RVB-2020-versie-1.0.pdf>

Schampers, W. (2019, 5 juli). *De duurzaamheid van bitumen dakbedekking • Vakblad Recycling Magazine Benelux*. Vakblad Recycling Magazine Benelux. Geraadpleegd op 17 april 2023, van <https://www.recyclingmagazine.nl/algemeen/de-duurzaamheid-van-bitumen-dakbedekking/35842/>

SDG Nederland. (2023, 13 april). *Home - SDG Nederland*. Geraadpleegd op 22 mei 2023 van, <https://www.sdgnerland.nl/>

Skyciv.com. (2019, 13 februari). *Staal versus hout versus beton*. Geraadpleegd op 23 mei 2023, van <https://skyciv.com/nl/technical/steel-vs-timber-vs-concrete/>

Stichting Nationale Milieudatabase. (2023, 1 januari). *Milieuprestatieberekening*. NMD. Geraadpleegd op 4 maart 2023 van, <https://milieudatabase.nl/nl/milieuprestatie/milieuprestatieberekening/>

Stichting Nationale Milieudatabase. (z.d.). *Hoe circulair is kalkzandsteen?* Geraadpleegd op 17 april 2023, van <https://milieudatabase.nl/nl/actueel/nieuws/hoe-circulair-is-kalkzandsteen/>

S. (2022, 5 september). *Hét product voor modelcontrole en samenwerking*. Solibri. Geraadpleegd op 4 maart 2023 van, <https://www.solibri.com/nl/solibri-office>

Toekomstwaarde - Toekomstwaardegebouw. (13 januari 2023). Toekomstwaardegebouw. Geraadpleegd op 6 maart 2023 van, <https://www.toekomstwaardegebouw.nl/toekomstwaarde/>

Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition. (November 2015). Geraadpleegd op 28 februari 2023 van,

<https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>

Wat is de toekomstwaarde van uw gebouw? (2023, 13 januari). Toekomstgebouw.
<https://www.toekomstwaardegebouw.nl/>

Wat is het verschil tussen een circulaire en een lineaire economie? – Kenniskaarten – het Groene Brein. (22 juni 2022). Kenniskaarten – Het Groene Brein. Geraadpleegd op 28 februari 2023 van, <https://kenniskaarten.hetgroenebrein.nl/kenniskaart-circulaire-economie/wat-is-het-verschil-tussen-een-circulaire-en-een-lineaire-economie/>

Wat is Power BI? Definitie en functies | Microsoft Power BI. (z.d.). Geraadpleegd op 4 maart 2023 van, <https://powerbi.microsoft.com/nl-nl/what-is-power-bi/>

Afbeeldingenlijst

Figuur 1: Stappenplan voor het ontwikkelen van de tool	13
Figuur 2: Lineaire economie (Bron: Wat Is Het Verschil Tussen Een Circulaire En Een Lineaire Economie? - Kenniskaarten - Het Groene Brein, 2022).....	15
Figuur 3: Circulaire economie (Bron: Wat Is Het Verschil Tussen Een Circulaire En Een Lineaire Economie? - Kenniskaarten - Het Groene Brein, 2022).....	16
Figuur 4: Vlinderdiagram Ellen MacArthur Foundation (Bron: Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition, 2015)	18
Figuur 5: 6 lagen model Stewart Brand (Bron: Building Enclosure, z.d.).....	20
Figuur 6: R-ladder (Bron: PBL, 2016)	22
Figuur 7: Aangrijpingspunten voor doelen van de circulaire economie (Bron: PBL, 2019)	24
Figuur 8: Doelen circulair bouwen (Bron: Platform CB'23)	25
Figuur 9: Levensloop van materialen (Bron: Platform CB'23, 2022)	26
Figuur 10: Thema's circulariteit (Bron: Cirkelstad, 2023).....	27
Figuur 11: Levenscyclusanalyse van materialen (Bron: de Valk, E., & Quik, J., 2017) ..	29
Figuur 12: Milieuprestatie bouwwerk (Bron: de Valk, E., & Quik, J., 2017)	30
Figuur 13: Toekomstwaarde van gebouwen (Bron: Toekomstwaarde - Toekomstwaardegebouw, 2023).....	32
Figuur 14: Materiaalstroomanalyse (Bron: Deiso, z.d.).....	37
Figuur 15: Massaverhoudingen in de bouw (Bron: Metabolic, z.d.)	39
Figuur 16: Levensloop van materialen (Bron: Heijmans, 2023)	41
Figuur 17: Evolutie van bouwproces naar BIM (Bron: BIMportal, z.d.).....	43
Figuur 18: Resultaat staalconstructie TU Eindhoven Gemini	50
Figuur 19: Resultaat staalconstructie Science Campus	50
Figuur 20: Materiaalpiramide in GWP [kg CO ₂ eq /kg] (Bron: Royal Danish Academy, 2019)	52
Figuur 21: Materiaalpiramide in GWP [m ³ CO ₂ eq /kg] (Bron: Royal Danish Academy, 2019)	53
Figuur 22: Indicatie gebruik paalfunderingen in Nederland (Bron: Joostdevree,z.d.)	57
Figuur 23: TU/e Gemini.....	57
Figuur 24: Hanze Hogeschool	57
Figuur 25: Voorspellingtool in circulaire effecten (Bron: Eigen werk, 2023).....	67

Grafieken- en tabellen lijst

Tabel 1: Resultaten gebouwenanalyse	49
Tabel 2: Kenmerken van de onderwijsgebouwen	56
Tabel 3: Gebouwanalyse van de systeemplagen.....	56
Tabel 4: Constructieve gebouwanalyse	58
Tabel 5: Indicatie materialen MKI & CO2	58
Tabel 6: Skin indicatie gebouwen kg/m2 BVO & MPG	61
Tabel 7: Skin indicatie gebouwen kg/m2 BVO & CO2/m2 BVO	61
Tabel 8: Spaceplan indicatie gebouwen kg/m2 BVO, MPG & CO2 kg/m2 BVO	62
Tabel 9: Materialen in de spaceplan MKI & CO2	63
Grafiek 1: Kilo's materiaal in de structure per m2 BVO.....	59
Grafiek 2: Kilo's CO2 per materiaal in de structure per BVO.....	59
Grafiek 3: Aandeel MPG per materiaal van de structure	60
Grafiek 4: Analyse van de Spaceplan in CO2.....	63
Grafiek 5: Analyse van de spaceplan in MPG.....	63

Bijlage

Zie bijlageboek



Koninklijke Heijmans N.V.

Graafsebaan 65
5248 Rosmalen

+31 (0) 40 250 43 00

www.heijmans.nl

Jan Bos

Daan van Rijswijck