

HET CIRCULAIRE POTENTIEEL VAN REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN

de case van stro

Rune Lierman

Universiteit Hasselt
Masteropleiding Architectuur
Faculteit Architectuur en Kunst

Seminarie Bouwkundig Concept
Academiejaar 2020-2021

Promotor: Prof. dr. ir. Elke Knapen

VOORWOORD

Deze masterscriptie vormt samen met mijn masterproject het sluitstuk van mijn vijfjarige opleiding Architectuur aan de Universiteit van Hasselt. Graag zou ik een aantal mensen persoonlijk willen bedanken die mij ondersteund hebben doorheen dit traject en bij het tot stand komen van deze scriptie.

Als eerste zou ik mijn promotor Prof. dr. ir. Elke Knapen willen bedanken voor haar tijd en bijdrage aan dit onderzoek. Haar constructieve feedback en ondersteuning hebben ervoor gezorgd dat ik met trots dit eindresultaat kan presenteren. Ook zou ik graag de andere proffen van het seminarie Circulair Bouwen willen bedanken voor het verbreden van mijn blik op architectuur. Ik werd namelijk enorm geprikkeld door de verschillende duurzaamheidsvraagstukken die zij mij voorschotelden. Op die manier hebben zij mee bijgedragen aan de ontwerper die ik ben en in de toekomst wil zijn.

Daarnaast wil ik ook mijn dank betuigen aan arch. Eef Boeckx en Prof. arch. Jo Berben voor hun vakkundige begeleidingen in de ontwerpstudio. Hun aanmoediging en positieve insteek deden mij plezier ervaren bij het tot stand brengen van mijn masterproject.

Tot slaat gaat mijn dank uit naar familie en vrienden. Zij hebben mij gedurende mijn opleiding steeds met warmte omringd. In het bijzonder zou ik mijn mama en zus willen bedanken voor de onvoorwaardelijke steun die ik steeds mocht ervaren. Bedankt voor alle kansen die ik kreeg!

Rune Lierman
14 mei, 2021

ABSTRACT

The current construction industry is associated with a high resource consumption that puts pressure on our planet. As the demand for raw materials will continue to increase in the future, the aim of this thesis is to gain insight into the circular potential of regenerative construction materials. By means of an exploratory literature study, it is investigated how raw materials can be applied cyclically as regenerative construction materials. The raw material 'straw' is used as a case study. From a closed loop approach, various issues, threats and opportunities are explored. These are bundled in a two-part critical reflection.

Before talking about the circular use of resources, this study defines the term 'regenerative construction materials'. This terminology is then considered in the context of a circular economy. A number of points of interest are formulated in the different phases that regenerative building materials go through in their raw material cycle.

In addition, straw is treated as a case in the context of Flanders. Straw is approached as a raw material, as a building material and as a regenerative construction material but also a critical cycle approach is not lacking.

Regenerative construction materials are defined as applications of renewable resources whose raw material cycle can be closed in a foreseeable time. These materials occupy a special position within the circular economy as they can be considered both technological and biological cycles. From a circular approach, there are important issues such as the impact of the agricultural sector, the privileged position of traditional building materials and the lack of knowledge in implementing regenerative building materials that deserve special attention.

Straw can also be applied as a regenerative building material in various ways. Straw bale construction, bundled straw strands, sheet materials and straw-based mycelium blocks are just a few examples. Again, there are a number of important concerns when approaching these applications of straw from their raw material cycle.

De huidige bouwsector gaat gepaard met een hoog grondstoffengebruik dat druk uitoefent op onze planeet. Aangezien de vraag naar grondstoffen in de toekomst nog zal stijgen, is het doel van deze scriptie om inzicht te krijgen in het circulair potentieel van regeneratieve bouwmaterialen. Door middel van een oriënterende literatuurstudie wordt er onderzocht hoe grondstoffen cyclisch kunnen worden toegepast als regeneratieve bouwmaterialen. De grondstof 'stro' wordt hierbij aangewend als case. Vanuit een kringloopbenadering worden er verschillende aandachtspunten, bedreigingen en kansen verkend. Deze worden gebundeld in een tweeledige kritische reflectie.

Alvorens het over een circulair grondstoffengebruik te hebben, wordt in dit onderzoek eerst het begrip 'regeneratieve bouwmaterialen' afgelijnd. Vervolgens wordt dit beschouwd in het kader van een circulaire economie. Een aantal aandachtspunten worden geformuleerd bij de verschillende fases die regeneratieve bouwmaterialen in hun grondstofkringloop doorlopen.

Daarnaast wordt stro als case in Vlaamse context behandeld. Stro wordt benaderd als grondstof, als bouw materiaal en als regeneratief bouw materiaal maar ook een kritische kringloopbenadering ontbreekt niet.

Regeneratieve bouwmaterialen worden gedefinieerd als toepassingen van hernieuwbare grondstoffen waarvan de grondstofkringloop in een overzienbare tijd gesloten kan worden. Deze materialen nemen een bijzondere positie in binnen de circulaire economie aangezien ze zowel tot de technologische als tot de biologische kringloop gerekend kunnen worden. Vanuit een kringloopbenadering zijn er belangrijke aandachtspunten zoals de impact van de landbouwsector, de bevoordeelde positie van traditionele bouwmaterialen en het gebrek aan kennis bij het implementeren van regeneratieve bouwmaterialen die bijzondere aandacht verdienen.

Ook stro kan op verschillende manieren toegepast worden als regeneratief bouw materiaal. Strobalenbouw, gebundelde strostrengen, plaatmaterialen en myceliumblokken op basis van stro zijn hier maar enkele voorbeelden van. Wederom zijn er een aantal belangrijke aandachtspunten wanneer men deze toepassingen van stro vanuit hun grondstofkringloop benadert.

INHOUD

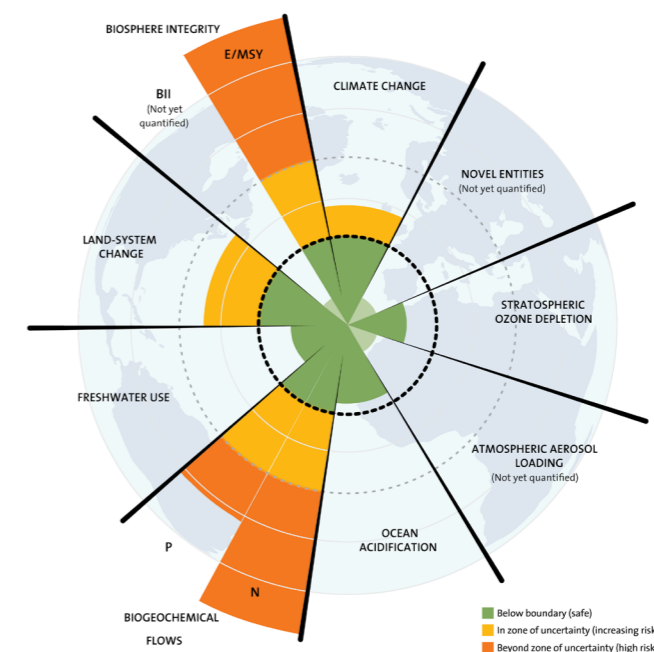
VOORWOORD		
ABSTRACT		
INTRODUCTIE	15	
PROBLEEMSTELLING	15	
DOELSTELLING	18	
ONDERZOEKSVRAAG	19	
Hoofdvraag		
Secundaire vragen		
ONDERZOEKSMETHODOLOGIE	20	
Oriënterende literatuurstudie		
Kritische reflectie		
Masterproject		
HOOFDSTUK 1	25	
1.1. REGENERATIE ALS CONCEPT	26	
Regeneratie in de natuur		
Regenerative design		
1.2. REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN	29	
Definiëring van regeneratieve bouwmaterialen		
Soorten regeneratieve bouwmaterialen		
Kenmerkende eigenschappen van regeneratieve bouwmaterialen		
Groeiperiode		
Opslag van CO ₂		
Biologische afbreekbaarheid		
HOOFDSTUK 2	39	
2.1. CIRCULAIRE ECONOMIE	40	
Cradle to cradle		
Vlinderdiagram		
2.2. REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN IN EEN CIRCULAIRE ECONOMIE	43	
Biologische en technologische kringloop		
Materialenhierarchie en cascade van waardebehoud		
2.3. GRONDSTOFKRINGLOOP VAN REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN	45	
Biogebaseerde waardeketen		
Kritische reflectie bij de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen		
Teelt		
Primaire raffinage		
Secundaire raffinage		
Eindproduct		
Afvalverwerking en logistiek		
HOOFDSTUK 3	59	
3.1. STRO ALS GRONDSTOF IN VLAANDEREN	60	
Akkerbouw in België en Vlaanderen		
Vlaamse afzetmarkt		
3.2. STRO ALS BOUWMATERIAAL	63	
Geschiedenis		
Toepassingen		
Verdichting d.m.v. Mechanische compressie		
Verdichting d.m.v. Micro-organismen		
Praktische toepassing en Constructieve detaillering		
3.3. STRO ALS REGENERATIEF BOUWMATERIAAL	70	
Kenmerkende eigenschappen van stro als regeneratief bouw materiaal		
Kritische reflectie bij de grondstofkringloop van stro als regeneratief bouw materiaal		
Teelt		
Primaire raffinage		
Secundaire raffinage		
Eindproduct		
Afvalverwerking en logistiek		
MASTERPROJECT		78
BIBLIOGRAFIE		84

INTRODUCTIE

PROBLEEMSTELLING

De toenemende druk op onze planeet verandert de wereld ingrijpend en vergroot risico's op instabiliteit in alle opzichten (Europese Commissie, 2018). Door Johan Rockström en Will Steffen werden negen planetaire grenzen gedefinieerd waarbinnen de mensheid kan gedijen. Het overschrijden van deze grenzen kan leiden tot abrupte, onomkeerbare veranderingen in het milieu (2009). Op figuur 1 worden deze grenzen schematisch voorgesteld. Uit de meest recente update van dit framework (Steffen et al., 2015) blijkt dat reeds 4 van deze grenzen overschreden zijn: De concentratie CO₂ heeft het maximum van 350 ppm overstegen waardoor het natuurlijk broeikaseffect wordt versterkt en het klimaat verandert. De oppervlakte beboste grond, die minstens 75% van de beboste grond vóór het ingrijpen van de mens zou moeten bedragen, daalt onder de 62% door landontginning voor grondstoffen, agrarische producten, uitbereiding van steden, etc. Reactief stikstof en fosfor die vervat zitten in kunstmest verzadigen niet alleen de landbouwgronden maar brengen ook het leven in rivieren, meren en oceanen in gevaar aangezien het de planetaire grens overschrijdt. Tot slot zorgt de afname van de biodiversiteit met zo'n 100 tot 1000 miljoen uitstervende soorten per jaar ervoor dat de veerkracht van ecosystemen vermindert en ze minder goed in staat zijn om grondstoffen te leveren en het leven in stand te houden.

De overige planetaire grenzen worden bepaald door de verzuring van de oceanen, de chemische vervuiling, de zoetwateronttrekking, de luchtvervuiling en de aantasting van de ozonlaag. De controlevariabelen van een aantal van deze grenzen werden nog niet gekwalificeerd. Een aantal andere grenzen stijgen dan weer en benaderen in sommige gevallen zelfs hun grenswaarde (Steffen et al., 2015). De grenzen zijn namelijk onderling afhankelijk: Het overschrijden van de ene kan ervoor zorgen dat ook de druk op andere grenzen toeneemt (Raworth, 2019).



Ook de bouwsector draagt bij aan het overschrijden van deze planetaire grenzen. Hoewel er de voorbije decennia reeds sterk gefocust werd op het verhogen van de energie-efficiëntie van het bestaand gebouwenpatrimonium, is de sector in Europa nog steeds verantwoordelijk voor 40% van de energievraag en voor de uitstoot van 36% van de totale hoeveelheid CO₂ (Ellen McArthur Foundation, 2015). De energie die nodig is om onderdelen te produceren en gebouwen te bouwen wordt steeds belangrijker nu de energieprestaties van gebouwen geoptimaliseerd worden (Cambier et al., 2019a).

Ook is het een sector die veel hulpbronnen vergt. De winning van grondstoffen zorgt voor biodiversiteitsverlies en waterstress en zet druk op de beschikbaarheid van de gronden en de uitputting van grondstoffen (Europese Commissie, 2019). Bovendien zorgt een stijgende wereldbevolking en toenemende populatie met een hoger inkomen ervoor dat de vraag naar grondstoffen wereldwijd nog zal toenemen (OECD, 2018).

Daarnaast blijkt uit een rapport van de Ellen McArthur Foundation (2015) dat 25 tot 30% van al het afval dat in de Europese Unie geproduceerd wordt, toe te schrijven is aan de bouwsector. Men springt dan ook zeer inefficiënt om met grondstoffen en materialen. Gedurende de bouwfase wordt reeds 10 tot 15% van de bouwmaterialen verspild (Ellen McArthur Foundation, 2015). Daarnaast wordt een gebouw gemiddeld al na 3 jaar aangepast en na 25 jaar volledig gerenoveerd door wijzigende normen en eisen. Hierdoor worden bepaalde materialen gesloopt voordat het einde van hun technische levensduur bereikt is (Cambier et al., 2019b). Afvalbeheer werd gedurende lange tijd gedomineerd door het lineaire "take-make-dispose"-model (Hebel et al., 2014). Hoewel Vlaanderen vandaag de dag met een recyclagegraad van 79% van het totale bedrijfsafval hoog scoort (OVAM, 2019), gaat het vaak om laagwaardige toepassingen (Cambier et al., 2019a). Betongranulaten worden bijvoorbeeld vaak gebruikt als funderingslaag in de wegenbouw. Dit zou echter beschouwd moeten worden als 'downcycling', aangezien het gerecycleerde materiaal niet opnieuw hoogwaardig kan worden toegepast zoals in het originele product (Vrijders & De Bock, 2019). Gesloopte bouwmaterialen bevatten vaak giftige elementen, bevestigingsmiddelen, verf- en lijmlagen, etc. die hoogwaardige recyclage in de weg staan (Ellen McArthur Foundation, 2015).

Een circulaire bouwsector vormt een alternatief. Volgens de principes van "Cradle to Cradle", die aan de basis liggen van de circulaire economie, kunnen materialen onderverdeeld worden in twee kringlopen (Hansen et al., 2013). De biologische kringloop bevat organische materialen die veilig kunnen terugkeren naar de natuur, aangezien ze biologisch afbreekbaar zijn. Deze materialen zijn regeneratief of nagroeibaar. De technische kringloop bevat minerale materialen die niet zomaar afgebroken kunnen worden. Hergebruik en recyclage, waarbij er maximaal wordt ingezet op hoogwaardige valorisatie, zijn bij deze materialen aan de orde. Zo kunnen negatieve gevolgen als de uitstoot van broeikasgassen, de schaarste aan grondstoffen en de productie van afval beperkt worden (Ellen McArthur Foundation, 2017).

Binnen het domein van circulair bouwen werd er vaak gefocust op het hergebruiken en recycleren van materialen uit de technische kringloop. Zo werden regeneratieve materialen bijvoorbeeld niet opgenomen in de tabel met uitdagingen die werd opgesteld door het Europees Milieuagentschap (Koster et al., 2020). Een onderzoek van het Economisch Instituut voor de Bouw (EIB), Metabolic en SGS

Search toont echter aan dat er veel meer materialen nodig zijn dan dat er vrijkomen bij sloop en vervanging. Hoewel het theoretische hergebruik van materialen uit de technische kringloop volgens de studie in de toekomst zal stijgen, zullen hergebruikte en gerecycleerde bouwmaterialen maar voor circa een derde kunnen voorzien in de totaal benodigde bouwmaterialen in 2030 (Arnoldussen et al., 2020).

Een onderzoek van Nibe in opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) wijst duurzaam beheerde biobased bronnen dan ook aan als een essentiële schakel bij de transitie naar een circulaire bouwsector. Aan de hand van verschillende cases werd het technisch potentieel van biobased bouwmaterialen onderzocht. Men stelde vast dat er een aanzienlijke potentie ligt bij deze materialen en dat er heel wat biobased alternatieven beschikbaar zijn voor traditionele bouwmaterialen. Onder andere stro wordt naar voren geschoven als alternatief isolatiemateriaal (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019). Bovendien werd stro ook opgenomen in de Catalogus Biobased Bouwmaterialen die werd opgesteld in opdracht van het Nederlands Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (Van Dam & Van den Oever, 2019). Ook in verschillende andere publicaties wordt stro vermeldt als alternatief voor bepaalde traditionele bouwmaterialen (BAS Bouwen, 2020; Chaussinand et al., 2015; Gernot & Friedemann, 2005; Ghaffar, 2020; Janssens & Alderweireldt, 2016; Post, 2013). Daar het een restproduct is uit de graanteelt dat ook in Vlaanderen lokaal voor handen is (Lamont, 2018), rijst de vraag wat het potentieel is van stro wanneer dit wordt toegepast als regeneratief bouwmaterialen.

DOELSTELLING

Zoals in de probleemstelling beschreven werd, gaat de huidige bouwsector gepaard met een hoog energieverbruik, een hoog grondstoffengebruik en een grote afvalproductie die in zekere zin druk uitoefenen op onze planeet (Cambier et al., 2019a). Door een stijgende wereldbevolking en een groeiende populatie met een hoger inkomen zal de vraag naar grondstoffen echter nog toenemen (OECD, 2018). Bovendien werd er aangetoond dat enkel het hergebruiken en recyclen van bouwmaterialen volgens de principes van de circulaire economie in de toekomst niet zal volstaan om te voldoen aan de totaal benodigde hoeveelheid bouwmaterialen (Arnoldussen et al., 2020).

Door Nibe werd reeds het technisch potentieel van biobased bouwmaterialen als alternatief voor traditionele bouwmaterialen onderzocht. Hieruit volgt dat er heel wat van deze materialen ter beschikking zijn die zowel een bijdrage kunnen leveren aan de transitie naar een circulaire economie alsook aan de klimaatdoelstellingen in verband met de hoeveelheid CO₂ (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019). In de studie van Van der Velde & Van Leeuwen (2019) verstaat men onder 'biobased' enkel nagroeibare bronnen die niet van minerale oorsprong zijn. Deze terminologie kan gerelateerd worden aan 'regeneratief', 'gecultiveerd', etc. maar kan, afhankelijk van de context, ietwat verschillen in betekenis (Hansen et al., 2013; Morseletto, 2020). In deze scriptie zal het begrip 'regeneratieve bouwmaterialen' gehanteerd worden. In eerste instantie zal er dan ook gestreefd worden naar een duidelijke begrenzing van deze terminologie.

Het eigenlijke doel van deze scriptie is om meer inzicht te krijgen in het circulair potentieel van regeneratieve bouwmaterialen. Vanuit een materiaalperspectief wordt er onderzocht hoe grondstoffen cyclisch kunnen worden toegepast als regeneratieve bouwmaterialen. In het bijzonder wordt de case van stro verkend. Het is de bedoeling om een aantal toepassingen van het stro als regeneratief bouw materiaal te identificeren en hier kritisch over te reflecteren vanuit de grondstofkringloop van stro.

ONDERZOEKSVRAAG

HOOFDVRAAG

De hoofdonderzoeksvraag van deze scriptie luidt als volgt:

“Wat is het circulaire potentieel van het regeneratieve bouw materiaal stro?”

SECUNDAIRE VRAGEN

In deze scriptie zal er geprobeerd worden de hoofdonderzoeksvraag te beantwoorden aan de hand van drie secundaire vragen. Deze vragen zullen elk in een apart hoofdstuk behandeld worden. De secundaire vragen luiden als volgt:

1. *Wat zijn regeneratieve bouwmaterialen?*
2. *Wat is het circulair potentieel van regeneratieve bouwmaterialen?*
3. *Hoe kan stro toegepast worden als regeneratief bouw materiaal?*

Deze secundaire vragen gaan wederom gepaard met een aantal sub-vragen die diepgang brengen en structuur geven aan de verschillende paragrafen van deze scriptie. Een overzicht van de onderzoeksvragen wordt schematisch weergegeven in figuur 2. Aan het begin van elk hoofdstuk worden deze sub-vragen steeds even kort herhaald.

Figuur 2: Overzicht onderzoeksvragen (eigen archief)

HOOFDSTUK 1	HOOFDSTUK 2	HOOFDSTUK 3
<i>“Wat zijn regeneratieve bouwmaterialen”</i>	<i>“Wat is het circulair potentieel van regeneratieve bouwmaterialen?”</i>	<i>“Hoe kan stro worden toegepast als regeneratief bouw materiaal?”</i>
Wat verstaat men onder 'regeneratie' als proces?	Wat zijn de principes van een circulaire economie?	Wat is stro en welke omvang heeft de productie hiervan in Vlaanderen?
Hoe kan men regeneratieve bouwmaterialen definiëren?	Hoe passen regeneratieve bouwmaterialen binnen deze principes?	Wat zijn de meest voorkomende toepassingen van stro in Vlaanderen?
Welke soorten regeneratieve bouwmaterialen zijn er?	Hoe kan men de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen conceptualiseren?	Hoe kan men stro toepassen als bouw materiaal?
Wat zijn kenmerkende eigenschappen van regeneratieve bouwmaterialen waarin ze verschillen van traditionele bouwmaterialen?		Waarom kunnen deze bouwmaterialen als regeneratief bestempeld worden?
<i>“Wat is het circulaire potentieel van het regeneratieve bouw materiaal stro?”</i>		

ONDERZOEKSMETHODOLOGIE

ORIËNTERENDE LITERAATUURSTUDIE

Er wordt getracht om op de verschillende onderzoeksvragen te antwoorden aan de hand van een oriënterende literatuurstudie. Hierbij wordt de thematiek van regeneratieve bouwmaterialen, circulariteit en stro eerder breed afgetast.

In het eerste hoofdstuk worden publicaties verkend van een aantal grondleggers van duurzaamheidstheorieën. Onder andere Regenerative Design for Sustainable Development van architect John Tillman Lyle (1994), Biomimicry van Janine Benyus (1997) en Cradle to Cradle: Remaking the way we make things van chemicus William McDonough en architect Michael Braungart (2002) worden gebruikt om meer inzicht te krijgen in het concept van regeneratie. Aan de hand van meer recente literatuur van onder andere Hebel & Heisel (2017) en Ronald Rovers (2018) wordt er vervolgens geprobeert om het begrip 'regeneratieve bouwmaterialen' te bevatten en te begrenzen. Dit wordt gestaafd met wetenschappelijke publicaties en meer sectorspecifieke literatuur van onder andere Vibe en Nibe die zich in Vlaanderen en Nederland bezighouden met duurzaam bouwen.

In hoofdstuk twee wordt het circulair potentieel van regeneratieve bouwmaterialen verkend aan de hand van de principes van Cradle to Cradle (McDonough & Braungart, 2002) maar ook aan de hand van de principes van een circulaire economie. De uitwerking hiervan is sinds de lancering in 2010 de core business van de Ellen MacArthur Foundation (EMF). Als partner van het World Economic Forum en met de uitgave van meer dan twintig toonaangevende boeken en artikels, kan dit zeker een expert genoemd worden betreffende circulariteit (World Economic Forum, 2020). In Vlaanderen geeft de Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) mee richting aan het beleid rond een circulaire economie. In tweede instantie wordt er onderzocht hoe grondstoffen cyclisch kunnen worden toegepast als regeneratief bouw materiaal aan de hand van rapporten die door OVAM werden opgesteld.

Tot slot wordt in het derde hoofdstuk de case van stro onderzocht aan de hand van uiteenlopende literatuur. Meer inzicht over stro als grondstof en het aandeel van stro in Vlaanderen wordt voornamelijk gezocht in publicaties van de Vlaamse overheid. Zo werden bijvoorbeeld de economische beschouwingen bij de graanteelt van 2017 door J.L. Lamont van het Departement Landbouw en Visserij en de publicatie over areaal en teeltdiversiteit van het Departement Omgeving (Vandevenne, 2019) onder de loep genomen. Voor bouwtechnische eigenschappen en toepassingen worden onder andere de boeken van Gernot & Friedemann (2005), Post (2013) en Hebel, Wisniewaska & Heisel (2014) aangewend als leidraad.

KRITISCHE REFLECTIE

Aan het einde van hoofdstuk twee en drie volgt er, na de literatuurstudie, een kritische reflectie. In deze reflectie worden verschillende inzichten die vergaard werden doorheen de scriptie aan elkaar gerelateerd en gestaafd met bijkomende literatuur. De vergaarde kennis wordt kritisch benaderd met in acht name van de grondstofkringloop van materialen. In hoofdstuk twee volgt een kritische reflectie aan de hand van de grondstofkringloop van regeneratieve materialen in het algemeen. In hoofdstuk drie wordt de grondstofkringloop van stro, toegepast als regeneratief bouw materiaal, kritisch onder de loep genomen. Er worden een aantal suggesties gedaan ter verbetering van deze kringloop opdat negatieve externe effecten verminderd kunnen worden. Deze vereisen echter nog bijkomend onderzoek en zijn voor discussie vatbaar.

MASTERPROJECT

Tot slot worden er een aantal inzichten uit deze scriptie gebundeld die aan de basis liggen van het masterproject dat werd uitgewerkt in kader van de ontwerpstudie

HOOFDSTUK 1

“Wat zijn regeneratieve bouwmaterialen?” Dat is de vraag die in dit hoofdstuk centraal staat. Om meer inzicht te krijgen in de achtergrond en de oorsprong van regeneratie als proces worden verschillende publicaties van onder andere John Tillman Lyle (1994), Janine Benyus (1997) en William McDonough & Michael Braungart (2002) geraadpleegd. Vervolgens wordt er op zoek gegaan naar een definiëring voor regeneratieve bouwmaterialen. Hiervoor wordt de meer recente publicatie Gebroken Kringlopen van Ronald Rovers (2018) geraadpleegd. Eens de terminologie van regeneratieve bouwmaterialen duidelijk begrepen is, wordt er onderzocht welke soorten regeneratieve bouwmaterialen er zijn. Een aantal andere begrippen zoals ‘biobased’, ‘hergroeibaar’, ‘gecultiveerd’, ‘gekweekt’, etc. worden in de literatuur namelijk gebruikt in de context van regeneratie maar hebben daarom niet altijd dezelfde betekenis. Daarnaast wordt er ook op zoek gegaan naar kenmerkende eigenschappen van regeneratieve bouwmaterialen waarin deze verschillen van traditionele bouwmaterialen.

De paragrafen van dit hoofdstuk worden gestructureerd aan de hand van onderstaande sub-onderzoeksvragen:

- Wat verstaat men onder ‘regeneratie’ als proces?
- Hoe kan men regeneratieve bouwmaterialen definiëren?
- Welke soorten regeneratieve bouwmaterialen zijn er?
- Wat zijn kenmerkende eigenschappen van regeneratieve bouwmaterialen waarin ze verschillen van traditionele bouwmaterialen?

1.1. REGENERATIE ALS CONCEPT

1.1.1. REGENERATIE IN DE NATUUR

Alvorens het over materialen of specifieke toepassingen in de bouwsector te hebben, wordt eerst het concept van "regeneratie" in brede zin verkend. Het werkwoord "regenereren" stamt af van het Latijn: Het voorvoegsel "re-" wijst op een herhaling en "genereren" komt van generare wat zoveel betekent als "voortbrengen" (Morseletto, 2020).

Wanneer men het werkwoord opzoekt in het Groot Woordenboek van de Nederlandse taal, wordt het gelinkt aan definiëringen uit wetenschappelijke vakgebieden. In biologische context betekent het zoveel als "het weer aangroeien of ontstaan van beschadigde, weggenomen, verloren gegane organen of organismen" (Den Boon et al., 2015). De "Regeneratieve Biologie" wordt beschouwd als een van de oudste vakgebieden van de biologische wetenschappen. Een breed spectrum aan natuurlijke fenomenen die in hun werking vaak erg grote verschillen vertonen, zijn doorheen de jaren in dit vakgebied ondergebracht. Een klassiek voorbeeld van regeneratie bij dieren is het terug aangroeien van een geamputeerd ledemaat bij amfibieën. Daarnaast wordt bijvoorbeeld ook de omzetcyclus van cellen in de opperhuid van zoogdieren beschouwd als een regeneratief proces (Carlson, 2007). Ook bij planten herkennen we verschillende vormen van regeneratie. Naast het herstellen van organen of van beschadigd weefsel zijn zij, in tegenstelling tot dieren, ook in staat tot het vormen van volledig nieuwe soortgenoten (Galliot, 2014).

Wat elk van deze fenomenen gemeenschappelijk hebben, is dat ze gekoppeld zijn aan een groeiproces of herstelcyclus die inherent deel uitmaakt van de overlevingsstrategie van planten en dieren. Doorheen 3,8 biljoen jaar aan evolutie zijn zij erin geslaagd om dit op zo'n manier te doen dat niet alleen hun eigen voortbestaan verzekerd wordt, maar dat dit proces ook het ecosysteem verrijkt en de verschillende levenwekkende systemen van de aarde ondersteunen (Benyus, 1997).

Chemicus William McDonough en architect Michael Braungart (2002) beschrijven dit levenwekkende groeiprincept aan de hand van een kersenboom:

Tijdens haar groei creëert de kersenboom bloesems die op hun beurt uitgroeien tot kersen. Wanneer zo'n kers op de grond belandt, wordt het vruchtvlees door verschillende micro-organismen afgebroken. De pit zakt in de bodem en onder de juiste omstandigheden schiet deze wortel en groeit hij opnieuw uit tot een volwaardige kersenboom. Zo kan men dus spreken van regeneratie.

Maar, de kersenboom produceert niet één maar duizenden bloesems. Deze groeien uit tot fruit dat in eerste instantie voedsel oplevert voor zowel vogels als mensen en andere dieren. Vervolgens, wanneer de kersen worden afgebroken, kunnen ook insecten en micro-organismen profiteren van hun voedingsstoffen.

Niet alleen de kersen maar ook de boom zelf zet een reeks positieve neveneffecten in gang. Hij verrijkt het ecosysteem door CO₂ op te slaan, zuurstof te produceren, lucht en water te reinigen en de bodem te stabiliseren. Tussen zijn wortels en takken en op zijn bladeren herbergt de kersenboom een uiteenlopende variatie

aan fauna en flora die allemaal weer van elkaar afhankelijk zijn en elkaars voortbestaan ondersteunen. Wanneer de boom sterft, keert hij terug naar de bodem. Ook bij dit proces komen mineralen vrij die gezonde, nieuwe groei op dezelfde plek kunnen verzekeren.

Dit voorbeeld geeft duidelijk weer hoe het concept van regeneratie zich uit in de natuur. De bouwstenen van het leven worden continu hernieuwd. Dit gebeurt op een genereuze manier waarbij verschillende organismen en levenwekkende systemen elkaar op meerdere manieren ondersteunen.

1.1.2. REGENERATIVE DESIGN

Ondanks het feit dat wij als mensen dezelfde fysieke uitdagingen krijgen als alle andere organismen -de strijd om voedsel, water, ruimte en onderdak- doorbreken wij dit natuurlijke proces: Natuurlijke hulpbronnen worden uitgeput en te veel afval dat niet biologisch afbreekbaar is, wordt teruggestort in de natuur (McDonough & Braungart, 2002). De vraag rijst of ook de mens haar problemen kan oplossen door het oorspronkelijke concept van regeneratie terug te omarmen en het sluiten van grondstofkringlopen centraal te stellen.

Janine Benyus wees in 1997 al op het potentieel om natuurlijke processen te bestuderen en hieruit inspiratie te halen om menselijke problemen op te lossen. In haar boek Biomimicry pleit ze ervoor om de natuur te gaan zien als model, maatstaf en mentor. De natuur heeft ten slotte al heel wat problemen opgelost waar de mensheid tot op de dag van vandaag nog mee worstelt. De uitdaging voor ons als mensen ligt erin om de natuurlijke systemen hierachter te bestuderen en te imiteren, de natuur te gebruiken als norm om onze duurzame innovaties aan te toetsen en bovendien de natuurlijke wereld op een respectvolle manier te benaderen als bondgenoot.

Deze holistische benadering van mens en natuur heeft ook in het duurzaamheidsdebat en in de ontwerpwereld reeds haar intrede gedaan als reactie op het voorgaande duurzaamheidsideaal. Zoals ook in de probleemstelling reeds aan bod kwam, werd er de afgelopen jaren erg gefocust op het verhogen van de energie- en materialenefficiëntie van producten (Ellen McArthur Foundation, 2015). Dit traditionele duurzaamheidsparadigma wordt beschreven als 'Eco-Efficiëntie' (du Plessis, 2012). Aangezien producten hierdoor slechts een fractie van de energie en de materialen nodig hebben in vergelijking met eerdere varianten, resulteerde dit in een prijsdaling die technologie voor veel meer mensen toegankelijk heeft gemaakt. Als gevolg van het stijgen van de collectieve vraag nam echter ook de doorvoer van materialen en energie toe waardoor materiaalstromen van product tot afval versnelde (Hansen et al., 2013). Bovendien werd door het gemak van afvalinzameling en het vertrouwen in bestaande recyclingprocessen de focus verschoven van het verminderen van afval naar het consumeren van producten. Veel van de dagelijkse producten zijn vanwege hun samenstelling echter niet ontworpen om gerecycleerd te worden (Hebel et al., 2014).

Aangezien de duurzaamheidsaanpak gebaseerd op efficiëntie, faalde om de milieueffecten van producten en gebouwen te verminderen, deed een nieuw paradigma, gebaseerd op onder andere theorieën van Benyus en McDonough &

Braungart, haar intrede: 'Regenerative design' (Attia, 2016; Hansen et al., 2013). Dit model kwam in een stroomversnelling door de vooruitstrevende ideeën van de architect John Tillman Lyle (1994) die pleitte voor een interdisciplinaire samenwerking tussen architectuur, landschapsecologie, ruimtelijke ordening, permacultuur en landbouw. Later evolueerde dit naar een nog veel breder spectrum en werden ook sociale en culturele aspecten betrokken (du Plessis, 2012). Lyle stelde dat het mogelijk was om gebouwen en steden op een genereuze manier te ontwikkelen zodat verloren gegane ecosystemen hersteld werden. Vanuit deze invalshoek werd ook 'Positive Impact Architecture' gedefinieerd dat streeft naar een gebouwde omgeving binnen de grenzen van beschikbare hernieuwbare bronnen en zonder aantasting van het milieu (Attia, 2018).

1.2. REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN

1.2.1. DEFINIËRING VAN REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN

Met het concept van regeneratie en de intrede van 'Regenerative design' en 'Positive Impact Architecture' in het achterhoofd, wordt er in deze paragraaf op zoek gegaan naar een definitie voor regeneratieve bouwmaterialen. In principe zijn alle materialen hernieuwbaar. Dat toont Ronald Rovers aan in zijn boek Gebroken Kringlopen (2018). Ook bij metalen en mineralen, die vaak benoemd worden als 'eindige grondstoffen', worden bouwstenen hernieuwd. Onderstaand voorbeeld van het metaal ijzer maakt dit duidelijk.

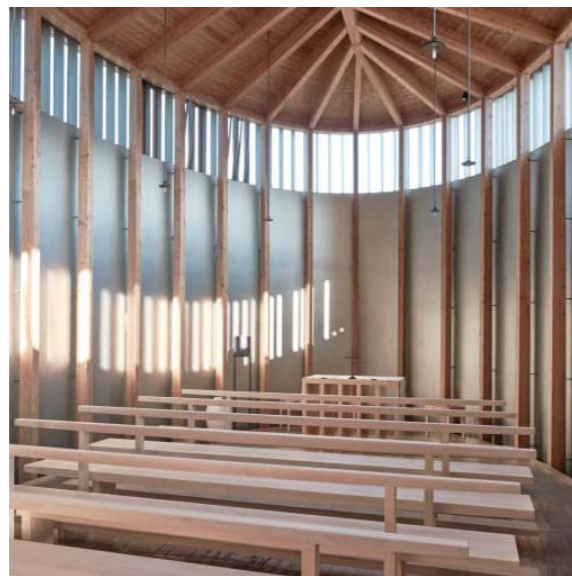
Ijzer erodeert en roest, verdwijnt in de bodem, en via grondwater en rivieren komt het in zee. Een van de vervolgroutes daar is dat bacteriën over lange tijd de metaalionen weer binden tot mangaanknollen (vuistdikke 'stenen' van diverse metalen) die weer geoogst kunnen worden (zoals de Japanners nu proberen). Of die knollen verdwijnen door tektoniek weer in de aardkorst, en komen op andere plaatsen (ooit) weer, via tektoniek of vulkanisme, als ijzerafzettingen (geconcentreerde ijzermoleculen) beschikbaar aan het oppervlak (Rovers, 2018, p. 39).

Rovers wijst in zijn boek erop dat het verschil tussen het regeneratieve proces van bijvoorbeeld de kersenboom (organisch) en het hernieuwen van ijzermoleculen (anorganisch) de tijd is waarbinnen de grondstoffen hernieuwd worden. Daar waar een kersenboom ieder jaar vruchten draagt, duurt het miljoenen en soms miljarden jaren alvorens de voorraad ijzerionen terug hersteld wordt en de natuurlijke kringloop gesloten wordt.

Er kan dus geconcludeerd worden dat regeneratieve materialen toepassingen zijn van grondstoffen waarvan de kringloop in een overzienbare tijd gesloten kan worden. 'Overzienbaar' slaat hierbij terug op een relatief korte periode die door de mens kan waargenomen worden (Rovers, 2018). Volgens het concept van regeneratie dat in de eerste paragraaf behandeld werd, kunnen de bouwstenen van regeneratieve materialen op een veilige manier terugkeren naar de natuur. Op die manier kan de oorspronkelijke voorraad aan bouwstenen hersteld worden en ondersteunen deze materialen de levenwekkende systemen van de planeet. Volgens deze definitie kunnen regeneratieve bouwmaterialen dan beschouwd worden als regeneratieve materialen die doorheen hun grondstofkringloop toegepast worden in de bouwsector.

1.2.2. SOORTEN REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN

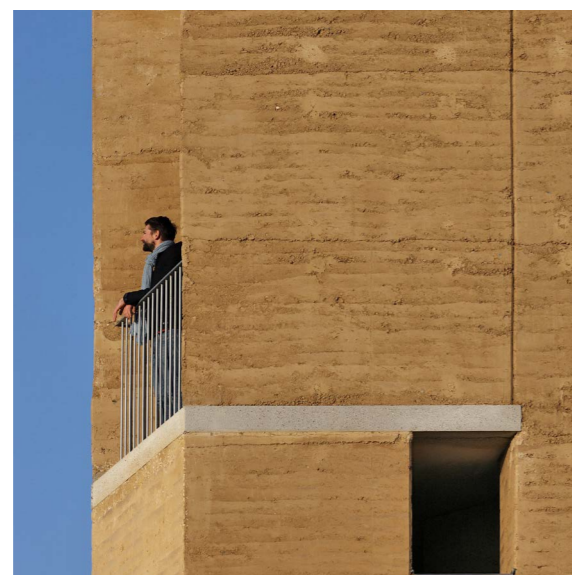
In de literatuur zijn er heel wat voorbeelden van regeneratieve bouwmaterialen terug te vinden die aansluiten bij de definitie die in deze scriptie gehanteerd wordt. Deze worden echter niet altijd letterlijk als 'regeneratief' benoemd. Heel wat andere begrippen als 'biobased', 'hergroeibaar', 'gecultiveerd', 'gekweekt', etc. worden gebruikt om deze bouwmaterialen te omschrijven. Hoewel deze materialen vaak wel



Figuur 3: Saint Benedict Chapel by Peter Zumthor (Fisher, 2018)



Figuur 4: The Growing Pavilion by Pascal Leboucq (Vinck, 2019)



Figuur 5: Rammed-earth Tower by De Gouden Lineaal Architecten (Dujardin, 2017)

als regeneratief beschouwd kunnen worden, zijn er onderling verschillen op te merken. In deze paragraaf worden de verschillende benamingen uit een aantal publicaties gegroepeerd om zo meer inzicht te krijgen in de verschillende soorten regeneratieve bouwmaterialen.

De eerste groep regeneratieve bouwmaterialen die men kan onderscheiden, wordt in de publicaties van Van der Velde & Van Leeuwen (2019, 2021) beschreven als 'biobased bouwmaterialen'. In hun onderzoek wordt er gedoeld op nagroeibare bronnen die niet van minerale oorsprong zijn. Rovers heeft het in zijn publicatie over 'hergroeibaren' (2018) en verwijst hier ook mee naar organische of biotische grondstoffen. In het boek van Hebel & Heisel (2017) wordt er dan weer gesproken van 'gecultiveerde bouwmaterialen'. Volgens de laatste sluit deze groep regeneratieve bouwmaterialen aan bij de traditionele landbouw en bosbouw. Hier kunnen er op twee verschillende manieren potentiële grondstoffen geleverd worden voor regeneratieve bouwmaterialen. Zo kunnen bepaalde grondstoffen in de eerste plaats als hoofdproduct geteeld worden voor bijvoorbeeld hun vezels. Hout is hier de bekendste toepassing van en wordt weergegeven in figuur 3. Ook bestaat er het potentieel om een grote verscheidenheid aan landbouw-bijproducten, die soms als afval worden gezien, te implementeren in de bouwsector. Stro, de case die later in deze scriptie besproken wordt, bestaat uit de droge stengels van graanplanten en is dus een restmateriaal uit de landbouw (Post, 2013).

Hebel & Heisel (2017) beschrijven naast de 'gecultiveerde bouwmaterialen' ook de 'gekweekte bouwmaterialen'. Deze materialen zijn ook organisch van oorsprong maar hun productieproces is gebaseerd op de werking van micro-organismen. Schimmels zijn namelijk in staat om cellulose, lignine en andere suikers van vezelrijke materialen af te breken en deze moleculen vervolgens te herschikken in hun eigen biomassa om te groeien. Zo wordt er een dicht netwerk van myceliumdraden gevormd die het potentieel hebben om in gedroogde vorm te worden ingezet in tal van producten waaronder ook toepassingen in de bouw (Janssens et al., 2017). In figuur 4 wordt een project met mycelium weergegeven. Deze soort bouwmaterialen wordt niet geteeld in aarde en is bijgevolg ook minder plaats afhankelijk. Ze kunnen groeien waar nodig, in eender welke vorm en zelfs in een bestaand donorgebouw (Hebel & Heisel, 2017). Ook hier onderscheiden zich weer twee subcategorieën: de composieten, waarbij het omzettingproces van organisch substraat naar schimmel wordt stopgezet alvorens het volledige substraat is afgebroken, en de pure schimmelmateriaal waarbij het organisch substraat volledig wordt afgebroken (Meyer et al., 2020). Het kweken van bouwmaterialen uit mycelium is echter nog een vrij nieuwe techniek die nog heel wat onderzoek vereist (Janssens et al., 2017).

Daarnaast kan men nog een derde groep regeneratieve bouwmaterialen onderscheiden waarvan de grondstoffen niet van organische oorsprong zijn maar wel als regeneratief beschouwd kunnen worden. Zo kunnen de bouwstenen van ongebakken aarde -toegepast onder de vorm van rammed earth zoals op figuur 5 maar ook als leempleisters, bouwblokken, etc.- veilig terugkeren naar de natuur en zo in een overzienbare tijdspanne een gesloten kringloop bekomen (VIBE, 2019a). Ook schelpen zijn van anorganische oorsprong. Toch kunnen ze als nagroeibaar beschouwd worden omdat weekdieren jaarlijks een massa schelpen produceren (VIBE, 2019b).

Schelpen kunnen worden toegepast als bijvoorbeeld isolatie of als vochtwering onder gebouwen (Van Dam & Van den Oever, 2019).

Ook onderscheiden we materialen die in hun toepassing geassocieerd kunnen worden met 'Regenerative Design' of 'Low Impact Architecture' maar daarom niet rechtstreeks gecategoriseerd kunnen worden als regeneratieve bouwmaterialen. Zo zijn er de 'bio-inspired materials' die in staat zijn om -net als organismen- hun gedrag aan te passen aan veranderende omgevingsinvloeden. Op die manier kunnen deze materialen reageren op gebruikers en locatie en kunnen ze zo een bredere relatie aangaan met ecosystemen. Ze sluiten nauw aan bij Biomimicry, waarbij natuurlijke fenomenen worden vermenigvuldigd binnen een gecontroleerde omgeving die wordt bepaald door ontwerpparameters. Ook laten deze materialen het toe om de gebouwde omgeving meer interdisciplinair te benaderen. Zo heeft het internationale ingenieursbedrijf Arup in 2013 het BIQ House in Hamburg, Duitsland gebouwd met een algengevel die dienst doet als een vorm van microlandbouw. Daarnaast werd er in het gebouw energie bespaard door de thermische werking van de algenbiomassa (Hebel & Heisel, 2017).

1.2.3. KENMERKENDE EIGENSCHAPPEN VAN REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN

In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk worden een aantal kenmerkende eigenschappen van regeneratieve bouwmaterialen verkend. Hierbij wordt er gefocust op materialen van organische oorsprong aangezien de case die later in deze scriptie besproken wordt ook tot deze groep behoort. Regeneratieve bouwmaterialen die niet van organische oorsprong zijn zoals ongebakken aarde en schelpen worden buiten beschouwing gelaten. De groeiperiode, de opslag van CO₂ en de biologische afbreekbaarheid worden onderzocht.

1.2.3.1. Groeiperiode

Regeneratieve, organische materialen gaan gepaard met een zekere groeiperiode. Zoals in de publicatie van Hebel & Heisel (2017) werd aangetoond, kan de groei van deze materialen gerelateerd worden aan de land- of bosbouw. Doordat de voorraad bouwstenen van regeneratieve, organische materialen in een veel kortere tijdspanne terug aangevuld kan worden, vormt dit een belangrijk voordeel in vergelijking met traditionele bouwmaterialen.

'Gecultiveerde bouwmaterialen' hebben een uiteenlopende groeiperiode. Lorkenhout, één van de hardste en duurzaamste Europese naalddoelsoorten geschikt voor houtconstructies (Hout Info Bois, 2021), heeft een groeiperiode van gemiddeld 60 jaar wanneer zowel de economische winstmarge, de houtproductie en de opslag van CO₂ geoptimaliseerd worden (Peng et al., 2018). Gezien de urgentie van de klimaatproblematiek (Rockström et al., 2009) en de ambitie van de Europese Unie om klimaatneutraal te zijn tegen 2050 (Europese Commissie, 2018) is dit best lang. Stro daarentegen is een restproduct van graan dat elk jaar 4,5 ton per hectare geogste oppervlakte oplevert (Post, 2013).

'Gekweekte bouwmaterialen' daarentegen hebben een veel kortere groeiperiode. De vorming van mycelium in een mal duurt slechts zo'n 20 tot 30 dagen (Janssens et al., 2017).

1.2.3.2. Opslag van CO₂

Dit aspect van regeneratieve, organische materialen hangt vast aan de natuurlijke koolstofcyclus. Planten fixeren namelijk CO₂ uit de atmosfeer en zetten dit via fotosynthese om naar organische koolstof ter bevordering van hun groei en energievoorziening. Dit aangegroeide weefsel omvat materiaal met een korte levensduur (vb.: bladeren, fijne wortels) en weefsel dat veel langer meegaat (vb.: houtachtig materiaal). Wanneer plantenmateriaal afsterft en op de grond terecht komt, breken micro-organismen dit geleidelijk af om opnieuw te voorzien in de groei van hun eigen biomassa en andere activiteiten. Dit is een traag proces waardoor het dode plantenmateriaal eerst gedurende een lange periode in de bodem opgeslagen wordt. Tijdens de omzetting van CO₂ naar organisch koolstof bij planten én bij de afbraak van dood plantenmateriaal door micro-organismen komt er opnieuw CO₂ in de atmosfeer terecht via plant- en microbiële ademhaling (Yiqi & Zhou, 2006).

Deze cyclus ligt aan de basis van de levenwekkende processen van de aarde. Bij het ontstaan van de planeet was de atmosfeer namelijk vergeven van de CO₂. Het vastleggen ervan in zowel organisch materiaal van planten als in de bodem heeft leven op aarde mogelijk gemaakt. De mens heeft deze natuurlijke cyclus echter verstoord. De CO₂ die gefixeerd was in ondergrondse opslagvelden (vb.: olie, gas en kolen) wordt terug opgegraven en verbrandt waardoor er een bijkomende hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer terecht komt die het klimaat verandert (Rovers, 2018, p. 27).

Regeneratieve bouwmaterialen van organische oorsprong werken de natuurlijke koolstofcyclus in de hand. Ze zijn in staat om CO₂ te fixeren en hebben hierdoor netto een negatieve CO₂-emissie waarde zolang het materiaal in gebruik is en mits de energie die nodig is voor de productie ook volledig hernieuwbaar is (Van Dam & Van den Oever, 2019). Deze opgeslagen hoeveelheid CO₂ wordt ook wel het biogene CO₂ van materialen genoemd (Attia, 2016). Bij de 'gecultiveerde bouwmaterialen' gaat het om de CO₂ die wordt opgeslagen in de houtachtige vezels. Ook bij 'gekweekte bouwmaterialen' wordt er een bepaalde hoeveelheid CO₂ opgeslagen aangezien dit veelal composieten zijn die ook deels uit organische vezels bestaan (Elsacker, Peeters, et al., 2019).

1.2.3.3. Biologische afbreekbaarheid

Zoals het concept van regeneratie heeft aangetoond, vormt het sluiten van grondstoffenkringlopen de basis voor de levenwekkende systemen op onze planeet. Wanneer regeneratieve materialen louter uit organisch materiaal zijn opgebouwd, kunnen ze door micro-organismen worden afgebroken. Daardoor kunnen de essentiële elementen waaruit ze zijn samengesteld (vb.: stikstof, fosfor, zwavel, etc.), hergebruikt worden door andere organismen (Gougoulas et al., 2014) en dragen ze uiteindelijk bij aan de groei van nieuwe materialen.

Het is dus van belang om in de verschillende fasen van de grondstofkringloop erover te waken dat de biologische afbreekbaarheid van regeneratieve bouwmaterialen

aan het einde van hun levensfase gewaarborgd blijft. Bepaalde additieven of behandelingen kunnen er namelijk voor zorgen dat dit in het gedrang komt (Hansen et al., 2013).

HOOFDSTUK 2

In het eerste hoofdstuk werd er onderzocht wat regeneratieve bouwmaterialen zijn. Nu dit begrip duidelijk begrepen is, kan er op zoek gegaan worden naar het circulair potentieel van deze materialen. De onderzoeksvraag die in dit hoofdstuk centraal staat, luidt: "Wat is het circulair potentieel van regeneratieve bouwmaterialen?" Er wordt met andere woorden vanuit een materiaalperspectief onderzocht hoe grondstoffen cyclisch kunnen worden toegepast als regeneratieve bouwmaterialen. Hiervoor wordt er in eerste instantie onderzoek gedaan naar de principes van een circulaire economie. Het framework van Cradle to Cradle (McDonough & Braungart, 2002) en het vlinderdiagram van de Ellen MacArthur Foundation (2015) worden gebruikt als leidraad. Eens duidelijk is wat men verstaat onder circulariteit, wordt er onderzocht hoe regeneratieve bouwmaterialen hieraan gerelateerd kunnen worden. Aan de hand van het Vlaamse beleid rond een circulaire economie wordt er gezocht naar een manier om de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen te conceptualiseren. Hiervoor worden de publicaties van de Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) geraadpleegd. De onderzoeksvragen die de literatuurstudie van dit hoofdstuk structureren zijn:

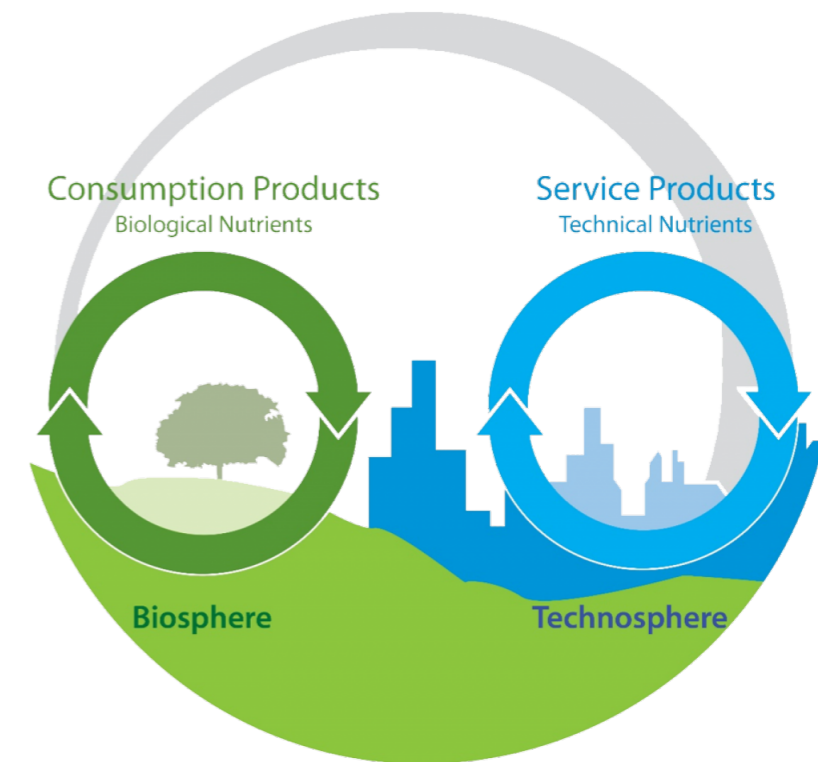
- *Wat zijn de principes van een circulaire economie?*
- *Hoe passen regeneratieve bouwmaterialen binnen deze principes?*
- *Hoe kan men de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen conceptualiseren?*

Tot slot volgt er een kritische reflectie aan de hand van de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen. De aandachtspunten, bedreigingen en kansen met betrekking tot de circulariteit van regeneratieve bouwmaterialen worden hierin verkend.

2.1 CIRCULAIRE ECONOMIE

2.1.1. CRADLE TO CRADLE

De principes van de circulaire economie (CE) zijn gerelateerd aan publicaties van Janine Benyus (1997) en Michael Braungart & William McDonough (2002) die reeds eerder in deze scriptie aan bod kwamen. Braungart & McDonough beschrijven in hun boek *Cradle to Cradle: Remaking the way we make things* een alternatieve benadering voor het Cradle to Grave-principe ("van wieg tot graf") dat samengaat met de schadelijke wegwerpcultuur van de lineaire economie. Ze stellen dat door materialen en producten net zoals in de natuur te benaderen vanuit kringlopen, er een metabolisme kan ontstaan waarbij het "afval" van het ene proces kan fungeren als "voedsel" voor het andere. In figuur 6 wordt dit schematisch voorgesteld. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen twee kringlopen waarin elk product en proces kan ondergebracht worden. Tot de biologische kringloop ("de Biosfeer") behoren de materialen die veilig kunnen degraderen en terugkeren naar de natuur. Deze materialen zijn met andere woorden biologisch afbreekbaar door micro-organismen in de bodem en door andere dieren. Daarnaast onderscheiden we de technologische kringloop ("de Technosfeer"). Hiertoe behoren materialen die via industriële processen werden vormgegeven om een dienst te leveren (McDonough & Braungart, 2002). De bouwstenen van deze materialen dienen steeds hergebruikt en gerecycleerd te worden (Hansen et al., 2013)

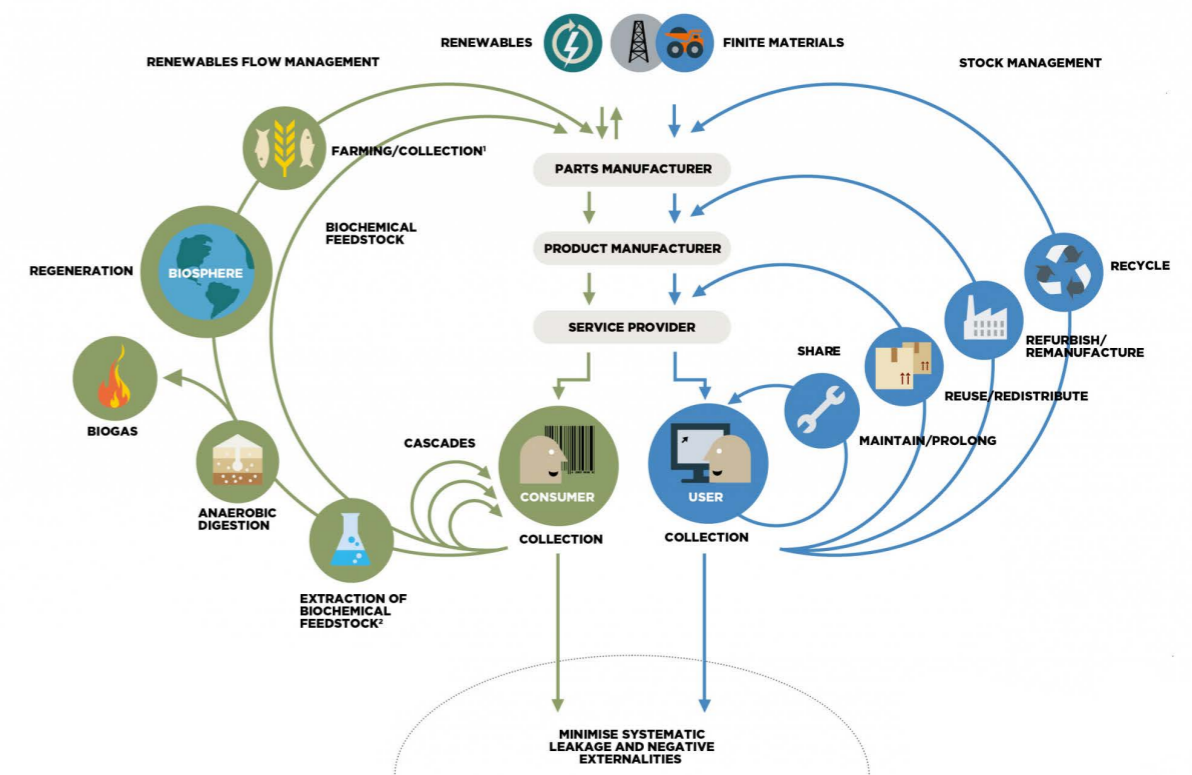


Figuur 6: Cradle to Cradle (EPEA, 2009)

2.1.2. VLINDERDIAGRAM

Het framework voor een CE van de Ellen MacArthur Foundation (EMF) is gebaseerd op het Cradle to Cradle-principe van Braungart & McDonough. Ook hier spreekt men van een biologische cyclus voor de hernieuwbare materialen en een technologische cyclus voor de eindige materialen. Het framework is gebaseerd op drie voorname principes. Deze werden door EMF schematisch weergegeven in het 'vlinderdiagram' dat wordt weergegeven op figuur 7.

Ten eerste moeten natuurlijke systemen hersteld worden. Door de focus te leggen op hernieuwbare energiebronnen en grondstoffen, krijgen kwetsbare ecosystemen de kans om te recupereren. Daarnaast moet ook het gebruik van eindige bronnen in kaart gebracht worden en herleid worden tot het minimum. Het tweede principe stelt dat de waarde van grondstoffen en hun toepassing steeds zo hoog mogelijk moet blijven zodat deze opnieuw kunnen worden ingezet in de vorm van kringlopen. De levensduur van producten speelt hierbij een belangrijke rol. Zo dient een product benaderd te worden met het oog op herstel, renovatie, hergebruik en ontmanteling. Op die manier kan men zowel een biologische als een technologische kringloop bekomen waarbij producten en hun componenten steeds opnieuw kunnen worden ingezet met een minimum aan afval. Het laatste principe bestaat uit het stimuleren van de effectiviteit van die kringlopen. Negatieve gevolgen zoals afval en vervuiling dienen ook in kaart gebracht en geëlimineerd te worden (Ellen MacArthur Foundation, 2015).



Figuur 7: The Butterfly Diagram (Ellen MacArthur Foundation, 2015)




Een CE valt niet alleen te linken met theorieën over Biomimicry en Cradle to Cradle maar ook met heel wat andere economische modellen. Een voorbeeld hiervan is de Blauwe Economie beschreven door Gunter Pauli (2010). Ook de Bio-based Economy wordt opgevat als een integraal onderdeel van de CE of als een kans om de ontwikkelingen hiervan te ondersteunen. De Bio-based Economy kan gedefinieerd worden als de transitie van een economie die grotendeels gebaseerd is op eindige bronnen naar een meer grondstofefficiënte economie gebaseerd op hernieuwbare bronnen die geproduceerd worden door het duurzame gebruik van ecosysteemdiensten (Bennich & Belyazid, 2017).

2.2. REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN IN EEN CIRCULAIRE ECONOMIE

2.2.1. BIOLOGISCHE EN TECHNOLOGISCHE KRINGLOOP

Aangezien de bouwstenen van regeneratieve constructiematerialen op een veilige manier kunnen terugkeren naar de natuur, kan men besluiten dat deze materialen in oorsprong behoren tot de biologische kringloop van de CE (Koster et al., 2020). Braungart & McDonough stellen dat in de ontwerpfase bijzondere aandacht moet worden besteed opdat elementen uit de twee kringlopen niet met elkaar vermengd worden (2002). Aan regeneratieve bouwmaterialen die circuleren in de biologische kringloop mogen dus geen giftige, kankerverwekkende, mutagene of moeilijk afbreekbare stoffen worden toegevoegd die schadelijke effecten kunnen teweegbrengen in ecosystemen. Daarnaast mogen er ook geen biologische grondstoffen worden toegevoegd aan materialen die circuleren in de technische kringloop, aangezien het terugkeren van die grondstoffen naar de natuur dan bemoeilijkt wordt. Ook kunnen biologische materialen de kwaliteit van technische materialen verzwakken of kunnen ze het moeilijker maken om deze materialen te hergebruiken en te recyclen (McDonough & Braungart, 2002). In werkelijkheid zien we dat heel wat biologische en technische materialen met elkaar vermengd worden. Een goed voorbeeld hiervan is rioolslib. In zuivere vorm zou dit behoren tot de biologische kringloop en zou het kunnen fungeren als meststof. Maar doordat het slib vermengd wordt met allerlei chemische reinigingsmiddelen en cosmetica is het schadelijk voor de ondergrond en kan het niet terugkeren naar de natuur (Janssens, 2017).

Hoewel regeneratieve bouwmaterialen in oorsprong behoren tot de biologische kringloop, kunnen ze ook op een technische manier hergebruikt en gerecycleerd worden (Koster et al., 2020). Houten producten dienen bijvoorbeeld -aangezien hout een beperkt beschikbare grondstof is die langdurig koolstof kan opslaan- eerst hersteld, hergebruikt en hoogwaardig gerecycleerd te worden alvorens het bijvoorbeeld naar de natuur terugkeert in de vorm van houtsnippers (Braekevelt et al., 2020). Regeneratieve bouwmaterialen nemen dus een speciale positie in binnen de CE en vragen al in de ontwerpfase bijzondere aandacht opdat het op een positieve manier bijdraagt aan zowel de biologische als de technologische kringloop. In Vlaanderen zijn er reeds een aantal instellingen die ontwerprichtlijnen geformuleerd hebben om veranderingsgericht te bouwen en materialen en componenten effectiever te hergebruiken, recyclen en hernieuwen. Zo heeft de OVAM in samenwerking met een aantal architectenbureaus 24 ontwerprichtlijnen opgesteld die een evaluatiekader kunnen vormen op element-, gebouw- en wijkniveau (2015). Figuur 8 geeft een schematisch overzicht weer van deze richtlijnen. Ook VUB Architectural Engineering heeft in een publicatie verschillende ontwerpstrategieën, -concepten en -kwaliteiten gebundeld die ontwerpers en bouwheren ondersteunen bij het circulair maken van de gebouwde omgeving (Cambier et al., 2019b).

	interfaces	sub-onderdelen	compositie
 element	1.1.1 omkeerbaarheid 1.1.2 eenvoud 1.1.3 snelheid	1.2.1 duurzaamheid 1.2.2 hergebruik 1.2.3 compatibiliteit	1.3.1 gelaagdheid 1.3.2 onafhankelijkheid 1.3.3 prefabricatie
 gebouw	2.1.1 omkeerbaarheid	2.2.1 demonteerbaarheid 2.2.2 herbruikbaarheid 2.2.3 uitbreidbaarheid	2.3.1 veranderlijke functieverdeling
 wijk	3.1.1 eenvoud 3.1.2 evolutie	3.2.1 hergebruik 3.2.2 dimensionering 3.2.3 demonteerbaarheid	3.3.1 ruimtelijke structuur 3.3.2 polyvalente ruimten 3.3.3 diversiteit 3.3.4 inbreiding functie-wijziging
extra fiche ventilatie			

Figuur 8: 24 Ontwerprichtlijnen voor Veranderingsgericht Bouwen (OVAM, 2015)

2.2.2. MATERIALENIËRARCHIE EN CASCADE VAN WAARDEBEHOUD

Hoewel de grondstofkringloop van regeneratieve materialen in een overzienbare tijdspanne gesloten kan worden, is er ook aan het gebruik van deze materialen een maximum verbonden (Rovers, 2018). De planetaire grenzen (Rockström et al., 2009) zoals de beschikbare gronden, de biodiversiteit, etc. maken dat er in de verschillende levensfasen van de grondstofkringloop van regeneratieve materialen bijkomende maatregelen moeten getroffen worden om de doorlooptijd van die kringloop te verlengen. Regeneratieve materialen moeten met andere woorden optimaal benut worden en hun waarde moet zo lang mogelijk behouden blijven.

In het actieplan voor biomassastromen (Braekevelt et al., 2020) van de Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) werd dit vertaald naar 2 concrete principes: de materialenhiërarchie en de cascade van waardebehoud.

Volgens de materialenhiërarchie dient er in eerste instantie te worden ingezet op de preventie van het gebruiken van materialen. Daarna moet de volgorde 'hergebruik - recyclage - andere nuttige toepassingen - verwijdering' aangehouden worden. Selectieve inzameling en hoogwaardige valorisatie spelen hierbij een cruciale rol. Het cascadeprincipe van waardebehoud komt neer op een ketenbenadering waarbij de volledige grondstofkringloop van een materiaal in rekening wordt gebracht. Zo dient niet alleen de huidige toepassing van een materiaal maar ook de meerwaarde van een reeks opeenvolgende toepassingen mee onderzocht te worden. Het is belangrijk dat in elke stap van de cascade maximale efficiëntie wordt nagestreefd. Hier dient wel een kanttekening bij geplaatst te worden. Niet in elke situatie kan de cascade toegepast worden door bijvoorbeeld economische of juridische factoren (Braekevelt et al., 2020). Ook Rovers wijst in zijn publicatie op het belang van het waarderen van grondstoffen in plaats van producten om grondstofkringlopen te optimaliseren (2018).

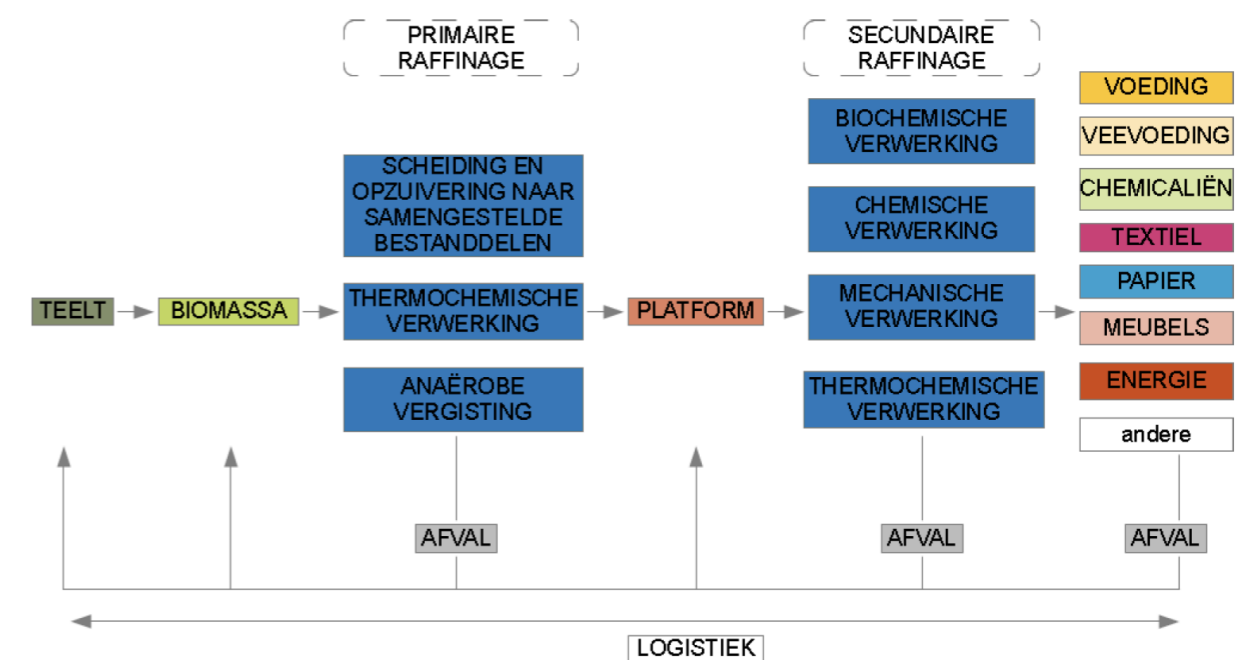
2.3. GRONDSTOFKRINGLOOP VAN REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN

2.3.1. BIOGEBASEERDE WAARDEKETEN

In deze paragraaf wordt er opzoek gegaan naar een manier om de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen te conceptualiseren. Wanneer men anorganische regeneratieve bouwmaterialen zoals bijvoorbeeld ongebakken aarde buiten beschouwing laat, resteren enkel de materialen van organische oorsprong. Deze worden ook wel omschreven als 'biobased', 'na- of hergroeibaar', 'gecultiveerd' of 'gekweekt' zoals in paragraaf 1.2.2. aan bod kwam. Organische materialen kan men ook categoriseren als 'biomassa', dat omschreven kan worden als:

Traditionele landbouwgewassen, algen, hout, gras, organische afvalstromen, e.d. die in opeenvolgende stappen verwerkt worden tot een product dat kan worden geconsumeerd (D'Haese et al., 2013, p. 19).

In 2013 werd er door OVAM een verkennende studie gedaan naar de circulaire inzetbaarheid van biomassa en biomassareststromen. In deze publicatie beschouwt men de keten van activiteiten waarin biomassa verwerkt wordt tot een eindproduct als een 'biogebaseerde waardeketen'. Zo'n archetypische waardeketen wordt in de studie van OVAM schematisch voorgesteld zoals weergegeven op figuur 9.



Figuur 9: Archetypische biogebaseerde waardeketen (OVAM, 2013)

Ook de verschillende elementen van deze waardeketen worden in het rapport besproken. Gedurende de teeltfase worden gewassen verbouwd en geoogst. Dit levert onbehandelde stromen biomassa op. Via primaire bioraffinage kunnen deze stromen omgezet worden in vrij homogene intermediaire stromen met bepaalde basiskennmerken. Onder deze primaire raffinage verstaat men de opeenvolgende productiestappen die tot doel hebben de biomassa te scheiden en te zuiveren naar zijn samenstellende componenten of de biomassa omzetten naar een fractie met een relatief constante en stabiele chemische samenstelling. De resultaten van de primaire bioraffinage worden door OVAM ook wel platformen genoemd. Door middel van secundaire raffinage kunnen deze platformen omgezet worden in eindproducten. Hierbij kunnen verschillende types technologieën worden toegepast: biochemische technologieën, chemische technologieën, thermochemische technologieën en fysische voorbehandelings- en scheidingstechnologieën. Het geheel vormt een gesloten kringloop waarbij de pijlen aangeven hoe de verschillende stromen opnieuw ingezet kunnen worden (D'Haese et al., 2013).

2.3.2. KRITISCHE REFLECTIE BIJ DE GRONDSTOFKRINGLOOP VAN REGENERATIEVE BOUWMATERIALEN

In deze paragraaf worden inzichten die vergaard werden in de voorafgaande literatuurstudie in verband met regeneratie, regeneratieve bouwmaterialen, circulariteit en grondstofkringen aan elkaar gerelateerd. Aan de hand van de verschillende elementen van de biogebaseerde waardeketen (D'Haese et al., 2013) die aan bod kwamen in paragraaf 2.3.1. worden de aandachtspunten, bedreigingen en kansen met betrekking tot de circulariteit van organische regeneratieve bouwmaterialen, verkend. De teeltfase, de primaire raffinage, de secundaire raffinage, de eindproducten en de afvalverwerking en logistiek komen worden besproken.

Heel wat bronnen die in de literatuurstudie van het eerste en het tweede hoofdstuk aan bod kwamen, geven namelijk ook meer sectorspecifieke informatie die in zekere zin geassocieerd kan worden met de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen. Onder andere Biomimicry (Benyus, 1997), Cradle to Cradle: Remaking the way we make things (McDonough & Braungart, 2002) en Growth Within (Ellen McArthur Foundation, 2015) zijn hier voorbeelden van. Op basis van deze literatuur worden er ook een aantal suggesties gedaan ter verbetering van de grondstofkringloop van regeneratieve bouwmaterialen opdat negatieve externe effecten en de druk op de planetaire grenzen verminderd kunnen worden. Het wegwerken van de negatieve gevolgen maakt namelijk integraal deel uit van de principes van de CE zoals besproken in paragraaf 2.1.2. Deze suggesties vereisen echter nog bijkomend onderzoek en zijn voor discussie vatbaar.

2.3.2.1. Teelt

De teeltfase wordt gekenmerkt door het verbouwen en oogsten van gewassen en kan gerelateerd worden aan de land- en bosbouw (D'Haese et al., 2013). In deze paragraaf worden er een aantal aandachtspunten, bedreigingen en kansen geformuleerd met

betrekking tot deze teeltfase.

De landbouwsector heeft de laatste 100 jaar een enorme evolutie doorgemaakt. Deze wordt uitvoerig beschreven door Benyus (1997) en McDonough & Braungart (2002) in hun publicaties. In eerste instantie was het telen van gewassen bedoeld om te voorzien in de eigenbehoeftes van de mens. Hierbij gebruikte men traditionele manieren van landbewerking zoals het wisselen van gewassen, het gebruik van dierlijke mest en het telen van meerdere gewassen voor het geval dat één oogst mislukte. De huidige landbouwsector leunt echter meer en meer aan bij de industrie waarbij er gestreefd wordt naar maximale efficiëntie -het produceren van zoveel mogelijk gewassen met zo weinig mogelijk werk en kosten in zo weinig mogelijk tijd- en waarbij traditionele technieken overboord worden gegooid. Kleine landbouwbedrijven moeten plaats maken voor hun grotere tegenhangers die meer volume kunnen produceren. Deze geïndustrialiseerde landbouw heeft heel wat gevolgen voor het regeneratieve vermogen van ecosystemen (Benyus, 1997; McDonough & Braungart, 2002).

In Vlaanderen kampt men onder andere met een tekort aan organische koolstof in de bodem. Dat wordt aangehaald in een van de publicatie van OVAM (Braekevelt et al., 2020). Er gaat jaarlijks zo'n 2 tot 2,5 % aan organische koolstof in de landbouwgrond verloren waardoor de vruchtbaarheid in het gedrang komt. Het Vlaams energie- en klimaatplan 2021-2030 stelt dat het verlies van organische koolstof ongewenst is en dat er maatregelen moeten worden genomen om dit gehalte op peil te houden en mogelijks te verhogen. Het lokaal sluiten van de biologische kringloop is hierbij essentieel (Braekevelt et al., 2020). Men kan dan spreken over kringlooplandbouw waarbij afvalstromen van allerhanden soorten in de natuur als voedingsstof worden ingezet om nieuwe gewassen te kweken (Ellen McArthur Foundation, 2017).

Benyus (1997) en McDonough & Braungart (2002) beschouwen in hun publicaties ook de soorten gewassen in de landbouw. Deze zijn vaak gehybridiseerd en soms zelfs genetisch gemodificeerd zodat ze beter passen in het consumptiepatroon van de mens. Maar hoe meer de gewassen gemodificeerd worden, hoe meer ze van de mens afhankelijk worden om te overleven. Hun door evolutie aangesterkte zelfverdedigingssystemen worden namelijk weggenomen.

Ook het verlies aan biodiversiteit, elke keer een gewas geoogst wordt in de huidige landbouwcultuur, vormt een probleem (Benyus, 1997). Meerjarige gewassen kunnen een potentiële oplossing vormen. Zij kunnen zorgen voor een continue leefomgeving voor dieren in het wild en kunnen daarnaast ook het organisch koolstofgehalte in de bodem verhogen met hun wortels. Bovendien kunnen meerjarige gewassen bescherming bieden tegen erosie, overstromingen en de uitspoeling van nutriënten (Cui et al., 2018).

Verder valt er ook te leren van de plantgemeenschappen die groeien op landbouwgronden vóór dit door de mens gecultiveerd werd. Door landbouw meer vanuit een lokale lens te benaderen is er meer kans om de structuur en functionaliteit van een volwassen, natuurlijk ecosysteem te imiteren (Benyus, 1997).

Ook de typologie die de landbouwsector op dit moment domineert vormt een bedreiging voor ecosystemen. In de huidige monoculturen worden namelijk alle andere soorten buiten het hoofdgewas van de akkers verwijderd. Deze andere soorten helpen normaal tegen erosie en overstroming en zorgen ervoor dat de

voedingsstoffen in de toplaag van de aarde zich kunnen herstellen. Ook vormen zij soms de natuurlijke vijanden van ongedierte dat het gewas aantast. Het gevolg hiervan is het toenemende gebruik van pesticiden om dit ongedierte te bestrijden. Ook het gebruik van kunstmatige meststoffen die vaak chemicaliën bevatten, neemt toe om voldoende voedingsstoffen in de bodem te verzekeren. Deze gebruiken hebben wederom heel wat negatieve effecten op de landbouwsector zelf. Door erosie van wind en water vinden voedingsstoffen veel moeilijker hun weg naar de bodem en blijft het gebruik hiervan toenemen. De voedingsstoffen die dan toch de grond bereiken zorgen ervoor dat de bodem gesatureerd raakt met chemicaliën. Ook het ongedierte wordt geleidelijk aan resistent aan verschillende pesticiden waardoor men hier steeds meer van nodig heeft (Benyus, 1997; McDonough & Braungart, 2002).

Bovendien hebben monoculturen heel wat neveneffecten op grotere schaal. Afvloeiing van mest door erosie zorgt ervoor dat nutriënten zich vermengen met het grondwater en in rivieren, meren en oceanen terecht komen. Hierdoor wordt de groei van algen bevorderd en ontstaan er dode zones in de oceanen die nu al zo'n 240,000 km² innemen (Ellen McArthur Foundation, 2017).

De omschakeling van monoculturen naar polyculturen kan een essentiële schakel zijn in de verduurzaming van de landbouwsector. In polyculturen is er namelijk een hoge mate van diversiteit die zorgt voor een goedkope en natuurlijke manier van ongediertebestrijding zodat er altijd wel een aantal gewassen zijn die het goed doen en geen volledige oogsten mislukken. Deze landbouwculturen kunnen verwezenlijkt worden in verschillende vormen die in kleinere of grotere mate aansluiten bij natuurlijke ecosystemen. Zo kan er bijvoorbeeld worden ingezet op strokenlandbouw waarbij er verschillende gewassen in stroken naast elkaar voorkomen. De Boerderij van de Toekomst van Wageningen Universiteit, die wordt weergegeven op figuur 10, is hier een goed voorbeeld van (De Visser et al., 2020). Wanneer hierbij ook houtige gewassen (bomen of struiken) voorkomen spreekt men van boslandbouw of agroforestry (Nelissen et al., 2017). Een andere soort polycultuur vormt de voedselbos-typologie waar verschillende soorten gewassen door elkaar staan. Ook andere typologieën van landbouwbedrijven zoals vertical farms, floating farms, etc. kunnen een oplossing vormen voor de toenemende vraag naar grond. Zo kan landbouw bovendien terug meer in het stedelijk weefsel geïmplementeerd worden (Van Hattum, 2020).

2.3.2.2. Primaire raffinage

Onder primaire raffinage verstaat men, zoals beschreven in paragraaf 2.3.1., de opeenvolgende productiestappen die tot doel hebben de biomassa te scheiden en te zuiveren naar zijn samenstellende componenten of de biomassa omzetten naar een fractie met een relatief constante en stabiele chemische samenstelling. Stappen in het oogstproces waarbij plantdelen van elkaar gescheiden worden vallen hier ook onder (D'Haese et al., 2013).

Bij het bewerken en oogsten van de landbouwgronden doet onder andere de schaalvergroting van landbouwbedrijven afbreuk aan ecosystemen. Door het gebruik van zware machines om het land te bewerken, wordt de bodem verdicht. Hierdoor vindt er onvoldoende waterinfiltratie en een geringe opname aan voedingsstoffen



Figuur 10: Strokenlandbouw (WUR, 2019)



Figuur 11: The hands-free farm at Harpers Adams University (Evans, 2019)

plaats (Benyus, 1997; Van Hattum, 2020). Zo draagt dit bij aan slechte wortelgroei en een verhoogd watergebruik. Landbouwirrigatie is wereldwijd verantwoordelijk voor bijna 70% van de wateronttrekking maar slechts 40% daarvan bereikt de gewassen (Ellen McArthur Foundation, 2017).

Daarnaast zorgt de schaalvergroting van landbouwbedrijven ervoor dat veel meer kleinere boeren naar de stad trekken. Hierdoor vindt er een verlies aan kennis van de traditionele landbouwmethodes plaats die net van pas kunnen komen bij het omvormen van de sector (McDonough & Braungart, 2002).

Technologische vooruitgang kan een belangrijke rol spelen bij de evolutie van de landbouwsector. De Hands-Free Farm van Harper Adams University toont aan dat door middel van robotisering en automatisering de werkdruk van landbouwers kan verminderen en dat verdichting van de bodem kan worden tegengegaan (Harper Adams University, 2019). Op figuur 11 wordt deze Hands-Free farm afgebeeld. Ook schaalgrootte wordt op die manier minder belangrijk. Zo kunnen bijvoorbeeld kleine veldrobots en drones worden ingezet om in een voedselbostypologie autonoom naar vruchten te zoeken en deze te oogsten (Van Hattum, 2020)

2.3.2.3. Secundaire raffinage

Secundaire raffinage wordt door de OVAM omschreven als de productiestappen die nodig zijn om van de homogene biomassa een eindproduct te maken (D'Haese et al., 2013). Ook bij de secundaire raffinage, waarbij biomassa wordt verwerkt tot regeneratieve bouwmaterialen, zijn er een aantal belangrijke kanttekeningen.

Het ontwikkelen van nieuwe biobased producten voor de bouwsector vraagt namelijk veel durf van bedrijven. Door de hoge concurrentiedruk in de sector is er weinig ruimte voor experimenten en is ook de innovatiekracht laag (Van der Velde et al., 2021). Ook twijfel over de praktische haalbaarheid van bepaalde doelstellingen op vlak van duurzaamheid zorgen ervoor dat het ontwikkelen van regeneratieve bouwmaterialen geen evidentie is (Van Dam & Van den Oever, 2019). Het lobbywerk en de vaak ontorechte duurzaamheidsclaims aan de hand van Type II-milieuverklaringen of eigenverklaringen van producenten van traditionele bouwmaterialen, versterken dit effect en werken verwarring in de hand (Janssen et al., 2016; Van der Velde et al., 2021; Woolley, 2013).

Daarnaast is in de bouwsector productie en toepassing van traditionele materialen geoptimaliseerd (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019). Doordat deze materialen een schaalvoordeel hebben, is er een aanzienlijke opschaling nodig om het aandeel van regeneratieve materialen in de bouwsector te vergroten (Koster et al., 2020). Dit vraagt op zijn beurt weer een grote investering in de productie- of verwerkingscapaciteit van leveranciers (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019).

De kleinschalige productie en meer arbeidsintensieve installaties brengen bovendien vaak hogere kosten met zich mee (Van Dam & Van den Oever, 2019).

Tot slot zorgen onduidelijke criteria voor certificering ervoor dat het ontwikkelen van marktconforme regeneratieve bouwmaterialen niet eenvoudig is (Van Dam & Van den Oever, 2019). Regeneratieve bouwmaterialen gaan vaak in tegen de huidige

formulering van internationaal aanvaarde normen. In de natuur wordt er namelijk niet gestreefd naar één constante norm maar komen er variaties in toestanden voor die naast elkaar kunnen bestaan (Hebel & Heisel, 2017). Variaties en diversiteit maken deel uit van evolutie en zorgen voor gezonde, stabiele ecosystemen die in staat zijn zich te wapenen tegen ziektes en ander onheil (McDonough & Braungart, 2002). Deze "biologische onvolkomenheden" maken het tijdrovend, moeilijk en relatief duur om regeneratieve bouwmaterialen gecertificeerd te krijgen (Koster et al., 2020). Bijgevolg wordt er vaak verwezen naar verouderde normen uit bestaande databases in plaats van in te zetten op eigen onderzoek. Hierdoor is het lastig om voldoende correcte kwaliteitsbewijzen voor te leggen en deze materialen op grote schaal te produceren. Voor veel traditionele bouwmaterialen zijn deze standaarden en normen vaak wel voor handen (Woolley, 2013).

Wanneer traditionele bouwmaterialen en regeneratieve bouwmaterialen dan toch in dezelfde databases voorkomen, scoren die laatste vaak nog steeds minder goed door een oneerlijke beoordeling (Van der Velde et al., 2021). Ook het in rekening brengen van de opslag van biogeen CO₂ door regeneratieve bouwmaterialen is een controversieel onderwerp en wordt vaak weggelaten bij analyses. Het toewijzen van deze CO₂ in de levenscyclusanalyse van een product vraagt namelijk bijzondere aandacht, aangezien de koolstofopslag niet dubbel mag in rekening gebracht worden bij hoofd- en bijproducten van éénzelfde grondstof (Pawelzik et al., 2013). Bijkomende beleidsmaatregelen lijken noodzakelijk om de lagere CO₂-uitstoot te vertalen naar een financiële meerwaarde (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019).

2.3.2.4. Eindproduct

De secundaire raffinage levert een diversiteit aan eindproducten op die door gebruikers geconsumeerd of toegepast kunnen worden (D'Haese et al., 2013). De toepassing van regeneratieve materialen in de bouwsector is echter niet altijd evident en wordt onder andere verhinderd door een eerder conservatieve houding van de sector ten opzichte van innovatie. De bouwindustrie is sterkt gefragmenteerd en berust vaak op lokale -en soms informele- samenwerkingsverbanden tussen aannemers en productleveranciers (Ellen McArthur Foundation, 2015; Van der Velde et al., 2021).

Ook heerst er een algemeen gebrek aan kennis over regeneratieve bouwmaterialen, zowel bij bouwheren en inkopers van materialen als bij architecten en aannemers. Zo is het vaak onbekend welke materialen er beschikbaar zijn, wat hun (bouwtechnische) eigenschappen zijn, hoe ze moeten worden toegepast en waar deze en andere informatie gevonden kan worden (Van der Velde et al., 2021). Hierdoor heersen er heel wat vooroordelen ten aanzien van regeneratieve bouwmaterialen. Deze hebben veelal betrekking op de kostprijs, levensduur, kwaliteit en brandveiligheid van deze materialen (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019). Daarnaast is het ook voor gebruikers van regeneratieve bouwmaterialen vaak onduidelijk welke materialen als duurzaam kunnen aangeschreven worden (Van Dam & Van den Oever, 2019). Deze misvattingen staan toepassing op een grotere schaal in de weg. Bovendien hebben aannemers en architecten vaak een langdurige wettelijke verantwoordelijkheid. Wanneer men toch zou opteren voor het toepassen van regeneratieve bouwmaterialen wordt er vaak door onzekerheid extra marges ingebouwd die wederom leiden tot hogere kosten (Van der

Velde et al., 2021). Prefabricatie en modulariteit kunnen mee aan de basis liggen van de oplossing van dit probleem (Zimmann et al., 2016).

Naast het circulaire potentieel van regeneratieve bouwmaterialen zijn er nog een aantal andere opportuniteiten verbonden aan de toepassing van deze materialen. De correcte toepassing van regeneratieve materialen kan namelijk bijdragen aan een passief gebouwenbestand waarbij klimaatinstallaties tot een minimum beperkt kunnen worden (Koster et al., 2020). Door middel van hygroscopische eigenschappen zijn een aantal regeneratieve materialen in staat om waterdamp dat in de lucht zit te absorberen. Bij droge binnenlucht kunnen ze dit vocht terug afgeven en zo schommelingen opvangen. Bovendien kunnen deze materialen vaak ook latente warmte genereren door middel van hun thermische massa (Romano et al., 2019). Er dient opgemerkt te worden dat afwerkingsmaterialen het vochtbufferend vermogen van regeneratieve materialen vaak verlagen en dat een goed ontworpen ventilatiesysteem en bijkomende maatregelen aangewezen kunnen zijn voor een optimaal comfort (Knapen et al., 2020). Voor heel wat synthetische isolatiematerialen zijn er regeneratieve alternatieven ter beschikking (Van Dam & Van den Oever, 2019). Er schuilt dan ook een groot potentieel in het isoleren van het bestaande woningen met deze materialen aangezien hiervoor drie keer zo veel isolatiemateriaal nodig is als voor de nieuwbouwopgave (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019). Doordat de lambda-waarde van regeneratieve materialen soms beperkter is, kan dit echter resulteren in een dikker isolatiepakket (Knapen et al., 2020).

Ook wordt er in een aantal publicaties vermeld dat er gezondheidsvoordelen verbonden zijn aan regeneratieve bouwmaterialen. Aangezien deze materialen met minder toxische stoffen vervaardigd worden, kunnen ze een alternatief zijn voor een aantal traditionele constructiematerialen die het "sick building syndrome" in de hand werken (Hebel & Heisel, 2017). Ook aan het productie- en constructieproces zijn er hierdoor minder gezondheidsrisico's verbonden (Woolley, 2013).

2.3.2.5. Afvalverwerking en logistiek

Het sluiten van grondstofkringlopen wordt ook in het rapport van OVAM over de inzetbaarheid van biomassa als essentieel gezien. Logistiek wordt in dit rapport omschreven als alle activiteiten die nodig zijn om biomassastromen en hun afgeleide producten te transporteren (D'Haese et al., 2013).

Het gemak van deze inzamelingsprocessen en het vertrouwen in bestaand recyclingprogramma's zorgt er echter voor dat de focus verschoven is van het verminderen van afval naar het consumeren van producten. Het resultaat van dit consumptiegedrag is echter dat producten niet gewaardeerd worden als hulpbron, maar gezien worden als een object dat uitgesloten is van de grondstoffencyclus. Steeds meer van die producten zijn echter niet ontworpen om gerecycleerd te worden. Dit vraagt dus om een mentaliteitswijziging. Afval dient niet langer gezien te worden als een ongewenste toestand maar als een hernieuwbare hulpbron die waarde en energie bevat. Het wijzigen van de aard, het ontwerp, de samenstelling en het karakter van producten opdat deze na hun levenscyclus niet als afval gezien worden, kan hierbij een

belangrijke rol spelen (Hebel et al., 2014).

Bij het waarderen en optimaliseren van materialen en hun grondstofkringlopen is het van belang de oorsprong van deze grondstoffen te kennen opdat de kringlopen ook effectief gesloten kan worden (Rovers, 2018). In de bouwsector zijn ontwerpers en bestekschrijvers echter vaak niet op de hoogte van de oorsprong van bouwmaterialen (Woolley, 2013). Constructies worden vandaag de dag vaak samengesteld uit verschillende elementen uit de hele wereld. Dit bemoeilijkt het sluiten van grondstofkringlopen. Ook de impact wordt hierdoor vaak verschoven naar elders (Rovers, 2018). Hieruit volgt het belang van het lokaal sluiten van grondstoffenkringlopen. Zo kunnen constructies verbonden worden aan lokale materiaal- en energiestromen en verweven zijn met lokale gewoontes en gebruiken (McDonough & Braungart, 2002). Ook Vlaanderen wil inzetten op regionale en lokale valorisatie van plaatselijke biomassa om zo kansen te creëren voor de economie en de lokale tewerkstelling (Braekevelt et al., 2020).

Bioraffinaderijen kunnen hierbij een belangrijke rol spelen. Dit zijn installaties die inzetten op de verwerking van biomassa tot een spectrum van verhandelbare producten en energie. De organische fractie van restafval, agrarische afvalstromen, afvalwater, etc. wordt opgevangen en door middel van verschillende biologische, thermische en enzymatische processen (Anaerobe vergisting, nutriëntterugwinning, compostering, etc.) omgevormd tot waardevolle producten, materialen, chemicaliën en brandstoffen. Deze installaties kunnen aangepast worden aan het stedelijk weefsel en de lokale behoeften en kunnen bovendien gecombineerd worden met bestaande zuiveringsstations zodat er synergiën ontstaan (Bennich & Belyazid, 2017).

Wanneer bedrijven binnen eenzelfde sector of over bedrijfssectoren heen samenwerkingen aangaan met de focus op materiaalvalorisatie, kan dit ervoor zorgen dat meer materialen in hun grondstofkringloop gehouden kunnen worden. Deze samenwerkingsverbanden worden door OVAM omschreven als ecoclusters. Op die manier kunnen afvalstromen collectief ingezameld en opgehaald worden en kunnen grondstoffen efficiënter worden ingezet. Ook verschillende reststromen kunnen worden uitgewisseld. Dit wordt ook wel industriële symbiose genoemd, waarbij bedrijven door de uitwisseling van materiaalstromen, water, energie, ruimte, etc. zowel op ecologisch als op economisch en sociaal vlak winsten kunnen maken (OVAM, z.d.).

HOOFDSTUK 3

In het eerste hoofdstuk van deze scriptie werd het begrip 'regeneratieve bouwmaterialen' begrensd. Vervolgens werd er in hoofdstuk 2 op zoek gegaan naar het circulair potentieel van regeneratieve materialen. In het derde en laatste hoofdstuk van deze scriptie wordt er onderzoek gedaan naar de toepassing van stro als regeneratief bouw materiaal. De centrale onderzoeksvraag in hoofdstuk 3 luidt dan ook: "Hoe kan stro worden toegepast als regeneratief bouw materiaal?"

Dit hoofdstuk is dus een casestudie bij de voorgaande hoofdstukken. Door te identificeren hoe de grondstof stro als regeneratief bouw materiaal kan worden toegepast, kan er ook gereflecteerd worden op het circulair potentieel hiervan.

Eerst wordt er onderzocht wat stro is en welke omvang de productie hiervan heeft in Vlaanderen. Ook de huidige afzetmarkt van stro in Vlaanderen wordt verkend. Publicaties van de Vlaamse overheid dienen hierbij als leidraad. Eens er voldoende informatie is verzameld over stro als grondstof, wordt er op zoek gegaan naar toepassingen van stro in de bouwsector. Zowel historische als meer recente toepassingen komen hierbij aan bod. Tot slot wordt er onderzocht waarom deze toepassingen als regeneratief bestempeld kunnen worden.

De sub-onderzoeksvragen die in dit hoofdstuk meer diepgang brengen, zijn:

- *Wat is stro en welke omvang heeft de productie hiervan in Vlaanderen?*
- *Wat zijn de meest voorkomende toepassingen van stro in Vlaanderen?*
- *Hoe kan men stro toepassen als bouw materiaal?*
- *Waarom kunnen deze bouwmaterialen als regeneratief bestempeld worden?*

Net als in hoofdstuk twee volgt er aan het einde van de literatuurstudie een kritische reflectie. Aan de hand van de grondstofkringloop van stro als regeneratief bouw materiaal worden er een aantal aandachtspunten, bedreigingen en kansen met betrekking tot de circulariteit van stro geformuleerd.

3.1. STRO ALS GRONDSTOF IN VLAANDEREN

Stro is een restproduct uit de akkerbouw. Het bestaat uit de gedroogde stengels van graanplanten, die elk hun eigen soort stro met zich meebrengen. In deze paragraaf worden eerst de verschillende soorten granen van elkaar onderscheiden. Vervolgens wordt er onderzocht welke gewassen de graanmarkt in België en Vlaanderen domineren om zo meer inzicht te krijgen in het stroareaal dat lokaal aanwezig is. Daarnaast wordt ook de huidige afzetmarkt van graan en stro in Vlaanderen onder de loep genomen.

3.1.1. AKKERBOUW IN BELGIË EN VLAANDEREN

Circa 44% van de landoppervlakte van België bestaat uit landbouwgrond (Statbel, 2020). Dat ligt in de lijn met de Vlaamse cijfers, waar 46% van de landoppervlakte wordt ingenomen door landbouw. Van deze Vlaamse landbouwgrond wordt 57% bestemd aan voedergewassen. De akkerbouw, waarin graanteelt de grootste activiteit is, is naast de productie van voedergewassen goed voor 34% van het Vlaamse landbouwareaal. In 2019 betekende dit concreet dat 127.163 ha werd bestemd aan de productie van granen (Statistiek Vlaanderen, 2020).

Deze graanteelt situeert zich voornamelijk in gebieden waar leem- en zandleembodems voorkomen. In België vinden we deze terug in de Oost-Westgordel over de Vlaams-Waalse taalgrens heen. In Vlaanderen gaat het dan voornamelijk over de provincies West-Vlaanderen, Oost-Vlaanderen, Vlaams-Brabant en Limburg. Echter, de teelt van graan in Vlaanderen is weinig gestructureerd en bestaat voornamelijk uit kleine partijen. De grotere akkerbouwbedrijven vinden we eerder in Wallonië terug.

We vinden in België en Vlaanderen heel wat verschillende soorten granen terug. Zo kan men onder andere tarwe, gerst, triticale, spelt, rogge, haver en korrelmais onderscheiden. Een overzicht is terug te vinden in tabel 1. Met een jaarlijkse productie van ongeveer 1,5 miljoen ton en een oppervlakte van zo'n 184.000 ha is tarwe veruit het belangrijkste graangewas in België. Daarnaast hebben ook de teelt van gerst en korrelmais een belangrijk aandeel in de Belgische graanteelt. Ook in Vlaanderen is tarwe met een oppervlakte van zo'n 62.700 ha het belangrijkste graangewas, sterk gevolgd door korrelmais.

Teelt	Granen (totaal)	Winter-tarwe	Zomer-tarwe	Winter-gerst	Zomer-gerst	Triticale	Spelt	Rogge	Haver	Korrel-mais
België (ha)	305.644	182.856	1.208	42.697	2.701	5.543	13.634	511	4.073	48.971
Vlaanderen (ha)	126.339	62.074	622	14.489	943	2.142	1.015	182	559	44.156

Tabel 1: Arealen graanteelt 2016-2017 (Lamont, 2018)

Heel wat graangewassen leveren hun eigen soort stro op als restproduct na het dorsen. Tarwestro, gerststro, roggestro en haverstro zijn hier voorbeelden van (Post, 2013). De stro-opbrengst per hectare varieert sterk van soort tot soort. Gemiddeld wordt er per hectare geogste oppervlakte graan zo'n 4,5 ton stro geproduceerd (Post, 2013) met een maximum van 6 ton per ha (Lamont, 2018).

Aangezien tarwe het graangewas is dat de huidige graanmarkt in België en Vlaanderen domineert, zal dit in de rest van dit hoofdstuk centraal staan. Bovendien is tarwestro het meest geschikt om toe te passen als regeneratief bouw materiaal. Het heeft namelijk een stevige stengel en een goede breekweerstand (BAS Bouwen, 2020). Bovendien heeft het ook een lagere voedingswaarde dan bijvoorbeeld gerststro waardoor het minder aantrekkelijk is voor ongedierte (Post, 2013).

Bij tarwe als gewas wordt er een onderscheid gemaakt tussen zomertarwe, dat in het voorjaar gezaaid wordt en geogst wordt in de periode juli-augustus (Tempelaars et al., 2020b), en wintertarwe, dat in de herfst gezaaid wordt en enkele weken vroeger geogst wordt dan zomertarwe (Tempelaars et al., 2020a). Ook onderscheidt men korte en lange variëteiten. Bij de korte tarwevariëteit is de teelttechniek minder intensief en vragen de gewassen minder beschermingsmiddelen en bemesting. De langere variëteit levert dan weer veel meer stro op na de graanoogst. Vooral de gemengde akkerbouw-veeteeltbedrijven zullen opteren voor deze variant aangezien zij dit kunnen implementeren als stalstrooisel. Zuivere akkerbouwbedrijven kiezen meestal voor de kortere variëteit aangezien zij minder geïnteresseerd zijn in stroproductie (Lamont, 2018).

3.1.2. VLAAMSE AFZETMARKT

In de economische beschouwing bij de graanteelt van 2017 wordt er ook een overzicht gegeven van de meest voorkomende toepassingen van tarwe als grondstof in Vlaanderen. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen tarwe als graan en tarwestro (Lamont, 2018).

Het graan wordt voornamelijk toegepast als voedertarwe en baktarwe maar kent ook toepassingen in de zetmeelindustrie en in de energiesector als bio-ethanol. Doordat het graan in Vlaanderen vaak afkomstig is van kleine partijen, is het vaak weinig homogeen en van onvoldoende kwaliteit om als baktarwe te worden vermalen tot bloem voor broodbereiding, de biscuiterie en de zetmeelindustrie. De graanproductie in Vlaanderen is dan ook voornamelijk gericht op de veevoederindustrie. Granen zijn namelijk de belangrijkste energieleverende componenten in veevoerders. Deze kunnen tot wel 40% aan tarwe bevatten. Het grootste deel van de geproduceerde tarwe in Vlaanderen wordt dan ook opgekocht door fabrikanten van veevoerders en verwerkt tot krachtvoer. Daarnaast verwerken gemengde landbouwbedrijven steeds vaker de eigen gewonnen tarwe rechtstreeks in het rantsoen. Doordat tarwe gebruikt wordt

voor veevoeding, dient het in een volgende fase ook voor de voeding van de mens in de vorm van vlees- en zuivelproducten (Lamont, 2018).

Wintertarwe heeft een opbrengst van zo'n 10.000 kg/ha en een verkoopprijs van 140 euro/ton. Baktarwe heeft een lagere opbrengst van zo'n 8.000 kg/ha maar een hogere verkoopprijs van 180 euro/ton (Lamont, 2018).

Ook het stro afkomstig van tarwe kent verschillende toepassingen. Aangezien tarwestro een goede absorptiecapaciteit heeft, wordt het in gemengde akkerbouw/veeteeltbedrijven voornamelijk ingezet als stalstrooisel. Samen met de uitwerpselen van het vee vormt dit stro dan stalmest dat op zijn beurt kan worden ingezet voor de humusaanrijking van akkers. Dit komt de stabiliteit van de bodemstructuur ten goede en zorgt voor de nalevering van voedingselementen. Daarnaast wordt stro na het dorsen van het graan vaak ondergeploegd. Op die manier dient het rechtstreeks als bodemverbeteraar. Andere toepassingen, afgezien van deze als regeneratief bouw materiaal die in de volgende paragraaf aan bod komen, zijn bijvoorbeeld deze als afdekmiddel om vorstschade bij planten te voorkomen of als biobrandstof (Lamont, 2018).

De opbrengst per hectare van het stro is erg variëteitsgebonden. Zoals reeds vermeld leveren langere variëteiten meer stro op na het dorsen dan hun kortere tegenhangers. Na de oogst wordt er voor tarwestro van gemiddelde kwaliteit momenteel zo'n 80 euro per ton geboden. In de herfst- en wintermaanden kan dit oplopen tot 110 euro per ton. Voor kwalitatief stro wordt er plaatselijk zelfs 125 euro geboden. Op die manier kan dit bij een stro-opbrengst van 4 ton per hectare 320 euro opleveren. Wanneer men dit vermindert met een perskost van 80 euro per hectare kan dit de graanteler bijkomend 240 euro per hectare opleveren (Lamont, 2018).

3.2. STRO ALS BOUWMATERIAAL

3.2.1. GESCHIEDENIS

Bouwen met stro kent een lange geschiedenis. Aan het einde van de 19e eeuw, toen de balenpers werd uitgevonden, werd strobalembouw voor het eerst toegepast op de vlaktes van Nebraska in de Verenigde Staten. De strobalembouwen werden in het merendeel van de gevallen toegepast als thermische isolatie, al werden ze soms ook ingezet als onderdeel van de dragende structuur -een methode die nu nog steeds bekend staat als het nebraska-systeem. Een deel van deze gebouwen worden hedendaags nog steeds gebruikt en verkeren in prima staat (Post, 2013).

Bouwen met strobalembouwen kende zijn bloei rond 1940, maar de tussenkomst van de Tweede Wereldoorlog en de groeiende populariteit van de cementindustrie zorgden er echter voor dat strobalembouw minder frequent werd toegepast (BAS Bouwen, 2020). Vandaag zien we een groeiende interesse in deze bouwmethode. In verschillende landen bestaat er reeds een regelgevend kader voor strobalembouw. In bijvoorbeeld de Verenigde Staten, het Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Frankrijk is het bouwen van passiefwoningen met stro geen uitzondering op de regel (Janssens & Alderweireldt, 2016). Ook het Interreg NWE-programma 'UP-Straw: Urban and Public Buildings in Straw', dat een financiering van 3,8 miljoen euro kreeg van de Europese Unie, bevestigt de groeiende interesse naar stro als regeneratief constructiemateriaal (NWE, 2019). Hoewel bouwen met stro in België en Vlaanderen heel wat minder ingeburgerd is, wordt er ook hier steeds vaker met stro gebouwd (BAS Bouwen, 2020).

3.2.2. TOEPASSINGEN

Losse strostengels zijn weinig geschikt om in de bouwsector gebruikt te worden als materiaal. Het is pas nadat de strostengels verdicht worden en er dus energie aan het systeem wordt toegevoegd, dat er bepaalde materiaaleigenschappen tot uiting komen. De hogere graad van compactheid die verkregen wordt door het verdichten van de strostengels zorgt ervoor dat een groot deel van de lucht tussen de poriën verdwijnt. Hierdoor ontstaat er een materiaal met vaak goede thermisch en akoestisch isolerende eigenschappen dat bovendien ook minder vatbaar is voor brand. Afhankelijk van de manier van verdichten en de mate van compactheid kunnen de toepassingen van stro als bouw materiaal andere materiaaleigenschappen vertonen (Hebel et al., 2014).

Verdichting van het stro speelt dus een belangrijke rol bij de inzet als bouw materiaal. De manier waarop de strostengels verdicht worden en de mate van compactheid kan wel verschillen. Dit levert een diversiteit aan materialen op waarvan er een aantal in deze paragraaf worden toegelicht. De toepassingen die aan bod komen zijn voornamelijk afkomstig uit de publicaties Building from Waste (2014) en Cultivated Building Materials (2017) van Hebel & Heisel en het boek Bouwen met Stro van Michel Post (2013). Buiten deze voorbeelden zijn er mogelijk nog heel wat andere manieren om stro te valoriseren in de bouwsector. Het is dus de bedoeling om enkele toepassingen

te identificeren eerder dan een volledige lijst af te leveren.

De toepassingen worden besproken in 2 categorieën: materialen die verdicht zijn door middel van mechanische compressie en materialen die verdicht zijn door middel van micro-organismen. In de meeste gevallen gaat het over toepassingen als isolatiemateriaal en/of als dragend element (Hebel et al., 2014).

3.2.2.1. Verdichting d.m.v. mechanische compressie

Door mechanisch druk uit de oefenen op de strostengels worden deze samengeperst en gaan de strootjes zich met elkaar verstrengelen. Op die manier kan het verwerkt worden tot product dat kan ingezet worden in de bouwsector (Janssens & Alderweireldt, 2016). Men kan verschillende bouwmaterialen onderscheiden waarbij de strostengels door middel van mechanisch compressie verdicht werden. In deze paragraaf komen strobalen, gebundelde strostrengen en plaatmaterialen op basis van stro aan bod.

Wanneer de strostengels na het dorsen van het graan in lichtere mate worden samengeperst met een balenpers, kan men bijvoorbeeld de welgekende rechthoekige strobalen bekomen. Dit is een van de bekendere varianten van het materiaal aangezien het in deze vorm makkelijk te transporteren en op te bergen is. Wanneer deze balen een densiteit tussen 80 en 120 kg/m² hebben, kunnen ze rechtstreeks worden toegepast als bouwsteen (BAS Bouwen, 2020). Deze densiteit valt normaliter in te stellen op de persmachine (Janssens & Alderweireldt, 2016).

De Belgische EPB-regelgeving hanteert twee verschillende lambda-waardes voor strobalen. De strobalen van Stassen Stro, een bedrijf uit Riemst, werden in diverse stadia getest door het WTCB. Hierdoor verkregen een EPB-certificaat met een lambda-waarde van 0,06 W/mK. Andere types strobalen krijgen een hogere waarde van 0,08 W/mK toegekend. In Duitsland werd echter een ETA (European Technical Assessment) opgemaakt waaruit blijkt dat de werkelijke lambda-waarde 0,043 W/mk bedraagt (BAS Bouwen, 2020). Deze waarde komt in de buurt van de waarde van Rotswol, dat een lambda-waarde tussen de 0,033 en 0,043 W/mk heeft (EPBD, 2021).

Met afmetingen van ongeveer 480 x 360 x circa 800mm (B x H x L) en een gewicht tussen de 10 en de 15 kg zijn deze balen uitermate geschikt voor zelfbouw. Er bestaan verschillende bouwsystemen om strobalen in situ te gebruiken als bouwelementen. Zo bestaat er de Nebraska-methode waarbij de strobalen worden ingezet als dragend element. Deze methode wordt weergegeven op figuur 12. De maximaal gerapporteerde belasting van een bepleisterde wand uit strobalen varieert tussen 21 en 66 kN/m (Sodagar et al., 2011). Bij dit bouwsysteem worden de balen gestapeld in halfsteens verband waarna men ze onder spanning brengt door middel van trekbanden. In een latere fase zorgt ook de dakconstructie bij dit systeem voor bijkomende spanning.

Een ander bouwsysteem betreft de 'Post and beam'-methode. Hier staat een houten skelet in voor de draagstructuur en worden de strobalen meestal boven elkaar geplaatst. Ook bij deze methode worden de balen onder extra spanning gebracht door middel van trekbanden of pneumatische krikken (Post, 2013). Op figuur 13 wordt deze methode weergegeven.



Figuur 12: Nebraska methode (Freedom For Sustainability, 2016)



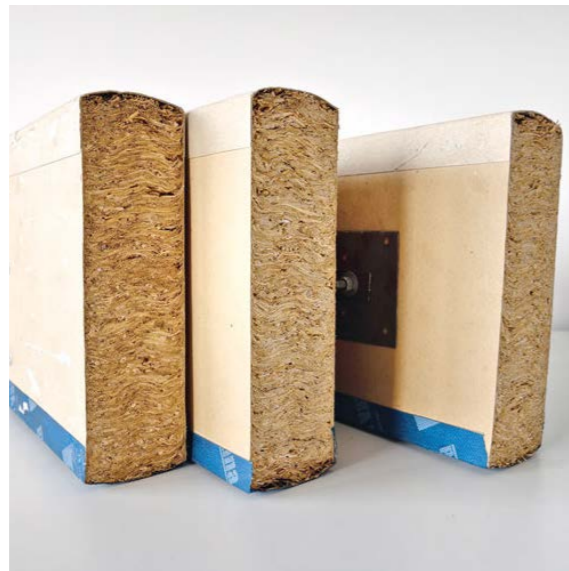
Figuur 13: Post-and-beam methode (Ruppert, 2014)



Figuur 14: Geprefabriceerde panelen met strobalen (Strotec, 2018)



Figuur 15: Strawjet gebundelde strostrengen (Hebel et al., 2014)



Figuur 16: Strotec plaatmateriaal (Hebel et al., 2014)



Figuur 17: Verpakking in mycelium (Hebel et al., 2014)

Daarnaast kunnen strobalen ook in geprefabriceerde toepassingen gebruikt worden als bouwelementen zoals weergegeven op figuur 14. Door deze elementen op een externe locatie te vervaardigen is deze bouwmethode minder weersafhankelijk. Meestal gebruikt men een kader van gelamineerde liggers dat instaat voor de draagstructuur en vult men dit in met strobalen. Door verschillen in de tussenafstand van de verticale staanders en de manier waarop het stro wordt aangebracht onderscheiden we ook hier verschillende systemen. Bij de Engelse 'Modcell'-methode gebruikt men bijvoorbeeld kaders van circa 3 m breed waarin het stro halfsteens wordt geplaatst. Volgens de Duitse methode plaatst men dan weer verticale staanders om de 90 cm en klemt men de strobalen hier op hun kant en staand in (Post, 2013).

Naast een balenpers zijn er ook andere innovatieve manieren om het stro te verzamelen en samen te persen. Zo heeft Straw Jet Inc., een bedrijf gevestigd in Oregon in de Verenigde Staten, een machine ontwikkeld die het stro verzamelt en extrudeert in gebundelde strengen met een diameter van 5 cm. De kabels worden verdicht door compressierollen en vervolgens strak samengebonden met touw. Daarna kunnen ze op eender welke lengte afgesneden worden. Als toepassing in de bouwsector worden de afzonderlijke kabels gebundeld per vier (Hex) of per 7 (Quads) strengen die gestapeld kunnen worden of via een tand-en-groefstelsel kunnen worden omsloten. Dit systeem wordt afgebeeld op figuur 15. Bovendien kan er centraal in de bundels een technische koker worden geïntegreerd voor leidingen (Hebel et al., 2014).

De strostengels kunnen ook onder hogere druk worden samengeperst tot plaatmaterialen met een hogere dichtheid. Een voorbeeld hiervan zijn de E-Boards van Enviro Board Corporation uit New Jersey, Verenigde Staten. In de fabriekshal van dit bedrijf worden ronde strobalen afgerold en rechtstreeks gevoed in de productielijn waar een computergestuurde drukpers de strostengels samendrukt in panelen met een dichtheid van circa 300 kg/m³. Vervolgens wordt hier een waterdichte papierlaag aan toegevoegd. Deze panelen worden toegepast in combinatie met een licht stalen wandframesysteem dat modulair is en off-site geprefabriceerd kan worden. Ze worden voornamelijk gebruikt als (akoestisch) isolerend bouwcomponenten in magazijnen, supermarkten, kantoorgebouwen, etc. (Hebel et al., 2014).

Ook het Duitse bedrijf Stropoly produceert bouwelementen uit stro met een hoge dichtheid. Door platen met een verschillende dichtheid tussen 300 en 600 kg/m³ te combineren, ontstaat er een sandwichstelsel dat zowel dragende als isolerende eigenschappen bezit. Beide toepassingen vragen wederom om bijkomende maatregelen tegen vocht (Hebel et al., 2014).

Tot slot kunnen strostengels ook, naast een verhoogde dichtheid, bijkomend worden blootgesteld aan hitte. Dit zorgt ervoor dat het zetmeel, dat als glucosestrengen in de biomassa van stro vevat zit, vrijkomt en dienstdoet als een natuurlijke lijm. Ook op deze manier kunnen er zonder de toevoeging van bijkomende synthetische producten panelen worden bekomen die kunnen worden ingezet in de bouwsector. Zo produceert Strawtec Building Solutions in Duitsland dragende wandcomponenten met uitstekende akoestische en brandwerende eigenschappen. De panelen, weergegeven op figuur 16, kunnen door te boren en te schroeven aan elkaar bevestigd worden (Hebel et al., 2014).

3.2.2.2. Verdichting d.m.v. micro-organismen

Aangezien stro een vezelmateriaal is dat onder andere is opgebouwd uit cellulose, kan het ook dienst doen als substraatmateriaal bij de productie van gekweekte regeneratieve materialen. Deze cellulose kan namelijk door verschillende paddenstoelvormende schimmels worden omgezet in glucose waardoor hun sporen kunnen uitgroeien tot draadvormige cellen, hyfen genaamd. Na verloop van tijd en onder de juiste omstandigheden ontstaat er een netwerk dat het mycelium vormt (Meyer et al., 2020). Doordat men dit draadvormige netwerk in theorie kan laten groeien in eender welke mal, is er een grote verscheidenheid aan toepassingen mogelijk. Solide, ecologische bouwblokken met thermisch en akoestisch isolerende eigenschappen zijn daar een voorbeeld van. Het is echter een vrij recente techniek die nog heel wat onderzoek vereist (Janssens et al., 2017). Onder andere Elise Elsacker, doctoraatsstudente en medeoprichtster van het platform GLIMPS.bio, doet in haar publicaties het potentieel van bouwmaterialen uit mycelium uit de doeken. In haar onderzoek (Elsacker, Peeters, et al., 2019; Elsacker et al., 2021) worden weliswaar vaker hennepscheven gebruikt als substraatmateriaal in plaats van stro, al blijkt dat ook dit potentieel heeft als basis voor isolerende myceliumblokken. Het type vezel en de toestand van de vezel (los, gehakseld, vooraf samengedrukt, etc.) hebben echter een invloed op het groeiproces en de specifieke materiaaleigenschappen achteraf. (Elsacker, Vandelook, et al., 2019).

Het in New York gevestigde bedrijf Ecovative Design gebruikte mycelium initieel als basis voor de productie van isolerende bouwelementen ter vervanging van synthetische schuimen. Met de opstart en uitbereiding van hun productassortiment is hun focus echter verschoven naar verpakkingscomponenten en andere toepassingen van mycelium maar het productieproces is vergelijkbaar (Hebel et al., 2014). Op figuur 17 kan hier een voorbeeld van teruggevonden worden. De vezels worden vooraf bevochtigd met gedemineraliseerd water en gesteriliseerd in een autoclaafmachine zodat het substraat inert wordt. Onder steriele omstandigheden wordt hier vervolgens het startende mycelium in geïmpregneerd. Alles wordt goed vermengd en vervolgens in mallen overgebracht die zuurstof doorlaten en achteraf hergebruikt kunnen worden. Daarna wordt het mycelium gedurende 20 tot 30 dagen in een donkere ruimte geplaatst met een constante temperatuur tussen 25 en 27 °C en een continue vochtigheidsgraad van circa 80 % waar het exponentieel zal toenemen. Wanneer het netwerk van myceliumdraden de mal volledig heeft ingevuld, wordt de zwam uit haar mal verwijderd. De groei van het mycelium wordt dan stopgezet door het resultaat in een oven te plaatsen die voorverwarmd is tot 70 °C. Hierdoor wordt het materiaal inert en hoeft men in de toekomst niet te vrezen voor verdere schimmelvorming. Het resultaat is een solide blok met isolerende eigenschappen en een behoorlijke sterkte door de aanwezigheid van het vezelmateriaal (Janssens et al., 2017).

Ecovative Design gebruikte deze techniek gebaseerd op de werking van mycelium bij de bouw van het Tiny Mushroom House. Het mycelium werd bij dit project gegroeid tussen houten planken. Dit resulteerde in een sterke, luchtdichte wandstructuur met

uitstekende isolerende eigenschappen (Hebel et al., 2014).

Een ander voorbeeld is de Hy-Fy toren die in 2014 werd opgetrokken op het binnenplein van het Museum of Modern Art in Long Island City, New York. Voor dit project werden mycelium bakstenen gegroeid met maïsstengels als substraatmateriaal. Bij wijze van statement werd de toren na de tentoonstelling afgebroken en volledig gecomposteerd (Hebel et al., 2014).

3.2.3. PRAKTISCHE TOEPASSING EN CONSTRUCTIEVE DETAILLERING

Afhankelijk van de toepassingen van stro kunnen de bouwmaterialen andere eigenschappen vertonen. Bij zo goed als alle toepassingen die besproken werden dient men waakzaam te zijn voor vocht (Hebel et al., 2014). Doordat stro een organisch materiaal is, is het gevoelig voor schimmelvorming en degradatie bij bepaalde vochtigheidsgraden. Het is dan ook erg belangrijk dat het stro voldoende droog is alvorens het in balen of strengen wordt geperst en later verwerkt wordt. De vochtinhoud van een strobaal mag bijvoorbeeld niet hoger liggen dan 15%. Ook tijdens het transport, de opslag en het verwerken van de bouwmaterialen uit stro dienen deze voldoende droog gehouden te worden (Janssens & Alderweireldt, 2016).

Deze vochtgevoeligheid vraagt ook extra oplettendheid bij het detailleren van de aansluiting tussen wandconstructies en funderingen enerzijds en het dak anderzijds. Zo mag stro niet in aanraking komen met de grond maar ook niet met vloerplaten om blootstelling aan poetsvocht en lekkages te vermijden. Daarnaast moeten de stro-elementen ook minstens 30 cm boven het maaiveld geplaatst worden in verband met opspattend regenwater. Bij de aansluiting met het dak met er voldoende oversteek worden voorzien zodat regenwater niet de kans krijgt om langs boven de wand in te sijpelen (Post, 2013).

Daarnaast speelt ook de afwerking van de bouwmaterialen uit stro vaak een belangrijke rol. Door bijvoorbeeld aan beide zijden van een wandconstructie uit strobalen een pleisterlaag toe te voegen, kan er een brandweerstand van 90 minuten bekomen worden en wordt de constructie bijkomend beschermd tegen ongedierte (Gernot & Friedemann, 2005). Aan de buitenzijde kan dit een kalkpleister zijn die de wand beschermt tegen vocht. Aan de binnenkant van de constructie kan men opteren voor een leempleister (Post, 2013). Daarnaast kunnen er ook bijkomende elementen aan de wandopbouw worden toegevoegd om het architecturale karakter van de constructie te wijzigen. Wel is het vaak van belang dat het geheel dampopen blijft zodat er geen condensatie ontstaat in de wand omwille van dampspanning. Een geventileerde houtafwerking of een minerale verflaag vormen echter geen probleem (Post, 2013).

3.3. STRO ALS REGENERATIEF BOUWMATERIAAL

3.3.1. KENMERKENDE EIGENSCHAPPEN VAN STRO ALS REGENERATIEF BOUWMATERIAAL

Aan de hand van de kenmerkende eigenschappen van regeneratieve bouwmaterialen die in hoofdstuk 1 aan bod kwamen, wordt in deze paragraaf onderzocht waarom de reeds vermelde toepassingen van stro als regeneratief bestempeld kunnen worden.

Zoals beschreven aan het begin van dit hoofdstuk vormt stro een restproduct uit de landbouw en bestaat het uit de gedroogde stengels van graanplanten. In de publicatie van Van der Velde & Van Leeuwen (2019) wordt stro gecategoriseerd als 'biobased bouwmaterialen' aangezien het om een nagroeibare grondstof gaat die van organische oorsprong is. Volgens de formulering van Hebel & Heisel (2017) en Rovers (2018) kunnen ook begrippen als 'gecultiveerd' en 'hergroeibaar' aangewend worden om stro als bouw materiaal te omschrijven. Men kan dus besluiten dat het behoort tot de eerst groep regeneratieve bouwmaterialen die in paragraaf 1.1.2. besproken werden. Aangezien de meeste graanplanten jaarlijks geoogst worden, heeft stro als grondstof een groeiperiode van een jaar (Gernot & Friedemann, 2005; Post, 2013).

Gedurende de groei van de graanplaat wordt er CO₂ opgeslagen door middel van fotosynthese. Strostengels zijn namelijk opgebouwd uit 36,5% cellulose 17,8% lignine en 28,6% hemicellulose, waarvan de eerste twee respectievelijk zo'n 44,4% en 66,6% koolstof bevatten. In een strobaal wordt er via cellulose en lignine zo gemiddeld 1,35 kg CO₂/kg opgeslagen (Sodagar et al., 2011). Wanneer men weet dat het gewicht van een gemiddelde rechthoekige strobaal met afmetingen van ongeveer 480 x 360 x 800 mm (B x H x L) tussen de 10 en 15 kg bedraagt (Post, 2013), kan men besluiten dat er per baal tussen de 13,5 en 20,25 kg CO₂ wordt opgeslagen.

Daarnaast is stro biologisch afbreekbaar. Cellulose, één van de hoofdbestanddelen van de strostengels, bestaat bijvoorbeeld uit een lange keten van glucosemoleculen die met elkaar gelinkt zijn door glycosidebindingen. Deze simpele structuur maakt dat het biologisch afbreekbaar is (Ghaffar, 2020).

3.3.2. KRITISCHE REFLECTIE BIJ DE GRONDSTOFKRINGLOOP VAN STRO ALS REGENERATIEF BOUWMATERIAAL

In deze paragraaf volgt er een kritische reflectie bij de grondstofkringloop van stro als regeneratief bouwmaterialen. Deze worden wederom overlopen aan de hand van de verschillende elementen van de biogebaseerde waardeketen (D'Haese et al., 2013) die in paragraaf 2.3.1. aan bod kwamen. Per fase worden de aandachtspunten, bedreigingen en kansen met betrekking tot de circulariteit van stro als regeneratieve bouwmaterialen verkend. Er worden ook een aantal suggesties gedaan die nog bijkomend onderzoek vereisen en voor discussie vatbaar zijn.

3.3.2.1. Teelt

Uit de economische beschouwing bij de graanteelt van 2017 (Lamont, 2018) blijkt dat de graanopbrengst per hectare de laatste jaren erg is toegenomen. De opbrengststijging die men nu nog mag verwachten is minder hoog aangezien zaadselectiebedrijven op basis van realiseerbare omzetcijfers mogelijks eerder zullen investeren in de akkerbouwteelten van andere gewassen.

Het verbruik van granen zal echter toenemen dooreen stijgende wereldbevolking. Door de beperkte mogelijkheden naar areaaluitbreiding op beschikbare gronden zal de algemene groei van de graansector eerder beperkt blijven. Het aantal slechte oogstjaren stijgt bovendien door de gevolgen van de klimaatverandering. Dit zorgt voor extreme prijsschommelingen op de internationale graanmarkt (Lamont, 2018). Ook de prijs voor tarwestro is de laatste jaren spectaculair gestegen. Dit is te wijten aan een stijgende vraag en een lager aanbod door strenge winters en droogte (Van Liere, 2018).

Wanneer we de mogelijkheden naar areaaluitbreiding in Vlaanderen beschouwen, kunnen we bemerken dat in 2018 zo'n 36% van de benutte oppervlakte van de Vlaamse landbouwgrond wordt ingenomen door tijdelijke weiden en blijvende graslanden (Vandevenne, 2019). Deze staan, net als de voeder gewassen, in teken van de veeteelt. Maar deze veeteelt levert maar 20% van de voedingsstoffen op die door de mens worden verbruikt (Van Hattum, 2020).

Doordat graan ook rechtstreeks kan dienen voor menselijke consumptie onder de vorm van baktarwe (Lamont, 2018), kan men zich vragen stellen bij het gebruik van tarwe als veevoeder en de veeteelt an sich. Deze sector is in Vlaanderen namelijk een belangrijke producent van bepaalde luchtverontreinigende stoffen en broeikasgassen. De land- en tuinbouwsector in Vlaanderen is verantwoordelijk voor 95% van de totale uitstoot van ammoniak (NH₃) waarvan 86% toe te schrijven valt aan de veeteelt. Dit draagt bij tot de verzuring van het milieu. Ook in de emissie van methaan (CH₄) heeft de land- en tuinbouwsector een aandeel van 75%. Wederom kan dit grotendeels worden toegeschreven aan de veeteelt door de verteringsprocessen van voornamelijk runderen en varkens alsook de opslag van mest (De Potter, 2020). Methaan is verantwoordelijk voor ongeveer 20% van het broeikaseffect en heeft een "opwarmend vermogen" dat 25 keer hoger is dan CO₂ (Van Weele, 2020). Ook lachgas of distikstofoxide (N₂O), een broeikasgas met een "opwarmend vermogen" dat 298 keer hoger is dan CO₂, komt vrij bij onder andere de mestproductie en -opslag van grazende dieren en is zo verantwoordelijk voor 6% van het broeikaseffect (Dienst Klimaatverandering, n.d.). Waar de emissies van ammoniak en lachgas gedaald zijn sinds 2000, kent de uitstoot van methaan in Vlaanderen een lichte stijging sinds 2008 (De Potter, 2020).

Om een vermindering van luchtverontreinigende stoffen en broeikasgassen zoals ammoniak, methaan en lachgas te bekomen, zou men bij de gemengde akkerbouw/veeteelt bedrijven een afname van de veestapel kunnen doorvoeren. Hierdoor kan het stro, dat nu vaak laagwaardig wordt toegepast als stalstrooisel, gevaloriseerd

worden voor andere toepassingen zoals regeneratieve bouwmaterialen. Men zou ook kunnen stellen dat er op die manier meer grond ter beschikking komen en dat men aan areaaluitbreiding kan doen, maar hier dient een kanttekening bij gemaakt te worden. Zo leggen blijvende graslanden waar het vee op graast organische koolstof vast in de bodem en zijn ze bepalend voor het voortbestaan van natuurwaarden in het landbouwgebied (Vandevenne, 2019).

Aangezien stro ook een belangrijk marktproduct vormt en een aanzienlijke bonus kan opleveren voor de graanteler, zou men kunnen concluderen dat het ook voor de zuivere akkerbouwbedrijven aangewezen is om langere tarwevariëteiten te telen. Zo kan graan en bijgevolg ook stro als grondstof optimaal benut worden.

Daarnaast zouden graantelers ook kunnen teruggrijpen naar de innovaties die eerder in deze scriptie aan bod kwamen. Hoewel men voorspelt dat de graanopbrengst per hectare in de toekomst niet meer zo snel zal stijgen aangezien die nu al op een hoog niveau ligt, zouden graantelers echter een hogere rendabiliteit kunnen creëren door in te zetten op andere soorten gewassen. Zo laat zomergraan bijvoorbeeld de techniek van het valse zaaibed toe waardoor het onkruid makkelijker te beheersen valt en minder herbiciden moeten worden toegepast. Zomertarwe wordt in Vlaanderen nu slechts toegepast als areaalvullers bij een mislukte najaarszaai van bijvoorbeeld wintertarwe (Lamont, 2018).

Daarnaast schuilt er voor graantelers ook potentieel in de omschakeling naar meerjarige gewassen. Deze worden gekenmerkt door hun vermogen om na de oogst terug te groeien en hebben bovendien ook heel wat economische voordelen zoals reeds eerder in deze scriptie aan bod kwam. De belangrijkste strategieën die worden gebruikt om nieuwe meerjarige gewassen te ontwikkelen, zijn domesticatie van wilde meerjarige graansoorten en interspecifieke hybridisatie tussen eenjarige gewassen en meerjarige relatieve soorten. Interspecifieke hybridisatie wordt verkozen boven directe domesticatie omdat het de meerjarige groeiwijze combineert met de kwaliteit van het eenjarige graangewas. Ook laat deze methode het toe om in een kortere tijd meerjarige gewassen te ontwikkelen. Een voorbeeld hiervan is de interspecifieke hybridisatie tussen meerjarige tarwegrassen en tarwe (Cui et al., 2018).

Ook de omschakeling in typologie van een monocultuur naar een polycultuur zou de graansector voordelen kunnen opleveren. In een langetermijn-systeemexperiment van de Universiteit van Wageningen waarin men op zoek gaat naar meer weerbare productiesystemen wordt onder andere tarwe ingezet als gewas binnen het systeem van strokenteelt. Het wordt gepaard met kool en vervolgens onderworpen aan verschillende strokenbehandelingen. Het onderzoek loopt tot einde 2023 en beoogt een netwerk strokenteelt op te richten specifiek voor landbouwers (WUR, n.d.).

3.3.2.2. Primaire raffinage

Wanneer het stro voldoende droog is, wordt het tegenwoordig vaak met zware machines geperst in grote ronde balen. De kleinere rechthoekige balen kunnen, afhankelijk van de toepassing, echter meer geschikt zijn in de bouwsector. Kleinere machines om de stobalen te persen sluiten ook meer aan bij kleinschaligere landbouw waardoor bodemverdichting kan worden tegengegaan (Van Hattum, 2020).

3.3.2.3. Secundaire raffinage

Het verwerken van organische grondstoffen zoals stro tot bouwmaterialen betreft nu slechts een niche in de bouwsector (Van der Velde & Van Leeuwen, 2019). In een aantal publicaties wordt strobalebouw gelinkt aan een 'geitenwollesokken-' of primitief imago (BAS Bouwen, 2020; Ghaffar, 2020). Een low-tech product zoals stro gaat vaak in tegen de perceptie van professioneel, kwaliteitsvol en hoge prestaties die gelinkt wordt aan hoogtechnologische innovaties. Deze veronderstellingen zijn vaak onterecht (BAS Bouwen, 2020) en getuigen eerder van een gebrek aan kennis (Van der Velde et al., 2021).

3.3.2.4. Eindproduct

Het valt op dat de huidige toepassingen van stro in de meeste gevallen reeds bijdragen aan een gesloten kringloop. Doordat stro veelal rechtstreeks als bodemverbeteraar of onrechtstreeks als stalmest terugkeert naar de bodem, zorgt het ervoor dat het organische koolstofgehalte wordt aangesterkt. Aangezien bodems met een hoog organisch stofgehalte koolstof vasthouden, maakt stro op deze manier ook deel uit van de oplossing van het klimaatprobleem (Lamont, 2018).

Hebel et al. (2014) stellen in hun publicatie dan ook voor om stro te abstraheren van zijn huidige kringloop wanneer het wordt toegepast als bouw materiaal. In plaats van het onmiddellijk terug te laten keren naar de bodem, wordt het eerst voor een langere periode gebruikt als grondstof in de bouwsector. Wanneer een gebouw aan het einde van zijn levensduur ontmanteld wordt, kan het stro dan zijn oorspronkelijke grondstofkringloop hervatten en terugkeren naar de bodem als bodemverbeteraar. Doordat het stro dan voor een langere termijn wordt toegepast in de bouwsector, blijft het CO₂ dat initieel door de graanplant werd opgenomen langduriger opgeslagen.

3.3.2.5. Afvalverwerking en logistiek

Wanneer een gebouw omwille van wijzigede sociale, functionele, economische of culturele standaarden van individuele gebruikers en de maatschappij of omwille van de technische levensduur van materiaalcomponenten niet meer aan de vooropgestelde eisen kan beantwoord, kan men ervoor opteren om gebouwelementen of het volledige gebouw te demonteren. Het is van belang dat dit gebeurt op een circulaire manier zodat de waarde van materialen en componenten steeds zo hoog mogelijk blijft. De ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen van de OVAM (2015) die eerder in deze scriptie aan bod kwamen, kunnen hierbij een belangrijke rol spelen. Regeneratieve bouwmaterialen zoals stro behoren in oorsprong tot de biologische kringloop aangezien ze biologische afbreekbaar zijn. Ze dienen dus strikt gescheiden te worden van de traditionele materialen die behoren tot de technische kringloop. Tegen 31 december 2023 zijn alle lidstaten van de Europese Unie verplicht om bioafval van bedrijven en huishoudens aan de bron te scheiden of selectief in te zamelen en te recyclen (Braekevelt et al., 2020).

Deze selectieve inzameling is van belang opdat er weederom kan ingezet worden op de hoogwaardige valorisatie van de resterende biomassa. Vanuit het standpunt van koolstofopslag en grondstoffenefficiëntie zou het interessant kunnen zijn om de verschillende toepassingen van stro als regeneratief bouw materiaal met elkaar te linken. Zo lijkt het mogelijk om bijvoorbeeld stro dat eerst in mindere mate mechanisch verdicht werd in een later stadium te hergebruiken om met een hogere densiteit samen te persen. Door middel van blootstelling aan hitte zouden nadien zelfs nieuwe componenten verkregen kunnen worden waarbij het zetmeel dient als natuurlijk bindmiddel. Een andere piste zou kunnen zijn dat men mechanisch verdichte strovezels een nieuw leven geeft als substraatmateriaal voor de groei van nieuwe componenten uit mycelium. Ook op die manier wordt de kringloop van tarwestro als grondstof bijkomend verlengd. Dit zijn echter denkpijpen die verder onderzoek vereisen.

Reststromen kunnen ook interessant zijn voor de biogebaseerde industrie als bron van suikers, eiwitten, vetten en vezels. Daarnaast kan het bioafval ook worden ingezet in vergistingsinstallaties voor biogaswinning. Let wel dat deze het sluiten van de grondstofkringloop van stro compliceren.

Op het einde van zijn levenscyclus kunnen de toepassingen van stro, indien ze niet vermengd zijn met elementen uit de technische kringloop of schadelijke additieven, eenvoudig terugkeren naar de landbouwgrond. Door de vezels, die verdicht werden door middel van mechanische compressie of door middel van fungi, terug te verhakselen tot los materiaal, wordt het contactoppervlak met de vezels vergroot. Op die manier kunnen de strovezels bijdragen aan de vruchtbaarheid van de grond doordat nutriënten eenvoudig kunnen terugkeren naar de bodem. Daardoor is er minder nood aan kunstmeststoffen en wordt een evenwichtig bodemleven gestimuleerd. Bovendien neemt zo ook het organisch koolstofgehalte in de bodem toe, dat daar wederom langdurig opgeslagen blijft en zo dus een deel uitmaakt van de klimaatproblematiek. Bijgevolg wordt de kringloop van stro als regeneratieve bouw materiaal gesloten.

MASTERPROJECT



Figuur 18: Masterproject (eigen archief)

De kennis die vergaard werd bij het schrijven van deze thesis werd toegepast op een masterproject in het kader van de ontwerpstudio 'Degrowth'. Het thema 'The Architecture of Degrowth' werd geleend van de Architectuurtriënnale van Oslo in 2019 waar men het huidige economische groeimodel in vraag stelde en op zoek ging naar opportuniteiten binnen de architectuur (Hernández, 2019).

De **locatie** van de ontwerpstudio is het bedrijventerrein van Steinzeug-Keramo NV dat gesitueerd is in de Paalsteenstraat te Hasselt, vlak naast het Albertkanaal. De site vormt vaak een blinde vlek op planningsdocumenten van de stad Hasselt (Boeckx & Berben, persoonlijke communicatie, 2020). Uit verschillende analyses en onder andere een interview met een werknemer van Steinzeug-Keramo kon men concluderen dat het terrein gekenmerkt wordt door een inefficiënt ruimtegebruik: heel wat gebouwen staan leeg en ook de inplanting zorgt soms voor conflicten (Scheurs, D., persoonlijke communicatie, 2021). Zo wordt het laden en lossen aan het kanaal bemoeilijkt door de aanwezigheid van een fietssnelweg. Ook zorgt de ligging van de loodsen ervoor dat er weinig connectie is tussen de voorzone aan het kanaal en de meer centrale zone waar goederen gestockeerd worden.

Als reactie hierop werd er in groepsverband een **masterplan** opgesteld dat inzet op de bestaande landschapsstructuren en deze versterkt. Op die manier kunnen conflicten weggewerkt worden. Het masterplan gaat bijgevolg uit van een voortzetting van de industrie aan het Albertkanaal, maar de industriële activiteiten worden hierbij aangesterkt. In het individuele project, dat voortkomt uit dit masterplan en ondersteund wordt door het onderzoek in deze scriptie, werd er op zoek gegaan naar een manier om de leegstand in de hallen te herbestemmen en het bestaande bedrijventerrein optimaal te faciliteren.

In eerste instantie werd er een nieuwe **logistieke as** geïntroduceerd. Door middel van een kraanbaan kunnen goederen efficiënt getransporteerd worden tussen het kanaal, de industriële loodsen en de stockageplaats aan de binnenzijde van het industrieterrein. Ook wordt er op die manier voorzien in het transport van energie, de afwatering van de bestaande loodsen, etc. Bovendien moet de fietssnelweg parallel met het kanaal hierdoor minder ingrijpend onderbroken worden. Deze logistieke ader vormt de basis voor nieuwe industrie in de bestaande loodsen die gezamenlijk gebruik kunnen maken van deze structuur.

De nieuwe industrie die aan het bedrijventerrein wordt toegevoegd, hangt nauw samen met de thematiek van deze scriptie. Er wordt namelijk gefocust op het creëren van **ecocluster** waarbij er door samenwerkingsverbanden tussen bedrijven ingezet kan worden op hoogwaardige valorisatie van grondstoffen. Dit was één van de opportuniteiten die voortkwam uit de kritische reflectie bij hoofdstuk 2. Door grondstoffen en afvalstromen collectief in te zamelen en op te halen kunnen efficiënter worden ingezet en kunnen ook verschillende reststromen worden uitgewisseld. Zo kan er industriële symbiose tot stand komen waarbij grondstoffen, energie, werktuigen en

installaties, ruimte, etc. uitgewisseld kunnen worden (OVAM, z.d.).

Zo zou de nieuwe industrie bijvoorbeeld gebaseerd kunnen zijn op de hoogwaardige valorisatie van stro als grondstof voor regeneratieve bouwmaterialen. De productie van verschillende eindproducten zoals geprefabriceerde elementen uit strobalen, plaatmaterialen vervaardigd uit stro, bouwblokken uit mycelium met stro als substraatmateriaal, etc. zou in de bestaande loodsen ondergebracht kunnen worden. Voorbeelden van bedrijven gespecialiseerd in deze toepassingen werden aangehaald in paragraaf 3.2.2. Doordat zo'n bedrijven geclusterd worden, kunnen er samenwerkingsverbanden ontstaan en kunnen reststromen uitgewisseld worden.

Ook met de bestaande industrie van Steinzeug-Keramo NV kunnen er synergiën ontstaan. Het bedrijf produceert rioleringsbuizen uit klei en beschikt onder andere over droogkamers en hoogovens. De restwarmte hiervan kan uitgewisseld worden en de ook de droogovens zouden opnieuw kunnen worden ingezet voor bijvoorbeeld de productie van elementen uit mycelium. Het drogen van kleibuizen en het inert maken van myceliumblokken gebeurt namelijk beide bij een temperatuur van 70 °C.

Om deze samenwerkingsverbanden te faciliteren zijn er uiteraard nog heel wat andere programmatorische vereisten. Ook kantoorruimtes, personeelsruimtes, vergaderzalen, labo's, etc. lijken noodzakelijke aanvullingen bij de bestaande loodsen. Om onderdak te bieden aan deze functies wordt er een bijkomende **structuur** gecreëerd boven op de kraanbaan van de logistieke as. Hierdoor wordt de footprint van de ingreep beperkt. De structuur wordt vormgegeven aan de hand van een intelligent skelet met een meer permanent karakter en invulelementen die een meer tijdelijke aard hebben. Zo ontstaat er een flexibele, aanpasbare structuur volgens de ontwerpstrategieën van OVAM (2015) waar bedrijven en startups kunnen uitbreiden en krimpen waar nodig.

De invulelementen worden zelf ook opgetrokken uit regeneratieve bouwmaterialen. Deze kunnen bij wijze van spreken lokaal geproduceerd worden in de loodsen zodat er een metabolistische architectuur ontstaat. De vormgeving van de structuur gebeurt dan ook met bijzondere aandacht voor de constructieve detaillering van regeneratieve materialen. In paragraaf 3.2.3. werden deze besproken voor stro als regeneratief bouw materiaal. Zo is er bijvoorbeeld een overhang voorzien bij de structuur opdat de materialen bijkomend beschermd worden voor vocht. Doordat de structuur op de logistieke as wordt geplaatst, vormt deze ook een waterbestendige plint. Zo wordt er ontworpen vanuit de materiaaleigenschappen en -sterktes van regeneratieve materialen.

Tot slot wordt er ook bijzondere aandacht gevestigd aan het **publieke karakter** van de ingreep. In de kritische reflectie bij hoofdstuk 2 werd het algemeen gebrek aan kennis over regeneratieve bouwmaterialen toegelicht. Ook de mentaliteitswijziging die nodig is in verband met het consumeren van producten en de wegwerpcultuur kwam aan bod als aandachtspunt. De structuur werd dan ook deels publiek toegankelijk gemaakt. Er werden doorzichten in de bestaande loodsen voorzien die industriële verwerkingsprocessen zichtbaar maken en op die manier kunnen bijdragen aan de bewustwording van grondstofkringloop achter producten. Ook werden er ruimtes voor workshops, lezingen, toonmomenten etc. voorzien waar kennisdeling centraal staat.

BIBLIOGRAFIE

Arnoldussen, J., Errami, S., Semenov, R., Roemers, G., Blok, M., Kamps, M., & Faes, K. (2020). Materiaalstromen, milieu-impact en energieverbruik in de woning- en utiliteitsbouw. EIB, Metaboic, SGS Search. <https://www.sgssearch.nl/over-search/search-in-de-media/materiaalstromen-bouw-in-kaart-gebracht.html>

Attia, S. (2016). Towards regenerative and positive impact architecture: A comparison of two net zero energy buildings. *Sustainable cities and society*, 26, 393-406. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.017>

Attia, S. (2018). *Regenerative and Positive Impact Architecture*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66718-8>

BAS Bouwen. (2020). Bouwen met stro. (Ruwbouw: Bio-ecologisch bouwen, Issue. VIBE. https://www.vibe.be/wp-content/uploads/2020/03/IGB428-Strobalenbouw_watermerk.pdf

Bennich, T., & Belyazid, S. (2017). The Route to Sustainability: Prospects and Challenges of the Bio-Based Economy. *Sustainability*, 9(6), 887. <https://doi.org/10.3390/su9060887>

Benyus, J. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired By Nature*. Morrow.
Braekevelt, A., Vanaken, N., & Roels, K. (2020). Actieplan voedselverlies en biomassa(rest)stromen circulair 2021-2025. OVAM. <https://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Actieplan%20voedselverlies%20en%20biomassa%28rest%29stromen%20circulair%202021-2025.pdf>

Cambier, C., Elsen, S., Galle, W., Herthogs, P., Lanckriet, W., Poppe, J., Tavernier, I., & Vandervaeren, C. (2019a). Gebouwen, een dynamische omgeving. (Bouwen voor een circularie economie, Issue. VUB Architectural Engineering. [https://www.vub.be/arch/files/dynamic_environment/VUB%20Architectural%20Engineering%20-%20Dynamische%20Omgeving%20\(2019.12\).pdf](https://www.vub.be/arch/files/dynamic_environment/VUB%20Architectural%20Engineering%20-%20Dynamische%20Omgeving%20(2019.12).pdf)

Cambier, C., Elsen, S., Galle, W., Herthogs, P., Lanckriet, W., Poppe, J., Tavernier, I., & Vandervaeren, C. (2019b). Ontwerpkwaliteiten om architecten en opdrachtgevers te begeleiden en inspireren. (Bouwen voor een Circulaire Economie, Issue. VUB Architectural Engineering. [https://www.vub.be/arch/files/circular_design_qualities/VUB%20Architectural%20Engineering%20-%20Circulaire%20Ontwerpkwaliteiten%20\(2019.12\).pdf](https://www.vub.be/arch/files/circular_design_qualities/VUB%20Architectural%20Engineering%20-%20Circulaire%20Ontwerpkwaliteiten%20(2019.12).pdf)

Carlson, B. (2007). *Principles of Regenerative Biology*. Elsevier Science & Technology.
Chaussinand, A., Scartezini, J. L., & Nik, V. (2015). Straw bale: A Waste from Agriculture, a New Construction Material for Sustainable Buildings. *Energy procedia*, 78, 297-302. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.646>

Cui, L., Ren, Y., Murray, T. D., Yan, W., Guo, Q., Niu, Y., Sun, Y., & Li, H. (2018). Development of Perennial Wheat Through Hybridization Between Wheat and Wheatgrasses: A Review. *Engineering*, 4(4), 507-513. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.003>

D'Haese, N., Nelen, D., Manshoven, S., Vanderreydt, I., Devriendt, N., & Uyttebroek, M. (2013). Verkennde studie naar de inzetbaarheid van biomassa en biomassareststromen in bioraffinageketens in Vlaanderen. OVAM. <https://www.ovam.be/sites/default/files/Inzetbaarheid%20biomassa%20en%20biomassa%20reststromen%20in%20bioraffinageketens%20in%20Vlaanderen.pdf>

De Potter, B. (2020). Uitstoot en Luchtkwaliteit in Vlaanderen - Evaluatie 2020. Vlaamse Milieumaatschappij. <https://www.vmm.be/publicaties/lucht-2020/overzicht>
De Visser, C., Sukkel, W., Kempenaar, C., Van der Wal, T., De Wolf, P., Visser, A., Smit, B., Schoorlemmer, H., Schoutsen, M., Klompe, K., Veldhuisen, B., Selin-Noren, I., Van Dijk, C., Hol, S., Van der Voort, M., & Janssens, B. (2020). Ontwerp Boerderij van de Toekomst. WUR: Wageningen University & Research. <https://www.wur.nl/nl/project/WUR-geeft-kringlooplandbouw-handen-en-voeten-op-Boerderij-van-de-Toekomst.htm>

Den Boon, T., Hendrickx, R., & Van der Sijs, N. (2015). "Regenereren". In *Groot woordenboek van de Nederlandse taal* (15 ed.). Van Dale Uitgevers. Dienst Klimaatverandering. (n.d.). De verschillende broeikasgassen. Klimaat.be. Retrieved 16/04/2021, from <https://klimaat.be/klimaatverandering/oorzaken/broeikasgassen>

du Plessis, C. (2012). Towards a regenerative paradigm for the built environment. *Building research and information : the international journal of research, development and demonstration*, 40(1), 7-22. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.628548>

Ellen McArthur Foundation. (2015). *Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>
Ellen McArthur Foundation. (2017). *Urban Biocycles*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/urban-biocycles>

Elsacker, E., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). Mycelium-based materials at the dawn of the Anthropocene. In (pp. 1083-1090). 10.1201/9781315229126-129
Elsacker, E., Søndergaard, A., Van Wylick, A., Peeters, E., & De Laet, L. (2021). Growing living and multifunctional mycelium composites for large-scale formwork applications using robotic abrasive wire-cutting. *Construction and Building Materials*, 283, 122732. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122732>

Elsacker, E., Vandeloek, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLOS ONE*, 14(7), e0213954. 10.1371/journal.pone.0213954

EPBD. (2021). EPB Productgegevens. WTCB. <https://epbd.be/nl/erkende-epb-productgegevens/>

Europese Commissie. (2018). Een schone planeet voor iedereen: Een Europese strategische langetermijnvisie voor een bloeiende, moderne, concurrerende en klimaatneutrale economie. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773>

Europese Commissie. (2019). De Europese Green Deal. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2>

Galliot, B. (2014). *Mechanisms of Regeneration*. Elsevier Science & Technology.

Gernot, M., & Friedemann, M. (2005). *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*. Birkhäuser.

Ghaffar, S. H. (2020). Wheat straw biorefinery for agricultural waste valorisation. *Green Materials*, 8(2), 60-67. <https://doi.org/10.1680/jgrma.19.00048>

Gougoulas, C., Clark, J. M., & Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. *Journal of the science of food and agriculture*, 94(12), 2362-2371. 10.1002/jsfa.6577

Hansen, K., Braungart, M., & Mulhall, D. (2013). Resource Repletion resource repletion , Role of Buildings. In *Sustainable Built Environments* (pp. 502-525). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5828-9_420

Harper Adams University. (2019). Hands Free Hectare broadens out to 35-hectare farm. Retrieved 06/03/2021, from <https://www.harper-adams.ac.uk/news/203368/hands-free-hectare-broadens-out-to-35hectare-farm>

Hebel, D., & Heisel, F. (2017). *Cultivated Building Materials : Industrialized Natural Resources for Architecture and Construction*. Walter de Gruyter GmbH.

Hebel, D., Wisniewaska, M., & Heisel, F. (2014). *Building From Waste: Recoverd materials in architecture and construction*. Birkhäuser.

Hernández, D. (2019). 2019 Oslo Architecture Triennale Announces the Programme for 'Enough: The Architecture of Degrowth. *ArchDaily*. Retrieved 13/05/2021, from <https://www.archdaily.com/917659/2019-oslo-architecture-triennale-announces-the-programme-for-enough-the-architecture-of-degrowth>

Hout Info Bois. (2021). Lorkenhout. Retrieved 28/02/2021, from <https://houtinfobois.be/nl/essences/lorkenhout/>

Janssen, A., Delem, L., Wastiels, L., & Van Dessel, J. (2016). Principes en aandachtspunten bij de keuze voor duurzame bouwmaterialen. (WTCB-Rapport 17, Issue. <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=search&id=REF00007685>

Janssens, T. (2017). Cradle-to-Cradle: Het idee leeft verder. (Ik ga Bouwen & Renoveren, Issue. VIBE. <https://www.vibe.be/algemeen/cradle-to-cradle-idee-leeft/>

Janssens, T., & Alderweireldt, D. (2016). Bouwen met stro: Gezond, goedkoop en voordelig. *Ik ga Bouwen & Renoveren*, 40-48.

Janssens, T., Vandenbroucke, M., & Van den Bosshe, G. (2017). Zwammen: het bouw materiaal van de toekomst? (Ik ga Bouwen & Renoveren, Issue. VIBE.

Knapen, E., Janssens, B., Vandoren, B., Claes, I., & Neelen, N. (2020). *Kalkhenneep: Ontwerp- en uitvoeringsondersteuning*. UHasselt, Pixii, WTCB.

Koster, M., Schrotenboer, I., Van der Burgh, F., Dams, B., Jacobs, L., Versele, A., & Verdoodt, S. (2020). Vijf bouwstenen voor succesvolle circulaire biobased bouwinitiatieven. (White paper, Issue. CBCI.

Lamont, J. L. (2018). Economische beschouwingen bij de graanteelt. Landbouwcentrum Granen Vlaanderen. https://www.lcg.be/wp-content/uploads/2020/04/Econ_besch_graanteelt_2016-2017.pdf

Lyle, J. T. (1994). *Regenerative design for sustainable development*. John Wiley & Sons.

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.

Meyer, V., Basenko, E. Y., Benz, J. P., Braus, G. H., Caddick, M., Csukai, M., de Vries, R. P., Endy, D., Frisvad, J. C., Gunde-Cimerman, N., Haarmann, T., Hadar, Y., Hansen, K., Johnson, R. I., Keller, N., Krasevec, N., Mortensen, U. H., Perez, R., Ram, A. F. J., Record, E., Ross, P., Shapaval, V., Steiniger, A., van den Brink, H., van Munster, J., Yarden, O., & Wösten, H. A. B. (2020). Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper. *Fungal biology and biotechnology*, 7(1), 1-23. 10.1186/s40694-020-00095-z

Morseletto, P. (2020). Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *Journal of industrial ecology*, 24(4), 763-773. <https://doi.org/10.1111/jiec.12987>

Nelissen, V., Van Daele, S., Verdonck, P., Reheul, D., Pardon, P., & Reubens, B. (2017). *Teeltechnische impact agroforestry. Agroforestry Vlaanderen*.

NWE. (2019). UP STRAW: Urban and Public Buildings in Straw. Retrieved 18/04/2021, from <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/up-straw-urban-and-public-buildings-in-straw/>

OECD. (2018). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>

OVAM. (2015). 24 Ontwerprichtlijnen voor Veranderingsgericht Bouwen. <https://www.ovam.be/ontwikkeling-integratie-evaluatiekader>

OVAM. (2019). Afvalcijfers 2018 bevestigen positieve tendensen maar beklemtonen noodzaak aan meer en betere selectieve inzameling. https://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Persbericht_afvalstoffencijfers2018_20122019.pdf

OVAM. (z.d.). Ecoclusters: bedrijven werken samen. Retrieved 13/05/2021, from <https://www.ovam.be/ecoclusters-bevordering-van-industriële-symbiose>

Pauli, G. (2010). Blue Economy - 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs. Paradigm Pubns.

Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., Weiss, M., Wicke, B., & Patel, M. K. (2013). Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Resources, conservation and recycling*, 73(April 2013), 211-228. 10.1016/j.resconrec.2013.02.006

Peng, W., Pukkala, T., Jin, X., & Li, F. (2018). Optimal management of larch (*Larix olgensis* A. Henry) plantations in Northeast China when timber production and carbon stock are considered. *Annals of Forest Science*, 75(2), 63. 10.1007/s13595-018-0739-1

Post, M. (2013). Bouwen met stro : Nederlandse huizen van ecologisch materiaal. Aeneas.

Raworth, K. (2019). Donuteconomie: in zeven stappen naar een economie voor de 21e eeuw. Nieuw Amsterdam.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., III, Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., & Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and society*, 14(2), 32. <https://doi.org/10.5751/es-03180-140232>

Romano, A., Bras, A., Grammatikos, S., Shaw, A., & Riley, M. (2019). Dynamic behaviour of bio-based and recycled materials for indoor environmental comfort. *Construction & building materials*, 211, 730-743. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.126>

Rovers, R. (2018). Gebroken Kringlopen: Naar een volhoudbaar gebruik van bronnen. Eburon.

Sodagar, B., Rai, D., Jones, B., Wihan, J., & Fieldson, R. (2011). The carbon-reduction potential of straw-bale housing. *Building research and information : the international journal of research, development and demonstration*, 39(1), 51-65. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.528187>

Statbel. (2020). Twee derde van het Belgisch grondgebied bestaat uit landbouwgrond en bos. Belgische Federale Overheidsdienst. Retrieved 14/04, from <https://statbel.fgov.be/nl/themas/leefmilieu/grond/bodemgebruik>

Statistiek Vlaanderen. (2020). Landbouwareaal. Vlaamse Overheid. Retrieved 14/06, from <https://www.statistiekvlaanderen.be/nl/landbouwareaal>

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. 10.1126/science.1259855

Tempelaars, R., Kinable, D., Verheij, B., & Waszink, V. (2020a). "Wintertarwe". In ANW: Algemeen Nederlands Woordenboek. Instituut voor de Nederlandse taal. <http://anw.ivdnt.org/article/wintertarwe>

Tempelaars, R., Kinable, D., Verheij, B., & Waszink, V. (2020b). "Zomertarwe". In ANW: Algemeen Nederlands Woordenboek. Instituut voor de Nederlandse taal. <http://anw.ivdnt.org/article/zomertarwe>

Van Dam, J., & Van den Oever, M. (2019). Catalogus biobased bouwmaterialen. (Groene Grondstoffen, Issue. WFBR: Wageningen Food & Biobased Research.

Van der Velde, O., Juffer, E., & Van Leeuwen, M. (2021). Biobased: een pijler van de circulaire bouweconomie NIBE.

Van der Velde, O., & Van Leeuwen, M. (2019). Potentie biobased materialen in de bouw. NIBE.

Van Hattum, R. (2020). De boer van de toekomst VPRO Tegenlicht. <https://www.vpro.nl/programmas/tegenlicht/kijk/afleveringen/2019-2020/boer-van-de-toekomst.html>

Van Liere, J. (2018). Schaarste aan stro doet prijzen stijgen. *Nieuwe Oogst*. Retrieved 16/04/2021, from <https://www.nieuweoogst.nl/nieuws/2018/07/28/schaarste-aan-stro-doet-prijzen-stijgen>

Van Weele, M. (2020). Klimaat effecten van methaan. Retrieved 03/03/2021, from <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/klimaat-effecten-van-methaan>

Vandevenne, F. (2019). Areaal en teelt diversiteit. MIRA: Milieurapport Vlaanderen. <https://www.milieurapport.be/sectoren/landbouw/sectorkenmerken/areaal-en-teeltkeuze>

VIBE. (2019a). Aardearchitectuur: op weg naar een revival. Retrieved 28/04/2021, from <https://www.vibe.be/materialen/aardearchitectuur/>

VIBE. (2019b). Schelpen als milieuverantwoord en gezond materiaal. Retrieved 28/04/2021, from <https://www.vibe.be/materialen/schelpen/>

Vrijders, J., & De Bock, L. (2019). Het gebruik van gerecycleerde betongranulaten in beton. (Monografie nr. 32, Issue. WTCB. <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=search&id=REF00011499>

Woolley, T. (2013). Low Impact Building : Housing Using Renewable Materials. John Wiley & Sons, Incorporated.

WUR. (n.d.). Strokenteelt. Retrieved 19/04/2021, from <https://www.wur.nl/nl/project/Strokenteelt.htm>

Yiqi, L., & Zhou, X. (2006). Soil Respiration and the Environment. Elsevier Science & Technology. 10.1016/B978-0-12-088782-8.X5000-1

Zimmann, R., O'Brien, H., Hargrave, J., & Morell, M. (2016). The Circular Economy in the Built Environment. ARUP. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/circular-economy-in-the-built-environment>

