



# Ontwerpprincipes voor toepassing van regeneratieve bouwmaterialen.

Nette Hilven - 2022

# Ontwerpprincipes voor toepassing van regeneratieve bouwmaterialen.

Auteur: Nette Hilven  
Masterscriptie  
UHasselt  
Faculteit Architectuur

Promotor: Prof. dr. ir. Elke Knapen

Studio begeleiders: Prof. Arch. Jo Berben  
Arch. Eef Boeckx

Datum: 22-04-2022

© 2022 UHasselt

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander manier dan ook, zonder voorafgaand schriftelijke toestemming van de auteur.

All rights reserved. No portion of this thesis may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means – electronic, mechanical, photocopy, recording or any other – except for brief quotations in printed reviews, without the prior written permission of the author.

## Voorwoord

Duurzaamheid, milieubewust, energieneutraal, ... begrippen die mij allemaal erg interesseren. Om deze reden koos ik binnen de masteropleiding Architectuur voor het seminarie Circulair Bouwen. Het seminarie biedt een bredere kijk op verscheidene duurzaamheidsaspecten en milieubewust ontwerpen.

Ik koos ervoor om mijn masterscriptie te baseren op een onderwerp gerelateerd aan dit duurzaamheidsaspect. Ik wil graag mijn steentje bijdragen om ecologische en duurzame verbetering binnen de bouwindustrie door te voeren.

Deze masterscriptie vormt samen met mijn masterproject het sluitstuk van mijn vijfjarige opleiding Architectuur aan de Universiteit van Hasselt. Graag wil ik nog enkele mensen bedanken die mij ondersteund hebben bij het realiseren van deze scriptie.

Als eerste zou ik mijn promotor Prof. dr. ir. Elke Knapen graag willen bedanken voor haar tijd en ondersteuning van dit onderzoek. Ik kon bij haar steeds te rade gaan voor positieve feedback waardoor ik vandaag ook met trots mijn behaalde resultaat kan voorstellen. Ook bedank ik graag de andere proffen van het seminarie Circulair Bouwen. Dankzij hun kon ik mijn blik op architectuur verruimen en werd ik steeds opnieuw uitgedaagd om over nieuwe duurzaamheidsvraagstukken na te denken.

Daarnaast bedank ik ook graag Eef Boeckx en Jo Berben voor hun begeleiding in de ontwerpstudio. Zij waren steeds bereikbaar voor eventuele vragen en motiveerden mij om een eindresultaat neer te zetten waar ik trots op kan zijn.

Tot slot bedank ik ook graag mijn vrienden en familie. Zij wisten me te ondersteunen in elke stap die ik tijdens deze opleiding nam. Ik werd in moeilijke momenten steeds weer met veel warmte omringd. Bedankt voor alle steun en kansen die ik kreeg.

Nette Hilven  
22 april, 2022

# Abstract

## EN

There is a need for change in the construction industry. If one wants to move towards a future in which construction takes place in a more sustainable/circular manner, there is a need for a more conscious approach towards building materials and the raw materials that are used for them. Based on the circular economy model, this research discusses how choosing regenerative building materials can contribute to a more environmentally friendly outcome. Opting for regenerative building materials, among many other considerations, is one of the ways to handle the building process in a more sustainable way. Due to the regenerative capacity these materials possess, they are not resource exhaustive and can return to their original shape after use.

The definition of regenerative materials within this study is determined, after which three regenerative materials are selected. The material properties of these three materials are discussed in more detail, so these material properties can be defined. Because often these regenerative materials have technical properties that are “weaker” than the properties of conventional materials that are being developed further. The properties of these regenerative materials could be improved by, for example, stabilizing soil, chemical treatments of re-growth materials,..., but this has a negative effect on the environmental impact of these materials and often means that the regenerative character of these materials is lost.

In order to be able to circumvent these weaker material properties in a way, the solution can be found within the design itself. When starting from the material within the design process, these technical properties can be taken into account from the start and the design can be adapted in such a way that these ‘weaker’ properties are no longer relevant. In this way the material determines the shape and the final result of the design.

Within this research, design methods are therefore sought to be able to apply these regenerative materials in an architectural design. Design methods are bundled per material property and shown, making use of “good practices”.

## NL

Er is nood aan verandering binnen de bouwsector. Wanneer men naar een toekomst wilt waarin bouwen op een duurzamere/circulaire manier gebeurt is er nood aan een bewustere omgang met bouwmaterialen en grondstoffen die men daar voor gebruikt. Er wordt binnen dit onderzoek, aan de hand van het circulaire economie model, besproken hoe het kiezen voor regeneratieve bouwmaterialen kan bijdragen tot een milieubewustere uitkomst. Kiezen voor regeneratieve bouwmaterialen is, naast een heleboel andere overwegingen, een van de manieren om op een duurzamere manier met het bouwproces om te gaan. Dankzij het regeneratieve vermogen dat deze materialen bezitten, zijn ze niet bronuitputtend en kunnen ze na gebruik terugkeren tot hun oorspronkelijke vorm.

De definitie van regeneratieve materialen binnen dit onderzoek wordt afgelijnd, waarna er drie regeneratieve materialen worden uitgekozen. Van deze drie materialen worden de materiaaleigenschappen uitgebreider besproken, om op die manier deze materiaaleigenschappen te kunnen definiëren. Want vaak bezitten deze regeneratieve materialen technische eigenschappen die “zwakker” zijn dan de eigenschappen van conventionele materialen die steeds verder ontwikkeld worden. Men zou de eigenschappen van deze regeneratieve materialen kunnen verbeteren door bijvoorbeeld: stabiliseren van aarde, chemische behandelingen van hergroeiende materialen,..., maar dit heeft een negatief effect op de milieupact van deze materialen en zorgt er voor dat het regeneratieve karakter van deze materialen vaak verloren gaat.

Om deze zwakkere materiaaleigenschappen dan toch op een manier te kunnen omzeilen, kan men de oplossing zoeken binnen het ontwerp zelf. Wanneer binnen het ontwerpproces vertrokken wordt vanuit het materiaal, kan men vanaf de start deze technische eigenschappen in rekening brengen en het ontwerp er op aanpassen zodat deze ‘zwakkere’ eigenschappen niet meer relevant zijn. Op deze manier bepaalt het materiaal mee de vorm en het uiteindelijke resultaat van het ontwerp.

Binnen dit onderzoek wordt er dan ook op zoek gegaan naar ontwerpmethodieken om deze regeneratieve materialen te kunnen toepassen in een architecturaal ontwerp. Ontwerpmethodieken worden per materiaaleigenschap gebundeld en getoond aan de hand van “good practices”.

<b>Inhoud</b>			
<b>Voorwoord</b>		<b>5</b>	
<b>Abstract</b>		<b>7</b>	
<b>Probleemstelling</b>		<b>10</b>	
<b>Onderzoeksragen</b>		<b>13</b>	
Hoofdvraag		13	
Deelvragen		13	
<b>Onderzoeksmethodologie</b>		<b>15</b>	
<b>Hoofdstuk 1 : Duurzame materiaalkeuzes</b>		<b>17</b>	
1.1. Het belang van een materiaalkeuze		18	
1.2. De circulaire economie als onderlegger		18	
1.3. Regeneratieve materialen als materiaalkeuze		20	
<b>Hoofdstuk 2: Regeneratieve materialen en selectie</b>		<b>23</b>	
2.1 Regeneratieve materialen		24	
2.1.1. Definitie		24	
2.1.2. Organische materialen		24	
2.1.3. Minerale materialen		25	
2.2. Selectie van regeneratieve materialen		27	
2.2.1. Verantwoording		27	
2.2.2. Stro		29	
2.2.3. Aarde		31	
2.2.4. Kalkhennep		33	
<b>Hoofdstuk 3: Theoretische benadering</b>		<b>35</b>	
3.1. Basisprincipes		36	
3.2. Product design		37	
3.3. Material Driven Design		38	
3.4. Rol van MDD in een architecturale context		39	
			<b>Hoofdstuk 4: Ontwerpprincipes 41</b>
			4.1. Inleiding 42
			4.1.1. Matrix materiaaleigenschappen 42
			4.2. Niet waterbestendig 43
			4.2.1. Materiaal inpakken met ander materiaal – beplaten 43
			4.2.2. Materiaal inpakken met ander materiaal – bepleisteren 48
			4.2.3. Dakoversteek 49
			4.2.4. Afdeksteen 52
			4.2.5. Erosie onderbrekingen 53
			4.2.6. Plint 54
			4.3. Vochtgevoelig 57
			4.3.1. Dampopen afwerking 57
			4.3.2. Ventileren van het materiaal 59
			4.3.3. Koudebruggen vermijden 59
			4.4. Beperkt draagvermogen 60
			4.4.1. Structure-infill systeem 60
			4.4.2. Boogconstructie 62
			4.5. Relatief hoge $\lambda$ -waarde 63
			4.5.1. Dikke uitvoering van het materiaal 63
			4.5.2. Toevoegen van extra isolatielaag 65
			<b>Reflectie 67</b>
			<b>Masterproject 68</b>
			Beschrijving 68
			Link tussen scriptie en project 70
			zelfreflectie 73
			<b>Literatuurlijst 75</b>

## Probleemstelling

Jaarlijks wordt er in België meer dan tien miljoen ton bouw- en sloopafval geproduceerd (WTCB, Vrijders, z.d.). De uitputting van grondstoffen en het hoge energieverbruik benodigd bij de productie van materialen zorgt voor een grote milieu-impact. Om hieraan te remediëren, kan men zijn toevlucht nemen tot afvalpreventie, hergebruik van materialen en recycling (WTCB, Vrijders, z.d.). Reeds vele materialen worden vandaag al gerecycleed, maar helaas is dit vaak slechts een vorm van down-cycling, waarbij hoogwaardige materialen steeds meer kwaliteiten verliezen. Daarnaast worden de toepassingen voor deze materialen steeds schaarser. Het kiezen voor materialen die minder energie verbruiken tijdens het productieproces, of het kiezen voor regeneratieve materialen kan bijdragen tot een duurzamere uitkomst. Regeneratieve materialen hebben het voordeel dat - zoals de naam ook al doet vermoeden - ze een regeneratief vermogen bezitten en dus geen aanleiding geven tot de uitputting van grondstoffen. Dit soort materialen of producten zijn zo ontworpen dat hun bestanddelen veilig opnieuw geïntroduceerd kunnen worden in natuurlijke of industriële cycli. Daarnaast worden ze geassembleerd of geproduceerd met 100% hernieuwbare en niet vervuilende energie (Shady, 2018).

Het besef dat veel conventionele bouwmethoden en materiaalkeuzes op de lange termijn niet verantwoord zijn, is niet nieuw. Typische benaderingen die een oplossing proberen te bieden aan deze problematiek, richten zich op een efficiënter gebruik van energie en materialen. (Godfaurd et al., 2005). Het is dat efficiënte materiaalgebruik dat de basis vormt voor dit onderzoek, want slim en doordacht materiaalgebruik kan een stap in de juiste richting zijn voor een duurzamer eindresultaat. Vandaag is er een ruim assortiment aan materialen beschikbaar op de bouwmarkt. Duurzaam bouwen is een begrip dat ook voor bouwmaterialen steeds belangrijker wordt. Het maken van verantwoorde materiaalkeuzes blijft moeilijk en materialen worden nog niet in elk ontwerp tot hun volle potentie ingezet.

Materiaalonderzoek binnen productdesign evolueert voortdurend waarbij gezocht wordt naar alternatieve materialen met een lagere milieu-impact (bijv. biobased materialen, slimme materialen, gerecycleerde en/of recycleerbare materialen, enz.). De erkenning en aanvaarding van zo een nieuw materiaal is echter gekenmerkt door een lange looptijd, meestal 20 jaar of meer - tussen de technische innovatie, eerste commerciële toepassing en wijdverspreide opname van het materiaal (Maine, Probert en Ashby, 2005). Vooraleer men een materiaal frequenter zal gaan gebruiken, zal hier een bepaalde tijd over gaan. Hoe meer het materiaal in nieuwe voorbeelden verschijnt, hoe meer men geneigd zal zijn om het materiaal ook zelf als optie te overwegen.

Onder de term regeneratieve materialen vallen voornamelijk biologische materialen. Dit omdat deze op een vaak eenvoudigere manier met hernieuwbare energie tot hun kwalitatieve vorm kunnen wederkeren. Op

die manier zijn deze materialen niet bron-uitputtend, dit in tegenstelling tot vele technische materialen. De regeneratietijd van deze delfstoffen is veel te lang, waardoor we veel sneller consumeren dan dat deze geregenereerd worden. Dit betekent echter niet dat een materiaal van biologische aard moet zijn om als regeneratief beschouwd te worden, noch dat elk biologisch materiaal als regeneratief geïdentificeerd kan worden. Een studie parallel aan het onderzoek van Godfaurd et al., van biologische basismaterialen, toont aan dat de chemische verbindingen die nodig zijn om sterke mechanische eigenschappen te bekomen, relatief weinig aanwezig zijn binnen deze biologische basismaterialen. Dit maakt dat ze in vergelijking tot technisch ontwikkelde materialen, zoals gewapend beton, staal, ..., vaak slechter scoren op vlak van treksterkte, taaiheid, young modulus, ... Deze bio-materialen kunnen met andere woorden niet geïdentificeerd worden als high performance materialen. Hierdoor lijken zij soms de minder evidente optie wanneer men een materiaalkeuze maakt. Toch kunnen deze materialen perfect gebruikt worden binnen een ontwerp wanneer ze op de juiste manier worden toegepast. Dit door steeds rekening te houden met materiaal-specifieke eigenschappen en door eventuele combinaties te maken met andere materialen.

Er zijn veel voorbeelden in de geschiedenis van design waar ontwerpers zijn benaderd door de materiaalindustrie (Manzini, 1986). Dit om materialen die ontwikkeld werden door deze industrie voor te stellen op de economische markt. Zo kan men ook inspiratie halen uit de gemaakte ontwerpen voor verdere ontwikkeling of modificatie van de materialen (Karana et al., 2015). Hieruit blijkt dat het mogelijk is om een ontwerp te maken, vertrekkend vanuit een voorop bepaalde materiaalkeuze. Dit omdat het materiaal bepaalde nieuwe of interessante, technische of duurzame eigenschappen bevat. Deze manier van werken doet denken aan Material Driven Design. Een methodiek die toegepast wordt binnen het werkveld van productdesign om een ontwerp op te bouwen vanuit een voorop gekozen materiaal. Zowel Karana, Barati, Rognoli, & Zeeuw van der Laan, als Sörensen deden eerder al uitgebreid onderzoek en beschreven duidelijk hoe men deze ontwerpmethodiek kan toepassen voor bepaalde commerciële doeleinden. Een duidelijke theoretische koppeling van deze methodiek aan het architecturale werkveld is moeilijker te vinden. Toch bestaan er reeds veel goede voorbeelden van ontwerpen die vanuit zulke duurzame overwegingen op zoek gaan naar een manier om een bepaald materiaal te laten werken in hun architectuur. Reeds vele good practices werden ter voorbeeld tentoongesteld tijdens de vorige edities van de Dutch Design Week te Eindhoven. Experimentele ontwerpen gaan van een volledige woning geconstrueerd uit bio-based materialen (The exploded view beyond building, z.d.), tot een paviljoen gemaakt uit mycelium waarbij het materiaal zelfs de kans krijgt om nog verder te groeien (About the growing pavilion, z.d.). Dit zijn uitstekende voorbeelden die aantonen dat men ook binnen de architectuur de mogelijkheid heeft om een ontwerp te realiseren vertrekkend vanuit een nieuw innovatief materiaal. Of men vertrekt net vanuit een reeds langer gekend materiaal dat eerder nog niet in zulke toepassingen werd gebruikt maar wel bepaalde kwaliteiten met zich mee draagt. Het is niet altijd even eenvoudig om deze goede voorbeelden terug te vinden of om te ontdekken met welke ontwerpprincipes men aan de slag gaat om deze regeneratieve materialen op een correcte manier toe te passen binnen een architecturaal ontwerp.

Binnen deze studie wordt dieper ingegaan op de materiaalgedreven ontwerpmethodiek. Er wordt verder onderzocht op hoe men reeds op ontwerpende manier omgaat met materiaal-specifieke eigenschappen.

# Onderzoeksragen

## Hoofdvraag:

Welke ontwerpprincipes kan men toepassen bij het gebruik van regeneratieve bouwmaterialen?

## Deelvragen:

### Hoofdstuk 1

Hoe kunnen materiaalkeuzes bijdragen tot duurzame architectuur?  
Hoe kan een circulaire economie hierin een rol spelen?  
Waarom kiezen voor regeneratieve bouwmaterialen?

### Hoofdstuk 2

Wat zijn regeneratieve materialen?  
Wat zijn hun eigenschappen?  
Welke bouwmaterialen zijn regeneratief en welke materiaaleigenschappen bezitten deze?

### Hoofdstuk 3

Wat zijn de basisprincipes voor ontwerpen met een bepaald materiaal?  
Welke methoden worden reeds gebruikt voor materiaalgedreven ontwerp binnen het productdesign en hoe kunnen deze teruggekoppeld worden naar architecturaal ontwerp?

### Hoofdstuk 4

Welke ontwerpprincipes kan men per materiaaleigenschap toepassen bij het gebruik van regeneratieve bouwmaterialen?

## Onderzoeksmethodologie

Om vooropgestelde onderzoeksvragen te beantwoorden werd er in de eerste drie hoofdstukken een kwalitatief onderzoek uitgevoerd. Aan de hand van een literatuurstudie werd kennis gebundeld over de belangrijkste begrippen (regeneratieve materialen, Material Driven Design, materiaaleigenschappen, ...) binnen deze studie. Hiervoor werden allerhande wetenschappelijke papers, boeken en artikels geraadpleegd.

In het vierde hoofdstuk werd het onderzoek verder uitgebreid door middel van het bestuderen van good practices. Aan de hand van voorbeelden wordt er per materiaaleigenschap een bespreking gedaan van mogelijke ontwerpprincipes om met deze om te gaan. Deze cases bestaan uit werkelijk gerealiseerde projecten die elk op hun eigen manier omgaan met regeneratieve materialen binnen hun architectuur. De projecten die gebruikt werden voor het aanduiden van good practises werden gevonden op online architectuurplatformen of in boeken.



## **Hoofdstuk 1: Duurzame materiaalkeuzes**

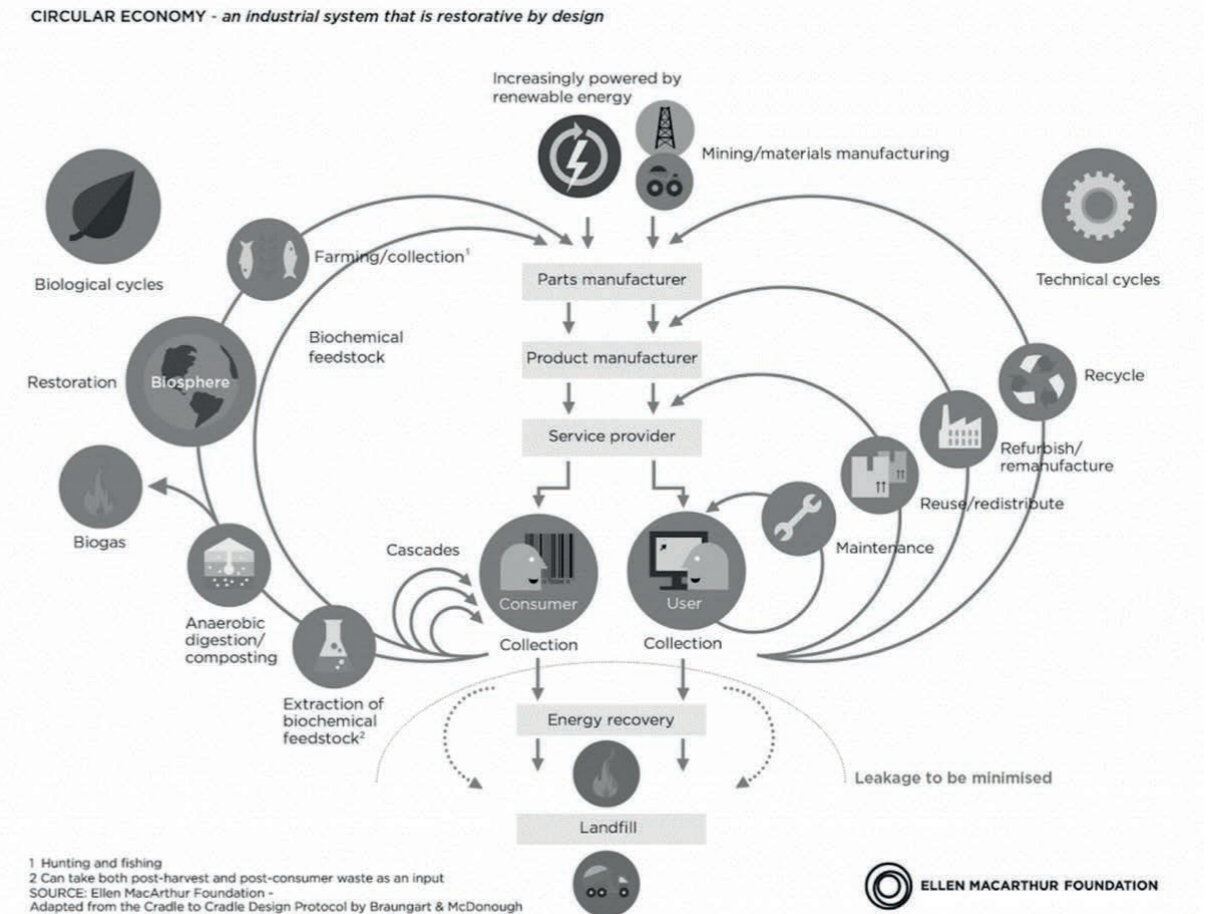
In dit hoofdstuk wordt besproken hoe materiaalkeuzes kunnen bijdragen tot een duurzame architectuur. Er wordt dieper in gegaan op het belang van een materiaalkeuze en hoe een circulaire economie kan bijdragen tot betere materiaalkeuzes. Daarna wordt vanuit de regeneratieve kwaliteiten van hergroeiende materialen - uit de biologische cyclus van het circulaire model - de overstap gemaakt naar regeneratieve materialen als materiaalkeuze.

## 1.1. Het belang van een materiaalkeuze

Uit de huidige afval-, grondstof- en energieproblematiek die in de probleemstelling aangekaart werd, vloeit het in vraag stellen van ons materiaalgebruik voort. Materiaalkeuzes kunnen van groot belang zijn wanneer men een duurzaam eindresultaat wilt bekomen binnen een project. Het is echter niet altijd even gemakkelijk om te weten wanneer een materiaalkeuze de juiste is en of deze de impact bereikt die men voor ogen had. Elk materiaal heeft een bepaalde hoeveelheid/soort energie nodig om gebruiksklaar gemaakt te worden. Ook de voorraad van een materiaal is van belang aangezien vele materiaalbronnen uitputbaar zijn. Deze materiaalbronnen komen steeds meer onder druk te staan tot deze op een moment volledig uitgeput zullen geraken. Daarnaast is het ook belangrijk om te weten wat er met een materiaal gebeurt na gebruik. Vaak komen deze in grote afvalstromen terecht en eindigen ze ergens op een stortplaats. Er is nood aan verandering van onze omgang met materialen. Streven naar een circulair model waarbij afvalstromen niet meer bestaan en grondstoffen niet uitgeput worden is een stap in de goede richting.

## 1.2. De circulaire economie als onderlegger

“Een circulaire economie is een economisch systeem van gesloten kringlopen waarin grondstoffen, onderdelen en producten hun waarde zo min mogelijk verliezen, hernieuwbare energiebronnen worden gebruikt en systeemdenken centraal staat”. (Circulaire economie, z.d.) In een circulaire economie probeert men steeds de materiaalkringlopen naar het voorbeeld van een ecosysteem te sluiten. Elke reststroom die vrijkomt kunnen we in theorie gebruiken voor het maken van een nieuw product. In een circulair systeem zoals deze is het van groot belang dat de kwaliteit van producten, onderdelen en grondstoffen steeds zo lang mogelijk hoogwaardig blijft (Korhonen, Nuur, Feldmann & Birnie, 2018). Door gebruik te maken van een circulair systeem zouden vooropgestelde problemen die gebonden zijn aan materiaalkeuzes, zoals grote stromen aan afval of uitputting van materiaalbronnen, niet meer bestaan. Vanuit die veronderstelling kan het nuttig zijn om de circulaire economie te gebruiken als onderlegger voor duurzamere materiaalkeuzes.



Figuur 1: Het “vlinderdiagram” – de circulaire economie in beeld (Ellen MacArthur Foundation, 2015a)

Materiaalstromen worden opgedeeld in een technologische en een biologische cyclus. Binnen de technologische cyclus zijn er verschillende niveaus van hergebruik (zie de rechterzijde van figuur 1). Dit is van belang aangezien deze technische materialen zoals minerale grondstoffen, kunststoffen en metalen maar beperkt beschikbaar zijn en niet gemakkelijk opnieuw gecreëerd kunnen worden. Hierdoor moeten we de voorraden van deze eindige materialen goed beheren. Binnen het vooropgestelde model geldt de vuistregel dat de kleinste of binnenste cirkel, de voorkeur heeft boven de grotere cycli. Gewoonweg omdat deze minder bewerkingsstappen, arbeid, energie en nieuw materiaal vragen om weer van oorspronkelijk waarde te zijn (Ellen MacArthur Foundation, 2015a). Voor technische materialen staat “gebruiken” boven de term “verbruiken”. Na gebruik moet men proberen om deze materialen terug te winnen met hun oorspronkelijke waarde uit de reststromen waarin ze vrijkomen. Producenten nemen hun producten na gebruik terug en herwerken deze zo dat ze een nieuw gebruiksleven tegemoet kunnen gaan (Ellen MacArthur Foundation, 2015a).

De verschillende niveau’s van hergebruik binnen de technologische cyclus zijn (zie figuur 1):

- Maintenance (& repair): Reparatie en onderhoud tijdens gebruik om de levensduur te verlengen.
- Reuse/redistribute: Direct hergebruik door een product opnieuw op de markt te brengen.
- Refurbish/Remanufacture: Het grondig opknappen en herstellen van een product door de fabrikant.
- Recycle: Onderdelen of materialen terughalen uit het product om ze opnieuw te gebruiken.

Tot de biologische cyclus behoren materialen zoals hout, voedsel en water. Deze kunnen door middel van biologische processen terug opgenomen worden in een ecosysteem. Het is dus van belang om dit ecosysteem ten allen tijde goed te laten functioneren en er over te waken dat dit niet verontreinigd geraakt met giftige stoffen en dat het systeem niet overbelast geraakt (door bijvoorbeeld overbemesting of overbevissing). Wanneer men er voor zorgt dat consumptie en het vermogen van de bio-cyclus om grond-

stoffen op te nemen en te regenereren in balans zijn, kan men in theorie organische grondstoffen oneindig vaak opnieuw binnen de cyclus brengen (Ellen MacArthur Foundation, 2015a). Hergebruik gebeurt binnen deze kringlopen in cascades. Cascaderen betekent “het gebruiken van (of een deel van) een product voor een andere toepassing”. Wanneer een product niet langer de initiële functie kan vervullen, kan men het in een andere toepassing hergebruiken. Tijdens het cascaderen vermindert de kwaliteit van het materiaal en treedt energieverlies op (Ellen MacArthur Foundation, 2013a). Cascaderen verschilt van gewoon hergebruik omdat het materiaal doorheen de cascades van functie verandert en steeds meer bewerkt wordt (Circulaire economie, z.d.). Wanneer een biologisch materiaal het laatste niveau van het cascaderen bereikt, kan men het materiaal hierna volledig afbreken en teruggeven aan de natuur als voedingsstoffen, om op die manier terug tot leven te komen in de, door het ecosysteem, nieuw geproduceerde bioproducten.

Biologische materialen kunnen ook chemisch of technisch gemodificeerd worden om verweer of cascaderen tijdens het gebruik tegen te gaan of om de materiaaleigenschappen te verbeteren (brandvertragers, verduurzamen, ...). Wanneer men zulke maatregelen neemt kunnen deze materialen niet meer terugkeren naar hun biologische kringloop en moet men strategieën gaan toepassen uit de technische kringloop, zoals herstel, onderhoud, hergebruik,... Hoewel deze modificatie vaak technisch interessante oplossingen oplevert, is dit zeker niet de meest duurzame oplossing en past ze niet binnen het circulaire model.

Wanneer we onze materiaalkeuzes baseren op de regels die gelden binnen een circulaire economie, zullen deze er anders uitzien dan de keuzes die vandaag vaak gemaakt worden binnen de bouwindustrie (Ter plaatse gestort beton, met cementmortel gemetst of verlijmd metselwerk, verlijmd kunststoffen, ...). Een circulaire economie vraagt om circulaire materiaaloplossingen, die kunnen zorgen voor een duurzamer eindresultaat.

### **1.3. Regeneratieve materialen als materiaalkeuze**

Wanneer men op een kritische manier naar het circulaire economie model kijkt, kan men in vraag stellen hoe duurzaam het gebruik maken van materialen uit de techno cycle nu werkelijk is en of men dit model vandaag de dag al op deze manier kan toepassen. Voor vele technische materialen is hergebruik op dit moment nog niet de meest voor de hand liggende optie waardoor men veel aandacht besteed aan het recyclen van materialen. Helaas gebeurt dit recyclen ook vaak niet op de juiste manier. Hierdoor belanden er nog steeds grote hoeveelheden materiaal op de afvalberg en gaan er vele materialen verloren. Er is voor het recyclen van technische materialen zoals aluminium of staal, veel energie nodig om het materiaal terug in zijn oorspronkelijke staat te brengen. Deze energie moet elders ook weer geproduceerd worden aan de hand van andere grondstoffen, aangezien onze hernieuwbare energie nog maar in haar kinderschoenen staat.

Biologische materialen staan hier lijnrecht tegenover. Deze organische materialen kunnen wel steeds terugkeren tot hun ecosysteem om hier te composteren en als voeding te dienen voor een nieuwe productie aan materialen. Binnen dit ecosysteem kunnen de materialen dan weer opnieuw hergroeien dankzij hun regeneratief vermogen. Er zijn geen externe energiebronnen nodig, afval is er niet en de materiaalbron geraakt in theorie nooit uitgeput. Vanuit een duurzaam standpunt gaat de voorkeur dus uit naar dit soort materialen, materialen met een regeneratief vermogen.

## **Hoofdstuk 2: Regeneratieve materialen en selectie**

In het vorige hoofdstuk werd onderzocht hoe men met de circulaire economie als onderlegger goede materiaalkeuzes kan verantwoorden. Regeneratieve materialen kwamen daar als voorkeur naar voren. In dit hoofdstuk wordt besproken wat regeneratieve materialen zijn en welke soorten regeneratieve materialen er zijn. Er worden drie regeneratieve materialen gekozen, namelijk stro, aarde en kalkhennep, die uitgebreider onderzocht worden. De materiaaleigenschappen van deze drie materialen worden opgesomd en besproken.

## 2.1 Regeneratieve materialen

### 2.1.1. Definitie

Regeneratieve materialen hebben het voordeel dat ze een regeneratief vermogen bezitten en dus geen grondstoffen uitputten. Dit soort componenten of producten zijn zo ontworpen dat hun ingrediënten veilig opnieuw geïntroduceerd kunnen worden in natuurlijke of industriële cycli. Ze worden geassembleerd of geproduceerd met 100% hernieuwbare en niet-vervuilende energie (Shady, 2018). Het is mogelijk dat de definitie van de term regeneratief materiaal in andere studies of artikels afwijkt van de bovenstaande beschrijving. Het is echter deze eerder vermelde beschrijving die binnen dit onderzoek als definitie werd aangenomen.

### 2.1.2. Organische materialen

Hergroeibare (biologische) materialen behoren tot de regeneratieve materialen. Deze materialen bevinden zich in de organische categorie binnen het circulaire economie model. Ze zijn plantaardig en kunnen dus – zoals de naam het ook al impliceert – volledig terug “hergroeien”. Wanneer de materialen niet chemisch/technisch gemodificeerd werden, zijn ze ook biologisch afbreekbaar en kunnen ze op het einde van hun gebruik terugkeren tot hun ecosysteem. Dit maakt dat ze het eerder benoemde regeneratieve karakter van regeneratieve materialen bezitten. Hierdoor geraken deze materiaalbronnen in theorie nooit uitgeput. Dat is erg voordelig ten opzichte van vele technische materiaalbronnen die wel eindig zijn. Men moet wel steeds rekening houden met de systemen en kringlopen die achter deze biologische materialen schuilgaan. Het is van belang dat de ecosystemen waarin deze organische materialen hergroeien steeds in balans blijven en dat men vermijdt dat ze verstoord worden door overbemesting, verzuring, verlies aan biodiversiteit,... om een constante materiaalstroom te kunnen verzekeren. In de studie van Jones (2017) worden de voordelen van biogebaseerde materialen beschreven. Hieronder worden de belangrijkste punten opgesomd:

- Het opvangen en opslaan van koolstof gewonnen uit atmosferische CO<sub>2</sub> aan de hand van fotosynthese
- Biologische afbreekbaarheid aan het einde van de levensduur (enkel geldig voor biologische materialen die niet gemodificeerd werden)
- Uitzonderlijk lage (of bijna nul) thermische uitzettingscoëfficiënten, vaak vergelijkbaar of beter dan veel door de mens gemaakte producten
- De eigenschap om temperatuur en vochtigheid in besloten ruimten te reguleren als een direct gevolg van faseveranderingen van water en vocht binnen celwanden
- Hoge dampdiffusie en ‘fickiaanse’ dampverspreiding
- Lage thermische diffusie
- Uitstekende prestatie-gewichtsverhoudingen
- Over het geheel genomen lagere embodied energy (EE) dan kunstmatige of synthetische materialen

Snelgroeiende “biobased” materialen, zoals stro en hennep, zorgen voor een veelbelovende kans om de ecologische voetafdruk van gebouwen te verkleinen. In tegenstelling tot bosproducten hebben ze geen lange omlooptijd nodig en de capaciteit om koolstof op te slaan neemt toe wanneer ze gebruikt worden als dikke bouw pakketten voor buitenmuren, mede dankzij de snelle CO<sub>2</sub>-opname die gebeurt in de groei-fase op de plantages (Pittau et al., 2018). Biogebaseerde bouwmaterialen kunnen hierdoor een positieve bijdrage leveren in de strijd tegen de klimaatopwarming. Er ligt wel steeds een gevoeligheid bij het in rekening brengen van CO<sub>2</sub> opslag en de manier waarop men de tijd die nodig is voor deze opslag, in rekening brengt (Peñaloza et al., 2016).

Hergroeibare materialen hebben een bepaalde tijd nodig om opnieuw te kunnen groeien en geconsumeerd te kunnen worden. Het is dan ook logisch dat men deze materialen niet sneller kan consumeren dan de aangroei-tijd toelaat. Wanneer men dat wel zou doen zouden ook deze bronnen, net zoals de materialen in de technische materiaalklasse, in zekere zin eindig zijn.

### 2.1.3. Minerale materialen

Naast regeneratieve materialen die van organische aard zijn wordt binnen dit onderzoek de stelling geponeerd dat ook andere materiaal-soorten geclassificeerd kunnen worden als regeneratief. Zolang het materiaal voldoet aan het regeneratieve karakter waardoor een materiaal na gebruik binnen een bepaalde toepassing opnieuw geassembleerd of geproduceerd kan worden zonder grondstofvoorraden te belasten, aan de hand van hernieuwbare energie. Een voorbeeld van zo’n materiaal is aarde. Dit materiaal is niet van organische oorsprong, wel van minerale oorsprong. Ondanks dat het niet letterlijk kan her-aangroeien, kan het materiaal na gebruik in een toepassing volledig terugkeren tot de aarde in zijn oorspronkelijke vorm om daarna weer opnieuw gebruikt te worden in een even volwaardige toepassing of gewoon terug te keren naar de aarde in ongewijzigde vorm.

## 2.2. Selectie van regeneratieve materialen

### 2.2.1. Verantwoording

Binnen het kader van dit onderzoek werden er 3 regeneratieve materialen uitgekozen waarvan de eigenschappen hierna uitgebreider besproken zullen worden, namelijk stro, aarde en kalkhennep.

Deze drie materialen werden om verschillende redenen uitgekozen ter bespreking. Ten eerste zijn het materialen die lokaal verkrijgbaar zijn.

Daarnaast bestaan er voor elk van deze materialen reeds voldoende studies en publicaties over de prestaties van het materiaal en hoe men het kan toepassen binnen een bouwproject. Op die manier kon er binnen dit onderzoek verder gebouwd worden op eerdere bevindingen.

Als laatste werden deze drie bouwmaterialen ook reeds in verscheidene architectuurprojecten toegepast.

In het vierde hoofdstuk worden ontwerpprincipes afgeleid op basis van good practice voorbeelden die gebruik maken van deze drie materialen. Om zo te onderzoeken welke ontwerpprincipes men kan toepassen op regeneratieve materialen en dit per materiaalspecifieke eigenschap.



### 2.2.2. Stro

Stro is de overgebleven stengel van graangewassen b.v. tarwe, maïs, rijst, gerst, haver, rogge en sorghum, nadat het graan geoogst werd. Chemisch gezien bestaat stro voornamelijk uit cellulose en lignine en heeft dus dezelfde hoofdbestanddelen als hout. Het bevat weinig nutritionele waarde en wordt traditioneel gebruikt als strooisel voor vee, verbrand, teruggeploegd in de grond of behandeld als supplement voor diervoeder (M.Jackson, z.d.). Stro wordt ook gebruikt als hernieuwbare energiebron voor energieopwekking uit biomassa (A. Camila et al., 2018). Indien stro wordt gebruikt als bouw materiaal, kan het koolstof op slaan en vermindert het tegelijkertijd de afhankelijkheid van het gebruik van andere materialen met een hoge belichaamde energie. Als het stro in een gebouw moet worden vervangen of weggegooid, kan het daarna worden gecomposteerd. De strobaal als bouw materiaal kan met name voordelen bieden in regio's waar stro een ongewenst bijproduct is geworden (Koh & Kraniotis, 2020).

Strobalen kunnen gebruikt worden als thermisch isolatiemateriaal, al is er een grotere dikte nodig in vergelijking met andere conventionele isolatiematerialen zoals mineraal wol, EPS of XPS, vanwege de iets hogere thermische geleidbaarheid. De  $\lambda$ -waarde van stro ligt rond de 0.053–0.065 W/mK terwijl die van conventionele isolatiematerialen tussen 0.035–0.040 W/mK ligt (Koh & Kraniotis, 2020). De huidige EPB-norm vraagt voor een maximale U-waarde van 0.24 W/m<sup>2</sup>K voor wanden (Vlaanderen, 2020). Om aan die eis te voldoen is er in combinatie met de eerder vermelde  $\lambda$ -waarde van stro een dikte van minimaal 0,22m–0,27m aan materiaal nodig. De standaard afmetingen van de meest gangbare strobalen zijn 2,4 x 1,2 x 0,7 m (MediaZo! B.V., z.d.). Wanneer men de balen zou stapelen zoals gewoonlijk, dan voldoet dit aan de EPB-eis voor thermische isolatie.

Als natuurproduct zijn strobalen kwetsbaar voor schimmelgroei en verdere degradatie, wanneer het wordt blootgesteld aan omgevingen met een overmaat aan vocht. Uit onderzoek blijkt dat een vochtgehalte van minder dan 20% ervoor zorgt dat vocht gerelateerde degradatie wordt voorkomen. De bestaande studies geven controversiële resultaten over de vraag of het soort stro invloed heeft op de vochtopslagfunctie en de adsorptie/desorptie, maar de isothermische absorptiecurve van stro lijkt vergelijkbaar met die van houtproducten. Afwerking, zoals pleisterwerk, speelt een belangrijke rol bij de luchtdichtheid, geluidsisolatie, mechanische sterkte, en brandwerendheid van een strobalegebouw. De milieu-impact van strobalen is aanzienlijk lager in vergelijking met andere thermische isolatiematerialen, genormaliseerd naar thermische geleidbaarheid. Strobalen als bouw materiaal vertonen een lagere koolstofvoetafdruk in vergelijking met andere bouwmaterialen, zoals hout, baksteen en metselwerk (Koh & Kraniotis, 2020).

Verdere prestatieverbetering van strobaal als bouw materiaal kan worden bereikt door te combineren met verschillende additieven in de strobaalstructuur, zoals toeslagstoffen om het risico op schimmelgroei te verminderen, of extra vezelig materiaal dat de thermische prestaties kan verbeteren (Koh & Kraniotis, 2020). Wanneer men additieven toevoegt moet men er wel op letten dat deze de biologische afbreekbaarheid van het materiaal niet in het gedrang brengen, anders valt het regeneratieve karakter van het materiaal in vraag te stellen.

De belangrijkste zwakkere eigenschappen van stro als bouw materiaal waarmee men met aandacht moet omgaan zijn de volgende:

- Vochtgevoelig (schimmelgroei)
- Niet bestand tegen water
- Relatief hoge  $\lambda$ -waarde
- Beperkt draagvermogen



### 2.2.3. Aarde

Aarde is een bouw materiaal dat reeds wijdverspreid over de hele wereld gebruikt wordt/werd voor het bouwen van structuren. Naar schatting woont 30% tot 50% van de wereldbevolking (ongeveer 3 miljard mensen verspreid over 6 continenten) in gebouwen gemaakt met aarde. Dit maakt dat de grond waar we op lopen en waar we onze gewassen op groeien, het meest wijdverspreid gebruikte bouw materiaal ter wereld is (Rael, 2009).

De definitie van aarde wordt vaak omschreven als de grond waarin we planten of bomen groeien, men heeft het dan over de humusrijke bovenlaag. Wanneer we spreken over aarde binnen een constructieve context gaat het niet over deze humusrijke laag, aangezien deze niet geschikt is om tot bouw materiaal om te vormen, maar kan het als volgt omschreven worden: klei, grind, zand, slib of andere brokkelige gronden, waarin organische materialen soms bestaan. Afhankelijk van de toepassing (leemsteen, stamp-leem, leempleister, adobes, ...) worden deze bestanddelen in bepaalde verhoudingen en met bepaalde korrelgroottes gemengd. Aarde is niet hetzelfde als andere materialen die uit de grond komen, zoals steen of metalen die uit ertsen gewonnen worden.

Aarde is een ecologisch materiaal. Het heeft een uitstekende thermische massa, die er voor zorgt dat het materiaal veel minder onderhevig is aan plotse temperatuurstijgingen (of –dalingen), zodat de binnentemperatuur ook veel minder schommelt. Het gebruik van aarde vraagt weinig energie en structuren die ermee gebouwd worden zijn recycleerbaar. Dit geldt wel enkel wanneer er geen stabilisatoren zoals cement of kalk werden toegevoegd. Verlaten aarden gebouwen kunnen terug met de grond versmelten en hun ruïnes kunnen gebruikt worden om opnieuw gewassen op te groeien of het materiaal kan opnieuw hergebruikt worden als bouw materiaal (Rael, 2009).

Er bestaan misschien 20 verschillende manieren om aarde toe te passen voor het bouwen van muren, vloeren en daken, elk verschillend in afmeting en vorm. Enkele technieken om aarde als bouw materiaal te gebruiken zijn rammed earth, adobe, super adobe, Compressed Stabilized Earth Blocks (CSEB), gegoten aarde, gekapte blokken, ... De vele toepassings mogelijkheden van het materiaal hebben het toegestaan om te reageren op een grote variëteit aan contexten, culturen en tijdperken (Rael, 2009).

Helaas heeft het materiaal ook enkele “zwaktes” ten opzichte van de conventionele bouw materialen die we vandaag gebruiken. Een massieve aarden muur die aangestampt werd in een bekisting is normaal dragend vanaf een dikte van 35cm. De muur moet echter eerst een proces van drogen en krimpen ondergaan voordat deze het gewicht van de bovenliggende constructie kan dragen (Boltshauser et al., 2019). Daarnaast zijn muren uit aarde enkel dragend onder druk en kunnen deze geen trek opvangen. Ook erosie is een probleem dat schade kan opleveren aan bouwelementen uit aarde die voor lange tijd aan de externe weercondities werden blootgesteld, net zoals er ook afslijting kan plaatsvinden bij binnentoepassingen aangezien de krasbestendigheid en stootvastheid minder groot is dan veel klassieke materialen. Het voordeel is wel dat deze eventuele schade gemakkelijk hersteld kan worden door plaatselijk materiaal opnieuw aan te brengen. Als laatste is het maken van bouwelementen uit aarde een erg arbeidsintensief proces. Door de vele manuren die betaald moeten worden is het vandaag vaak niet economisch verantwoord om voor dit materiaal te kiezen (Boltshauser et al., 2019).

De belangrijkste zwakkere eigenschappen van aarde als bouw materiaal waarmee men met aandacht moet omgaan zijn de volgende:

- Beperkte waterbestendigheid (regeninslag, opstijgend vocht, ...)
- Beperkt draagvermogen
- Lage krasbestendigheid en stootvastheid





#### 2.2.4. Kalkhennep

Kalkhennep is een isolerend bouw materiaal gebaseerd op hennepscheven - het houtachtige gedeelte van de hennep-stengel - die gewonnen kunnen worden van de hennepplant. De hennepscheven worden gemengd met kalk, eventuele additieven en water, tot een “aardvochtig” mengsel. Deze wordt in een mal of bekisting geplaatst, waarin het kan uitharden. De scheven zorgen voor de isolerende eigenschappen van het materiaal en het bindmiddel kalk voor de samenhang, de massa, een zekere bescherming van de hennepscheven tegen verrotting en een verbeterde brandreactie. De toevoeging van water is nodig voor de uithardingsreacties en is bepalend voor de verwerkbaarheid van het materiaal. Eventuele additieven kunnen onder andere de cohesie verhogen en het uithardingsproces versnellen (Knapen et al., 2020). Door de hoge energiekost die nodig is voor de productie van kalk en het toevoegen van additieven, waardoor het materiaal niet helemaal omkeerbaar is, voldoet dit materiaal niet volledig aan de vooropgestelde definitie van regeneratieve materialen. Toch werd het in deze studie als materiaal opgenomen omdat het materiaal na gebruiksduur wel gecomposteerd kan worden en op die manier terugkeert in de natuurlijke kringloop.

Hennep is een plant die op 1 jaar tijd behoorlijk hoog kan worden, gaande van 1,5 meter tot meer dan 4 meter. De teelt van hennep vraagt een weinig rijke ondergrond, dus weinig meststoffen en verrijkt zelfs de ondergrond na de oogst door de achtergebleven delen van de plant (Knapen et al., 2020). Daarnaast slaat de plant net zoals andere planten CO<sub>2</sub> op wat maakt dat hennep een interessant en duurzaam hergroeibaar materiaal is.

Kalkhennep is een isolerend materiaal. De  $\lambda$ -waarde is wel hoger dan traditionele isolatiematerialen waardoor het materiaal in dikkere pakketten geplaatst moet worden om tot eenzelfde isolerend resultaat te komen. Isohemp blokken krijgen een  $\lambda$ -waarde van 0,07 W/mK toegekend. De huidige EPB-norm vraagt voor een maximale U-waarde van 0,24 W/m<sup>2</sup>K voor wanden (Vlaanderen, 2020). Om aan die eis te voldoen is er een dikte van minimaal 0,29m aan kalkhennep nodig. Tenslotte heeft het materiaal ook een interessante thermische inertie wat kan bijdragen aan een aangenaam zomercomfort (WTCB & De Mets, 2020). Kalkhennep is een ook een sterk hygroscopisch materiaal. Dat wilt zeggen dat het veel water kan opnemen en vasthouden. Een voordeel hiervan is dat pieken in luchtvochtigheid afgevlakt kunnen worden. Een nadeel hiervan is dat wanneer het materiaal zich in een vochtige omgeving bevindt de isolerende waarde sterk zal dalen door de aanwezigheid van water in het materiaal.

Er bestaan verschillende methoden om een project in kalkhennep te realiseren. Het materiaal kan ter plaatse gestort worden. Hierbij wordt het materiaal op de site in een bekisting aangedrukt. Men kan ook geprefabriceerde blokken gebruiken als bouw materiaal. Hierbij wordt de kalkhennep geprefabriceerd als bouwblok. Een voordeel hiervan is dat het materiaal onder gecontroleerde omstandigheden geproduceerd kan worden (zonder weersinvloeden). Men kan er ook voor kiezen om volledige wand elementen geprefabriceerd te maken. Dit zorgt ervoor dat deze nog sneller dan de prefab blokken, geassembleerd kunnen worden op de bouwwerf. Als laatste opties kan men de kalkhennep ook inblazen in een permanente bekisting op de site of kan men er voor kiezen om de kalkhennep tegen een eerder geplaatste structuur te spuiten (Knapen et al., 2020).

De belangrijkste zwakkere eigenschappen van kalkhennep als bouw materiaal waarmee men met aandacht moet omgaan zijn de volgende:

- Vochtgevoelig
- Niet bestand tegen water
- Relatief hoge  $\lambda$ -waarde
- Beperkt draagvermogen

## Hoofdstuk 3: Theoretische benadering

In dit hoofdstuk wordt er op een theoretische manier besproken hoe ontwerpmethodieken gebruikt kunnen worden om, met een materiaal als onderlegger, een ontwerp vorm te geven. Er wordt gekeken wat de basisprincipes zijn voor ontwerp met bepaalde materialen, met welke factoren men rekening moet houden bij materiaalspecifieke toepassingen, welk theoretisch model er reeds bestaat binnen de product-design industrie en hoe dit eventueel teruggekoppeld kan worden aan architecturaal ontwerp.

### 3.1. Basisprincipes

Bouwmaterialen moeten hun beoogde functie vervullen, niet alleen wanneer ze nieuw zijn geïnstalleerd, maar ook gedurende een acceptabele tijdsduur. Hun levensduur kan zo lang zijn als die van het gebouw of, zoals bij verf, het kan slechts enkele jaren duren voordat ze worden vernieuwd. De duurzaamheid of de gebruiksduur van een materiaal op zijn plaats is echter altijd gerelateerd aan de specifieke combinatie van milieufactoren (temperatuur, neerslag, luchtvochtigheid, vorst, ...) waaraan het wordt onderworpen, zodat duurzaamheid of levensduur altijd gerelateerd moet zijn aan de specifieke betrokken omstandigheden. De meeste bouwmaterialen zijn complex in hun chemische en fysische aard. De chemische aard van materialen is zelden zinvol voor de materiaalgebruiker of voorschrijver, omdat ze de implicaties ervan niet begrijpen. Het is echter deze chemische aard, die de reactiviteit bepaalt van een materiaal met andere materialen en met sommige elementen van het milieu. Zo worden vluchtige organische stoffen uitgestoten door bepaalde materialen die de luchtkwaliteit binnenshuis beïnvloeden. De ontwerper heeft gevoel voor scheikunde nodig om het fundamentele verschil in de klassen en soorten materialen te waarderen. Het is vooral belangrijk dat kleine veranderingen in de samenstelling (zelfs sporen van sommige stoffen, zoals bij metaallegeringen) een grote invloed kunnen hebben op de resulterende eigenschappen (Godfaurd et al., 2005). Wanneer men een materiaalkeuze maakt is het van belang dat deze aandachtspunten steeds in overweging genomen worden vooraleer men een ontwerpbeslissing neemt. Door de juiste ontwerp-principes en technieken toe te passen kan men een materiaal op de meest optimale manier inzetten binnen een ontwerp.

Het is belangrijk om in het begin te erkennen dat de algemene functie van een buitenmuur of -dak, in combinatie met vloeren, is om zonnestraling, extreme temperaturen, vocht (als damp of vloeistof), stof en wind te matigen. De wand zorgt ook voor een barrière of filter voor geluid, vuur, fijnstof, insecten, dieren en zelfs menselijk binnendringen. Het kan nodig zijn om licht (raam) door te laten. Een wand moet ook een passende bijdrage leveren aan de vorm en esthetiek van het gebouw in het algemeen. Tenslotte moet deze ook aan een aantal mindere eisen voldoen, zoals kleur, textuur en porositeit. Dit alles moet worden gerealiseerd tegen acceptabele kosten voor de levensduur van het ontwerp (Godfaurd et al., 2005).

Ontwerpen voor de buitenschil van gebouwen zijn zelden op een systematische, rationele manier ontwikkeld. Ze hebben zich langzaam ontwikkeld, gelijk met de graduele veranderingen in sociale en economische patronen en milieueisen. Vandaag de dag, met dynamische architectuur en de vele nieuwe materialen, componenten en constructietechnieken die beschikbaar zijn, is een groot aantal aan ontwerpen mogelijk (Godfaurd et al., 2005).

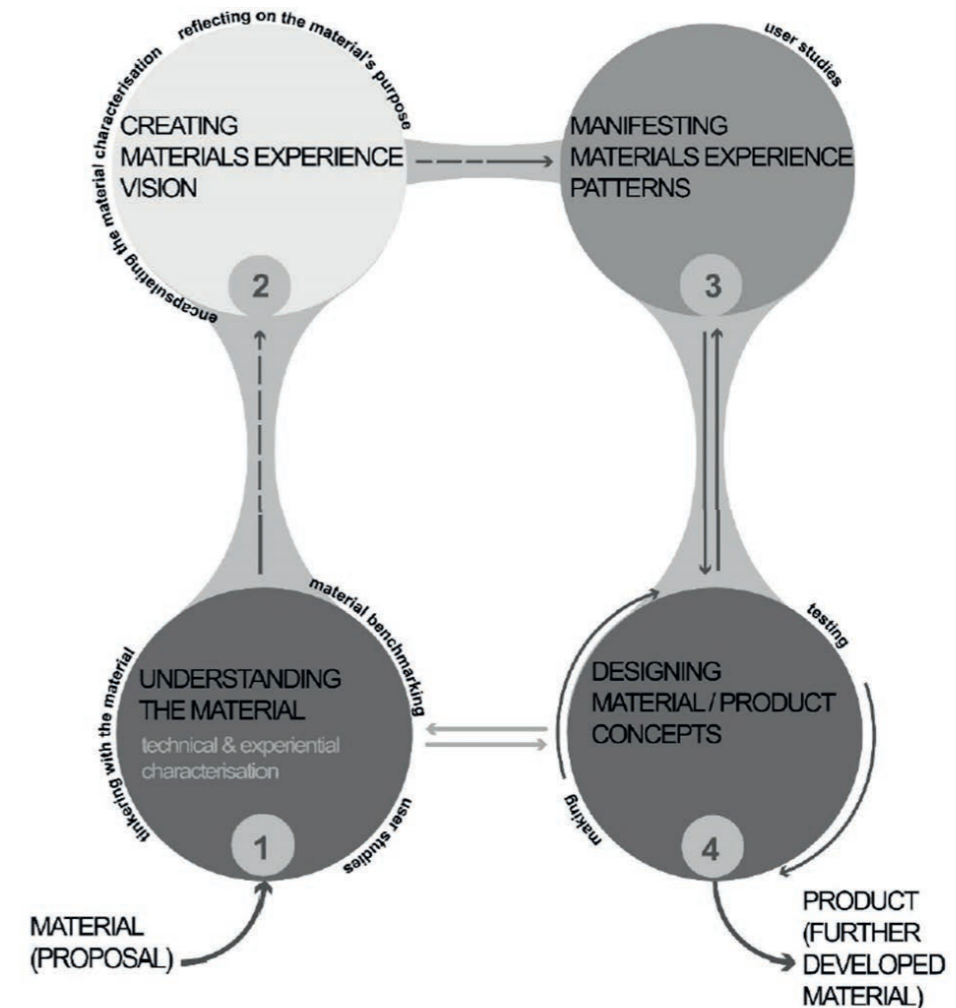
Wanneer men architectuur wilt maken met een bepaald materiaal moeten de voorafgaand besproken aandachtspunten steeds in acht genomen worden. Daarnaast brengen specifieke materialen ook specifieke eigenschappen met zich mee. Ook de locatie van het project en nog andere externe factoren zullen mee bepalen welke maatregelen of constructiemethoden men moet gebruiken om tot een optimaal resultaat te komen.

### 3.2. Product design

Binnen de product design industrie gingen onderzoekers reeds op zoek naar theoretische ontwerp-methodieken die men kan gebruiken om een ontwerp te realiseren, vertrekkend vanuit een materiaal. Het Material Driven Design model werd opgesteld door Karana et al. (2015) als begeleidend model voor materiaalontwerp.

MDD vestigt de focus op de materialiteit binnen het ontwerpproces. In de plaats van een ontwerpproces dat vertrekt vanuit vormgeving of functionaliteit, start deze vorm van ontwerpen vanuit het materiaal zelf als vertrekpunt. MDD draait het ontwerpproces om en zorgt er op deze manier voor dat er nieuwe toepassingen voor materialen ontdekt kunnen worden. Ook zorgt deze manier van aanpak voor een holistische benadering die niet alleen rekening houdt met het eindresultaat van een bijna afgewerkt product, maar ook met de achterliggende levenscyclus van het product (van Bezooijen, 2014).

De MDD-methode gidst de ontwerper in een reis van materiaaleigenschappen en ervaringskwaliteiten naar een finaal functioneel product. Activiteiten ter ondersteuning van deze methode zijn onderverdeeld in vier overkoepelende stappen (Sörensen, 2018). Deze stappen werden visueel verbeeld op het diagram in figuur 2.



### 3.3. Material Driven Design

**Eerste stap: Understanding the material (technisch en ervaringsgerichte karakterisering).**

Bij MDD wordt van een ontwerper verwacht dat hij het gebruikte materiaal begrijpt en deze kan karakteriseren, zowel technisch als ervaringsgericht. Dit om de originele identiteit van een materiaal te kunnen benadrukken wanneer het toegepast wordt in een bepaald product. In deze stap gaat men aan de slag met het materiaal om op die manier een inzicht te krijgen op alle eigenschappen van het materiaal. Hierna volgt materiaalbenchmarking om te eindigen met gebruikersstudies (Giaccardi & Karana, 2015).

**Tweede stap: Creating Materials Experience Vision.**

In de tweede stap wordt, een 'Material Experience Vision', die de intenties van het ontwerp articuleert, gemaakt om het uiteindelijke doel van het ontwerpproces te communiceren. Het doel van deze visie is om de bevindingen uit de eerste stap van de MDD-methode samen te vatten, om de ontwerper te helpen een visionair pad naar een toekomstige toepassing te herkennen (Karana et al., 2015).

**Derde stap: Manifesting Materials Experience Patterns.**

In de derde stap suggereren Karana et al., (2015) dat de ontwerper twee of meer belangrijke betekenissen uit de 'Material Experience Vision' kiest en onderzoekt hoe deze verbonden zijn met formele eigenschappen zoals vorm- en fabricageprocessen. De resultaten worden vervolgens geëvalueerd door zowel het analyseren van de aangeleverde beelden en beschrijvingen van de deelnemers, als door het uitvoeren van een statistische analyse van sensorische schaalbeoordelingen. Aan het einde van deze fase worden de resultaten samengevat en geïnterpreteerd, waarna de relaties tussen de formele eigenschappen van materialen en de onderzochte betekenissen worden geformuleerd.

**Vierde stap: Designing Material / Product concepts.**

In de vierde stap worden vervolgens mogelijke toekomstige materiaal-productconcepten gegenereerd op basis van alle belangrijke bevindingen van stap 1 t.e.m. 3. In dit stadium verder sleutelen aan het materiaal kan nodig zijn om een veelbelovend prototype te maken in het beoogde materiaal. Het gekozen materiaal-productconcept kan dan vervolgens worden ontwikkeld in een regulier ontwerpproces.

### 3.4. Rol van MDD in een architecturale context

De focus van het MDD model staat in tegenstelling tot de focus van dit onderzoek. Binnen deze studie wordt er gefocust op wat de technische prestaties (zwaktes en sterktes) zijn van een materiaal en hoe men hier mee om kan gaan binnen een ontwerp. Terwijl er binnen het MDD model van Karana et al., (2015) eerder gefocust wordt op de beleving van een materiaal en hoe men met de sensoriele kwaliteiten van een materiaal aan de slag kan gaan. Toch werd de theoretische opzet van het model hier onderzocht omdat beide studies hetzelfde doel dienen: Ontwerpen vanuit een materiaal. Een theoretische koppeling tussen het MDD model en architecturaal ontwerp is moeilijk terug te vinden. Toch kunnen de stappen die men bij het MDD model doorloopt, een leidraad zijn voor architecturaal materiaalontwerp.

## Hoofdstuk 4: Ontwerpprincipes

In dit hoofdstuk worden ontwerpmethodieken en -principes aan de hand van voorbeelden gebundeld. Gebaseerd op de onderzochte materiaaleigenschappen van stro, aarde en kalkhennep uit hoofdstuk 2, worden ontwerpprincipes geduid per materiaaleigenschap aan de hand van “good practices”.

## 4.1. Inleiding

In dit onderzoek werden er drie materialen uitgekozen waarvan de materiaaleigenschappen besproken werden. Aan de hand van deze eigenschappen worden ontwerpprincipes ingedeeld. Deze ontwerpprincipes worden met behulp van voorbeelden verbeeld. De ontwerp oplossingen die aan bod komen in deze oplistijng, zijn principes die ook toegepast kunnen worden op materialen met gelijkaardige materiaaleigenschappen. Uiteraard bestaan er nog vele andere materiaaleigenschappen die binnen deze bespreking niet aan bod komen.

### 4.1.1. Matrix materiaaleigenschappen

In hoofdstuk twee werden de materiaaleigenschappen van stro, aarde en kalkhennep besproken. Hieronder worden de belangrijkste zwakkere materiaaleigenschappen nogmaals opgesomd ter overzicht. Daarna worden er per materiaaleigenschap, aan de hand van voorbeelden, ontwerpprincipes opgesomd om met deze eigenschappen te kunnen omgaan.

#### STRO

- Niet bestand tegen water
- Vochtgevoelig (schimmelgroei)
- Beperkt draagvermogen
- Relatief hoge  $\lambda$ -waarde



#### AARDE

- Beperkte waterbestendigheid (regeninslag, opstijgend vocht, ...)
- Beperkt draagvermogen
- Lage krasbestendigheid en stootvastheid



#### KALKHENNEP

- Niet bestand tegen water
- Vochtgevoelig
- Beperkt draagvermogen
- Relatief hoge  $\lambda$ -waarde



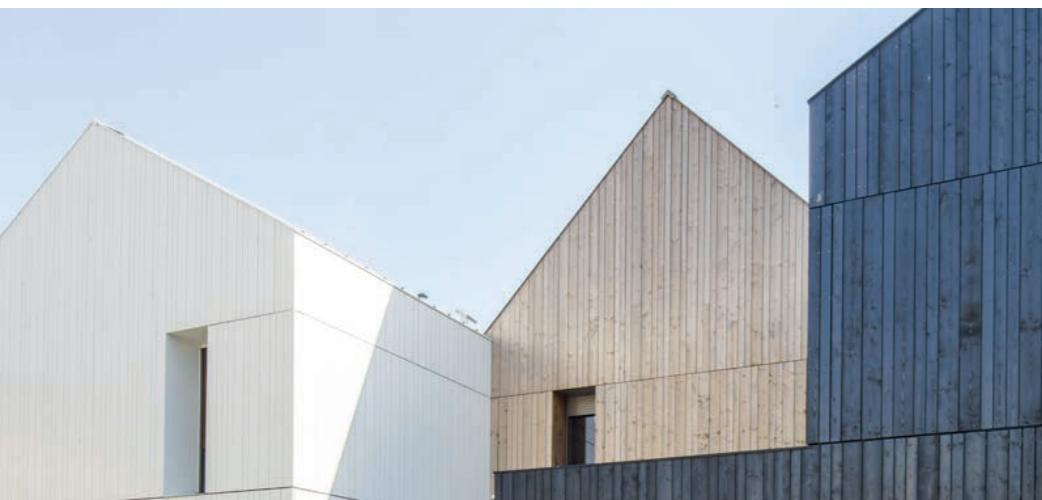
## 4.2. Niet waterbestendig

Langdurig blootgesteld worden aan water kan voor sommige materialen nadelig zijn. Het kan er voor zorgen dat bepaalde materialen hun sterkte verliezen, sneller zullen verweren, visueel aangetast worden, ... Om deze materialen te beschermen tegen dit soort verweer, moet men ze beschermen tegen alle soorten water (neerslag, opstijgend vocht, poetsvocht, ...) waarmee ze in contact kunnen komen.

### 4.2.1. Materiaal inpakken met ander materiaal – beplaten

Wanneer een materiaal dat gevoelig is aan weersinvloeden beplaat wordt met een ander materiaal dat de impact van deze weersinvloeden wel kan opvangen kan men op deze manier het “ingepakte” materiaal, dankzij de eigenschappen van het toegevoegde materiaal, beschermen. Men kan op deze manier samengestelde wanden vormen met eigenschappen die ideaal zijn voor dat project. Plaatmateriaal kan dampopen of dampdicht zijn. Dit aspect is bij hygroscopische materialen een belangrijk aandachtspunt. Het kan een extra akoestische of thermische isolerende functie aanbrengen of de luchtdichtheid van het geheel mee bepalen. Daarnaast kan men ook het uitzicht van de architectuur bepalen en esthetische overwegingen maken met deze materialen.





STRO - 13 Hout- en stro-woningen, NZI Architecten, 2019, Nogent-le-Rotrou, Frankrijk

#### 4.2.1.1. Stro bedekt met hout

NZI architecten kregen de opdracht om 13 individuele sociale huizen te ontwerpen voor een site in Nogent-le-Rotrou te Frankrijk. Ze maakten van de gelegenheid gebruik om innovatieve en ecologische bouwtechnieken verder te verkennen en kozen er daarom voor om het project in stro en hout uit te voeren. Om kosten en tijd te besparen werden er stro/hout/panelen geprefabriceerd. Omdat het houten kaderwerk en het stro relatief licht zijn, was het dan ook geen enkel probleem om deze geprefabriceerde elementen op hun voorbestemde locatie te krijgen. Het stro zit in deze panelen tussen 2 afwerkingslagen ingepakt. Langs de buitenzijde wordt het stro beschermd door een houten bekleding en een waterafstotende folie, zo komen neerslag en andere weersinvloeden van buitenaf niet tot aan het stro. Deze manier van werken zorgt er ook meteen voor dat het stro ten allen tijden tijdens het bouwproces droog gehouden kan worden (Meyers, 2019).

#### 4.2.1.2. Stro bedekt met glas

In Vlaanderen werd een tijdelijk proefproject opgesteld als laatste verblijfsoord voor een ALS patiënt. Met tijdelijkheid, herbruikbaarheid en recyclage in het achterhoofd werd stro als constructiemateriaal gekozen. In dit project heeft het materiaal geen dragende functie, wel een isolerende en esthetische functie. Omdat dit organisch materiaal erg gevoelig is aan schimmelvorming bij blootstelling aan vocht en we te maken hebben met een vochtig klimaat in België, moest men een oplossing zoeken om het materiaal te beschermen tegen neerslag. Door gebruik te maken van glazen platen als afdek materiaal kan men het stro ten alle tijden droog houden en krijgt schimmelvorming geen kans. Omdat men koos voor glas als plaatmateriaal bleef het gebruikte materiaal ook zichtbaar binnen de constructie (Effa, 2019).



STRO - Refuge II, Wim goes Architecture, 2014, Vlaanderen, België



#### 4.2.1.3. Kalkhennep ingepakt in vezelcement-platen

Lemoal Lemoal architecten mochten de Pierre Chevet-sportthal voor de stad Croissy-Beaubourg realiseren. Het project werd ontworpen als een gemengde hennep en houtstructuur. Het structurele principe van het project werd geleid door de vastberadenheid om duurzame materialen met meerdere prestaties te gebruiken. De houten halfgewelfde portieken, die een maximum aan ruimte vrijmaken voor het beoefenen van sport, leunen tegen een muur van hennepblokken ter ondersteuning. Deze hennepblokken zijn gekozen vanwege hun vele comfort- en veiligheidsverhogende eigenschappen, waaronder hun hoge thermische, akoestische, structurele prestaties en brandwerendheid.

Hennep wordt in vrijstaande huizen meestal behandeld met een afwerklaag van pleisterwerk aan de buitenzijde om het materiaal te beschermen tegen neerslag en andere weersinvloeden van buitenaf. Om het onderhoud te vergemakkelijken, zijn de gevels bedekt met een vezelcement bekleding waarvan de panelen afzonderlijk kunnen worden vervangen. Daarnaast werden de kalkhennepblokken aan de buitenzijde ook behandeld met een afdichtmiddel. Over de eigenschappen van dit dichtmiddel werd er geen informatie vrijgegeven en men kan dan ook in vraag stellen in hoeverre de hennepblokken dan nog regeneratief zijn, aangezien deze extra dichtingslaag de omkeerbaarheid van het materiaal beïnvloedt. Lagere delen van de binnenoppervlakken zijn behandeld met henneppleister. Op de bovenste delen zijn de hennepblokken zichtbaar gelaten, waardoor hun akoestische eigenschappen behouden blijven. Op de afbeelding links onder is ook te zien hoe de kalkhennep bouwstenen op een plint van betonnen elementen werden geplaatst. Dit om het materiaal ook tegen opstijgend vocht te beschermen. Onder paragraaf 4.2.6 wordt er meer info gegeven over deze ontwerp oplossing (Pintos, 2021).



KALKHENNEP - salle d'évolution physique et vestiaires, Lemoal Lemoal, 2021, Croissy-Beaubourg, Frankrijk



## 4.2.2 Materiaal inpakken met ander materiaal – bepleisteren

Door het bepleisteren van een materiaal wordt er een extra bescherm laagje aan het totale bouwwerk toegevoegd. Een pleisterlaag kan beschermen tegen neerslag, vocht, externe impact en andere vormen van mogelijke degradatie. Men kan kiezen voor een minerale gevelpleister gebaseerd op kalk of cement, aangevuld met zand, of voor een synthetische pleister, vervaardigd uit kunsthars/siliconen. Leempleisters zijn niet geschikt voor dit soort toepassing aangezien ze zelf beschermd dienen te worden tegen water en vocht. Pleisterwerk is ook beschikbaar in verscheidene kleuren en kan op die manier ook het esthetische uitzicht van een project bepalen.

### 4.2.2.1. Stro bepleisterd met kalkpleister

In dit gebouw hebben de architecten geprobeerd de constructieve oplossingen terug te brengen tot de weinige die het project nodig had. Als een enkele architecturale entiteit is de omtrekmuur volledig gemaakt met stobalen. De ontwerpers wouden een continuïteit in de omtrek verkrijgen en de veelzijdigheid van het materiaal bewijzen wanneer het zorgvuldig wordt beschermd. De houten hoofdstructuur (zowel voor de buitenmuur als voor het dak) is opgevuld met stobalen om het isolatieniveau te maximaliseren. Een kalkpleister van 30 mm, afgewerkt met silicaatverf laat de hele muur dampopen om zo condenserend vocht te voorkomen, maar beschermt tegelijkertijd het binnen-gelegen stro tegen neerslag en weersinvloeden van buitenaf. Het dak werd voor dit ontwerp op zo een manier ontworpen dat er een oversteek ontstaat. Deze oversteek kan de onderliggende materialen ook beschermen tegen neerslag. In de volgende paragraaf, 4.2.3, wordt deze ontwerp oplossing verder toegelicht (Rojas, 2021).



STRO - SCL Straw bale house, Jimmi Pianezzola, 2016, Vicenza, Italië

## 4.2.3 Dakoversteek

Wanneer een materiaal gevoelig is aan neerslag kan men dit materiaal steeds beschermen door het onder een vergroot dakoppervlak te plaatsen. Door het dakoppervlak te vergroten vangt deze meer neerslag op en zal de onderliggende structuur grotendeels droog blijven. Deze architectonische ingreep leent zich er ook toe om architecturaal interessante uitkomsten te bekomen

### 4.2.3.1. Kalkhennep beschermd door een dakoversteek



KALKHENNEP - House LO, Ateliér Lina Bellovičová, 2018, Velehrad, Tsjechische republiek

De bouwheer van dit project houdt van natuur en bossen. Hij wilde dat zijn huis in verbinding stond met de omringende natuur en ecologisch zou zijn. Ook over het bouw materiaal had hij een duidelijk idee. Aangezien hennep in Tsjechië nog nooit als bouw materiaal werd gebruikt, was dit voor de architect een grote uitdaging. Bouwen met hennepbeton kalkhennep is eenvoudig en stelt de bouwer in staat om zijn huis zelf te bouwen. Materiaal versteent gedurende meerdere jaren en onttrekt daarbij kooldioxide uit de lucht. Rondom het huis loopt een groot terras dat door de overstek tegen slecht weer wordt beschermd, zodat de eigenaar zoveel mogelijk buiten kan zijn. Hierdoor worden ook de kalkhennep muren beschermd tegen de weersinvloeden. Het is niet duidelijk of men de kalkhennep wanden van dit project ook nog behandelde met bijvoorbeeld een lijnolie om het nog verder te beschermen tegen weersinvloeden. (Silva, 2021)



AARDE - Centre for earth architecture, Kéré Architecture, 2010, Mopti, Mali



#### 4.2.3.2. Aarde beschermd door een dakoversteek

De bouw van het Center for Earth Architecture volbrengt de activiteiten van de AKTC in Mopti na de restauratie van de moskee en de aanleg van een nieuw rioleringsysteem. Het bezoekerscentrum is volgens het programma opgedeeld in drie verschillende gebouwen die verbonden zijn door twee dakvlakken. Alle wanden en tongewelven zijn gemaakt van BTC (compressed earth blocks) die zeer geschikt zijn voor de klimatologische omstandigheden dankzij hun natuurlijke temperatuurbuffer en daardoor een comfortabele binnentemperatuur garanderen. Het overhangende dak zorgt voor kwalitatieve buitenruimtes en beschermt daarnaast ook de rest van de bouwschil tegen de hevige regenval tijdens het regenseizoen dat hier tijdens de zomer plaatsvindt. Ventilatieopeningen in de wanden en de gewelven zorgen voor een natuurlijke luchtstroom zodat de gebouwconditionering werkt zonder mechanische ondersteuning (Henry, 2022).

#### 4.2.3.3. Aarde beschermd door een dakoversteek

De eerste bibliotheek van Muyinga werd gerealiseerd door BC architecten. Later zal deze onderdeel van een toekomstige inclusieve school voor dove kinderen worden. Een grondige studie van de lokale architectuurpraktijken in Burundi vormde de basis van het ontwerp van het gebouw. De bibliotheek is georganiseerd in samenspraak met een longitudinale overdekte circulatieruimte. De algemene vorm van de bibliotheek is het resultaat van structurele logica, voornamelijk afgeleid van de materiaalkeuze (gecomprimeerde aardblokken metselwerk en gebakken kleidakpannen). De lokaal geproduceerde dakpannen waren aanzienlijk zwaarder dan geïmporteerde golfplaten. Dit inspireerde het structurele systeem van dicht bij elkaar staande kolommen met intervallen van 1m30, die ook fungeren als steunberen voor de hoge muren van de bibliotheek. Deze ritmische herhaling van kolommen is een herkenbaar kenmerk van het gebouw, zowel aan de buitenkant als aan de binnenkant. Het dak heeft een helling van 35% met een overstek ter bescherming van de ongebakken CEB-blokken en draagt bij aan de architectuur van de bibliotheek (Aguilar, 2021)



AARDE - Library of Muyinga, BC architects, 2012, MUYINGA, BURUNDI

#### 4.2.4. Afdeksteen

Wanneer een watergevoelig wandelement aan de bovenzijde niet overdekt wordt door een dakvlak is het van belang dat het element op een andere manier afgedekt wordt door bijvoorbeeld een afdeksteen te plaatsen of een soort afkapping van het element te voorzien. Wanneer men dit niet zou doen heeft regen de kans om loodrecht op het element uit watergevoelig materiaal in te vallen en kan deze op die manier makkelijk schade veroorzaken.

##### 4.2.4.1. Aarde met betonnen afdeksteen

De kleuterschool van Aknaibich, bestaande uit slechts 1 klaslokaal, niettemin een holistisch architectonisch ontwerp, waarin gemeenschapsdynamiek en bioklimaten zijn verwerkt. De stijl van het gebouw zou een nieuwe volkstaal kunnen worden genoemd, geïnspireerd op lokale typologieën, materialen en technieken. Tegelijkertijd heeft het een eigentijdse uitstraling, een performante bio-klimatologische werking en een aardbevingsbestendig ontwerp. De kleuterschool van Aknaibich heeft traditioneel hellende fundamenten van lokaal geproduceerde natuursteen, met lemen muren, en muren van aangestampte aarde. Het plat dak werd vervaardigd uit hout en aarde. De buitenafwerking is gedaan met een "tamelass" pleister, een mix van 2 aardes, stro en zand, terwijl de binnenafwerking is gemaakt van gepolijst "nous-nous", een "halve helft" aarde en gips om te komen tot een ademend binnenpleister dat indirect zonlicht verspreid. De aarde-muren die de binnenplaats omwallen, worden niet meer beschermd door een dakoppervlak. Om te voorkomen dat deze te veel zouden worden aangetast door erosie werden ze met een betonnen band afgedekt (Valenzuela, 2021).



AARDE - Preschool of Aknaibich, BC Architects, 2014, FES, MOROCCO

#### 4.2.5. Erosie onderbrekingen

Neerslag kan schade aan een materiaal aanbrengen door het veroorzaken van erosie. Erosie is het schuren van wind, water of ijs over oppervlakten waarbij dat oppervlak uitslijt en er deeltjes verplaatst worden. Telkens wanneer het regent worden er met het afstromende water deeltjes verplaatst. Om het erosieproces op vlakke oppervlakken te vertragen kan men barrières maken die dwars op de erosierichting staan. In een verticale gevel betekent dit dus horizontale onderbrekingen zodat de stroomsnelheid van aflopend water beperkt wordt, waardoor het meesleuren van stukjes materiaal zal verminderen.

##### 4.2.5.1. Horizontale bakstenen in aarde



AARDE - Rauch House, Boltshauser architecten, 2008, Schlins, Oostenrijk

Het ritme van de gevel in dit project wordt bepaald door erosiecontrole. Lange horizontale bakstenen werden als element toegevoegd aan de rammed earth muren en dienen om de waterstroom op het oppervlak van het gebouw te vertragen. De materialiteit en vorm van het woonhuis zijn directe reacties op de steile helling die aanwezig is op het slanke perceel. Het interieur van het huis is ontwikkeld in de vorm van sequenties van individualiseerbare ruimtes die verdiepingsgewijs inspelen op de wisselende omstandigheden. In tegenstelling tot de meer organische, archaische kleiarchitectuur, streeft de morfologie van het gebouw naar een zekere helderheid en scherpte. De stroken bakstenen die tussen de typische kleilagen worden gestoken, stabiliseren de bouwstructuur optisch door de horizontaliteit te benadrukken en de licht- en schaduw effecten te versterken. (Architekten, 2010)

#### 4.2.6. Plint

Opspattend en opstijgend vocht kunnen er (ondanks dat de structuur misschien op andere manieren wel beschermd werd tegen neerslag enz.) voor zorgen dat waterschade ontstaat aan bepaalde materialen. Zeker in gebieden met natte ondergronden of overstromingsgevoeligheden is het van belang dat men hier met extra aandacht mee om gaat. Door de volledige structuur op te tillen of de aanzet van het gevoelige materiaal te verhogen door een plint toe te voegen, vervaardigd uit een ondoorlatend materiaal, kan men er voor zorgen dat opspattend/opstijgend water geen kans krijgt om tot bij de kwetsbare materialen te geraken.

##### 4.2.6.1. Aarde beschermd met stenen plint



AARDE - Bio-climatic Preschool, BC Architects, 2017, MERZOUG, MOROCCO

De kleuterschool van Ouled Merzoug, ontworpen door BC Architecten, heeft fundamenteën van lokaal geproduceerde natuursteen, met lemen muren en een plat dak van hout en aarde. Deze fundamenteën lopen door in een plint die onder het hele bouwwerk door loopt. Dankzij deze plint worden de muren beschermd tegen opspattend of opstijgend water. De buitenafwerking is gedaan met een mix van 2 soorten aarde, stro en zand, terwijl de binnenafwerking is gemaakt van gepolijste "nouss-nouss". De zuidoost- en noordwestgevels met harde, lage zoninslagen worden beschermd door schaduwen van bomen of binnenplaatsen, terwijl de zuidgevel een spouwmuur heeft voor isolatie. De muren hebben ook een grote thermische massa, waardoor het gebouw overdag koel is, maar 's nachts warmer blijft tot de ochtend (Tapia, 2021).

#### 4.2.6.2. Aarde beschermd door het optillen van de structuur

Dit project is tot stand gekomen in het kader van het onderzoek van Practice Architecture naar natuurlijke materialen en koolstofarme bouwtechnieken met projecten als Flat House. Het gebouw is vanaf de grond opgetild om zo waardevolle overdekte buitenruimte te maximaliseren. Dit zorgt er hiernaast echter ook voor dat de bouwmaterialen niet in rechtstreeks contact komen met de ondergrond, waardoor opspattend neerslag, opstijgend vocht of andere degradatie voorkomen worden. Er was in totaal minder dan een kubieke meter beton nodig voor de fundering van dit bouwwerk, met de mogelijkheid om deze zelfs volledig te elimineren. Het gebouw is effectief CO<sub>2</sub>-negatief, met een biomassakachel en zonne-energie, voornamelijk gebouwd met koolstofvangende, geteelde materialen (Polyvalent Studio, z.d.).



KALKHENNEP – Polyvalent Studio, Practice Architecture, 2019, Pidley, Huntigdon, Cambridgeshire, Engeland



KALKHENNEP – Polyvalent Studio, Practice Architecture, 2019, Pidley, Huntigdon, Cambridgeshire, England

### 4.3. Vochtgevoelig

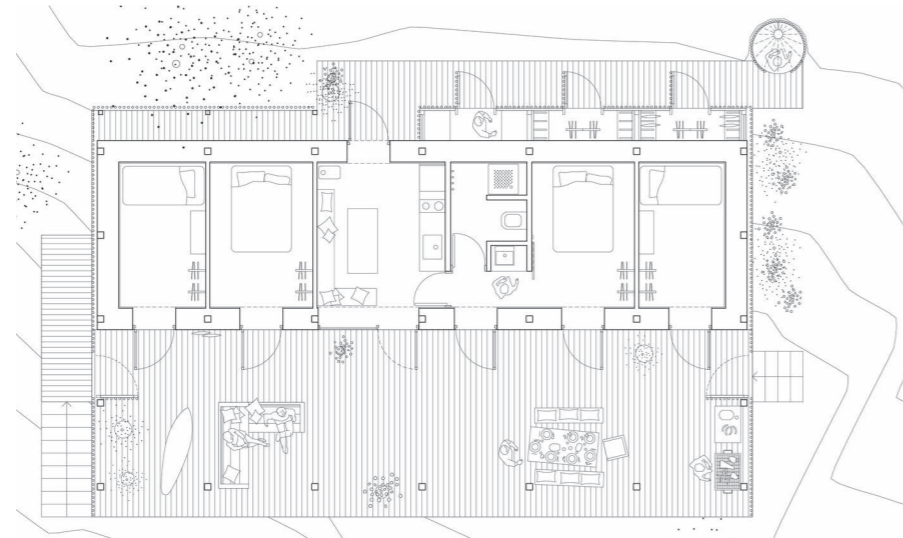
Bij materialen die gevoelig zijn aan vocht moet men vermijden dat er enige mogelijkheid is voor vocht om zich op te stapelen binnen het materiaal. Inwendige condensatie/oppervlaktecondensatie moeten ten alle tijden vermeden worden door het juist uitvoeren van bouwknoppunten. Vocht kan ook schimmeligroei bevorderen. Natuurproducten zijn daarnaast ook vaak een ideale voedingsbodem voor schimmeligroei. In het geval van stro is het van belang dat men om schimmeligroei te voorkomen het vochtgehalte binnen het materiaal op minder dan 20% houdt (Koh & Kraniotis, 2020). Daarom is het van belang dat men dit materiaal binnen het bouwwerk zo goed mogelijk zal beschermen tegen alle vormen van water en vocht en dat het materiaal altijd de optie heeft om te drogen wanneer het materiaal toch te nat/vochtig wordt.

#### 4.3.1. Dampopen afwerking

Door gebruik te maken van dampopen constructie materialen, zorg je voor voldoende damp-afvoer op tijdstippen dat de buitenlucht droger is. Vaak noemt men dit ook wel 'ademend' bouwen. Door de afwerking van een vochtgevoelig materiaal dampopen uit te voeren, geeft men het materiaal de kans om altijd te kunnen ademen en uitdrogen. Op die manier voorkomt men dat vocht zich zou opstapelen binnen de constructie.



STRO - Casa Tumán, Studio Selva, 2016, Chili



STRO - Casa Tumán, Studio Selva, 2016, Chili

#### 4.3.1.1. Stro met een dampopen leempleister

Casa Tumán is een privévilla in de centrale kuststreek van Chili, ontworpen en gebouwd door het Amsterdamse kantoor Studio Selva, met voornamelijk lokaal geproduceerde materialen. De kolom-balkconstructie met eucalyptusschermen, stro-invulwanden en leempleister zorgen voor een uitstekend binnenklimaat in deze vochtige regio. Aan de binnenzijde van de strobalen wanden werd een damp-scherm toegevoegd. Dit zorgt er voor dat vocht vanuit de binnenruimtes niet inwendig kan condenseren in de stro-constructie. De buitenzijde van de strowanden werd afgewerkt met een leempleister. Deze is dampopen, waardoor inwendig vocht steeds kan ontsnappen en er geen vocht zal opstapelen. (Sagredo, 2019)



#### 4.3.2. Ventileren van het materiaal

Een vochtgevoelig materiaal moet steeds de kans krijgen om te kunnen ademen en drogen. Wanneer men een dergelijk materiaal inpakt met een ander materiaal om deze te beschermen, is het van belang dat het ingepakte materiaal niet “verstikt” wordt. Wanneer men bijvoorbeeld een beplating aanbrengt tegen een vochtgevoelig materiaal is het van belang dat er achter deze beplating ruimte is voor luchtcirculatie zodat het vochtgevoelige materiaal geventileerd kan worden om zo vocht naar buiten te transporteren.

##### 4.3.2.1. Houten beplanking met luchtspouw

In het project van NZI architecten dat al eerder besproken werd onder paragraaf 4.2.1.1, werd stro ingepakt in een houten structuur met houten beplanking als buitenafwerking. Tegen het stro aan de buitenzijde werd er een waterwerende (dampopen) doek geplaatst om het stro te beschermen tegen eventuele doorslaande neerslag. Tussen deze doek en de houten buitenafwerking werd er een luchtspouw voorzien. Dit om zowel het hout als de rest van de constructie te laten “ademen”. Op die manier krijgt de constructie de kans om inwendig vocht naar buiten af te voeren. Op de afbeelding hieronder is te zien hoe men een luchtspouw vrijgelaten heeft tussen de houten beplanking en de vochtwerende doek die tegen het stro werd aangebracht.



STRO - 13 Hout- en stro-woningen, NZI Architecten, 2019, Nogent-le-Rotrou, Frankrijk

##### 4.3.3. Koudebruggen vermijden

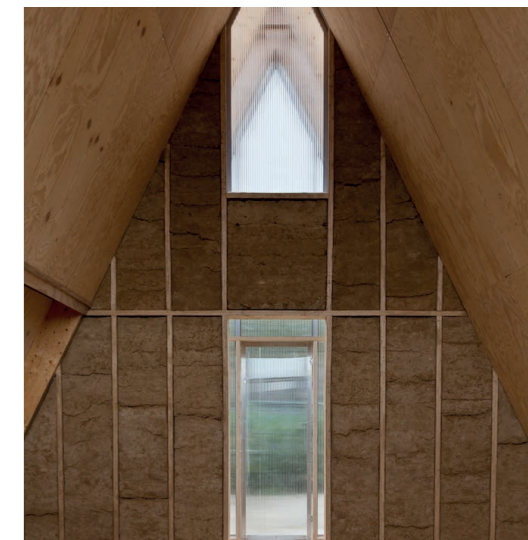
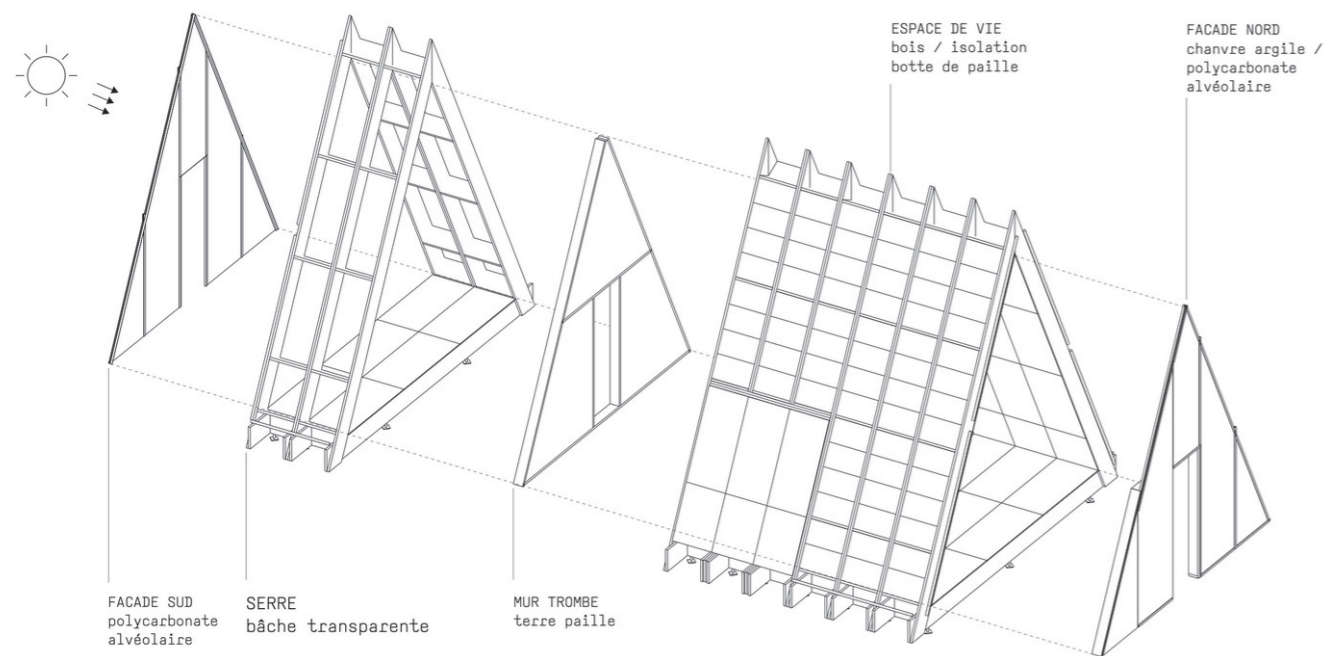
Damp condenseert op koude plekken. Om inwendige/oppervlakte condensatie te voorkomen in of op vochtgevoelige materialen, is het van belang dat men koudebruggen binnen de constructie vermijdt. Wanneer men dat niet doet, zal vocht zich opstapelen op deze koude plaatsen en het vochtgevoelige materiaal beginnen aantasten.

#### 4.4. Beperkt draagvermogen

Sommige regeneratieve materialen bezitten een beperkter draagvermogen. Dit betekent echter niet dat het niet mogelijk is om een volwaardige constructie te maken met deze materialen. Door slim om te gaan met het ontwerp van de materialen kunnen ze toch nog in zo goed als elke toepassing ingezet worden.

##### 4.4.1. Structure-infill systeem

Door een materiaal met een zwakker draagvermogen te combineren met een materiaal met een groot draagvermogen, kunnen deze zwakkere materialen toch deel uitmaken van imposante constructies. Een invulstructuur kan vervaardigd worden uit een ander materiaal met een groot draagvermogen, waarna deze opgevuld kan worden met het regeneratieve materiaal met een beperkt draagvermogen.



AARDE - HENNEP - STRO - Aire De Repos Shelter, Atelier Craft, 2021, Parijs, Frankrijk

##### 4.4.1.1. Houtstructuur met aarde, hennep en stro

Het project "Aire de Repos", werd ontworpen als een tijdelijke en mobiele constructie om overdag als een polyvalente ruimte te dienen voor jonge migranten. Het project is ontworpen op basis van bioklimatische principes om de binnentemperatuur op een passieve manier te regelen. De zuidgevel van polycarbonaat en de aangrenzende muur van aangestampte aarde warmen met behulp van zonne-energie de ruimte op. De noordgevel, opgebouwd uit een klei-hennepmix, en de stropapels op het dak zorgen ervoor dat die gewonnen temperatuur behouden blijft. De constructie bestaat uit een geprefabriceerde houten vakwerk waarin zowel het stro als de klei-hennepmix binnen geplaatst werden. Op deze manier kan het beperkte draagvermogen van deze materialen omzeild worden en worden de lasten door het houten vakwerk opgevangen (Pintos, 2021).

#### 4.4.2. Boogconstructie

Boogconstructies hebben het voordeel dat ze de ideale vorm hebben om drukkrachten boven een opening af te leiden. Door het gebruiken van deze vormgeving kunnen materialen met een zwakker draagvermogen op hun meest optimale manier ingezet worden om krachten van bovenliggende constructies, boven openingen in de constructie, op te vangen.

##### 4.4.1. Boogconstructie in aarde en kalkhennep



AARDE - KALKHENNEP - Regional house, BC Architects, 2015, Edegem, België

Binnen een reeds bestaand pakhuis werd een nieuwe architecturale toevoeging gedaan. Het project werd opgevat als een nieuw opvangcentrum voor natuur- en ecologie-educatie voor de regio. Het ontwerp interpreteert het bestaande pakhuis als een omsloten tuin, waarbij de bestaande muren worden beschouwd als tuinmuren. Structureel gewelfde muren, geïnspireerd op het boogmetselwerk van het fort, zijn gemaakt van samengeperste aardeblokken van lokale klei. Een isolerende gevel en dak, vervaardigd uit kalkhennep blijven zichtbaar als afwerking en maaken dit gebouw CO<sub>2</sub>-negatief. Slechts twee bouwtechnieken werden gebruikt, met als resultaat een simpele, eerlijke structuur. Dankzij de boogstructuren die in de wanden bestaan, kunnen lasten optimaal verdeeld worden en worden de materialen niet onnodig zwaar belast (Sagredo, 2020).

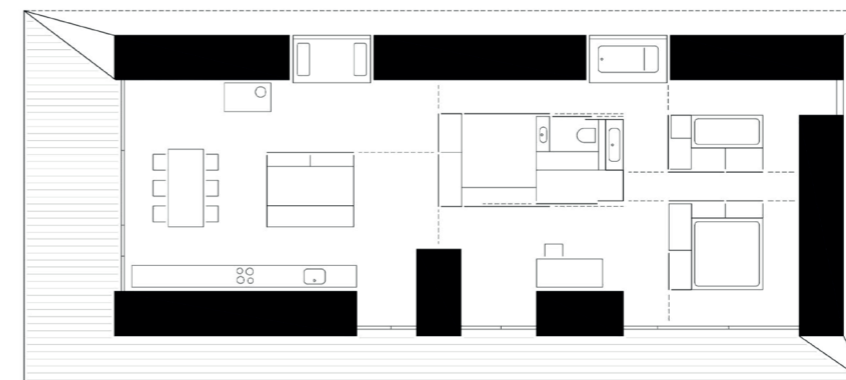
#### 4.5. Relatief hoge $\lambda$ -waarde

Wanneer een materiaal een hogere  $\lambda$ -waarde heeft dan een ander materiaal betekent dit dat het materiaal met een hogere  $\lambda$ -waarde minder goed zal isoleren dan een materiaal met een lagere  $\lambda$ -waarde van dezelfde dikte. Om dit te compenseren kan men er voor kiezen om het materiaal met een grotere dikte uit te voeren of om de beoogde isolatiewaarden te bekomen door extra materialen te introduceren met een beter isolatievermogen.

##### 4.5.1. Dikke uitvoering van het materiaal

Wanneer een regeneratief materiaal een hogere  $\lambda$ -waarde heeft dan een ander technologisch ontwikkeld materiaal, kan men het materiaal met hogere  $\lambda$ -waarde in een grotere dikte toepassen om toch dezelfde benodigde isolerende waarde te bekomen.

##### 4.5.1.1. Dikke sto-wanden



STRO - Straw bale house, Georg Bechter Architektur + Design, 2014, Dornbirn, Oostenrijk







*STRO - Straw bale house, Georg Bechter Architektur + Design, 2014, Dornbirn, Oostenrijk*

Verscholen achter houten bekleding en leempleister bevindt zich het materiaal dat dit huis uniek maakt in de regio: strobalen. De balen dienen zowel als thermische isolatie als constructief wandelement. Deze ongebruikelijke materiaalkeuze was het gevolg van de wens van de opdrachtgever naar een bouwmethode die zowel ecologisch verantwoord als uiterst kostenefficiënt was. Zogenaamde »jumbobalen« met doorsneden van 70 × 120 centimeter en lengtes tot 240 centimeter werden als gigantische metselstenen gestapeld en beplakt met een pleisterlaag van drie centimeter. Omdat de strobalen in deze grote dikte de wand opmaken, leveren ze ook meteen meer dan voldoende isolatie voor de woning. Binnen het dakvlak worden de balen vastgehouden in geprefabriceerde houten kokerbalken, die op de buitenmuren rusten en ter plaatse aan elkaar zijn vastgemaakt om op die manier een stijve dakplaat te vormen. In het westen en zuiden beschermt de diepe overstek tot 2,5 meter niet alleen de binnenruimtes tegen de hoge stralen van de zomerzon, maar ook de strobalen tegen slagregen (Residence in Dornbirn - DETAIL inspiration, z.d.).

#### 4.5.2. Toevoegen van extra isolatielaag

Wanneer men een bepaalde isolatiewaarde wilt behalen bij een project maar men de dikte van de wanden wilt beperken, of het gekozen materiaal leent zich er niet toe om dik uitgevoerd te worden, kan men er ook steeds voor kiezen om een extra isolatielaag aan de constructie toe te voegen in een materiaal met sterke isolerende eigenschappen. Het valt echter wel in twijfel te trekken hoe duurzaam het eindresultaat zal zijn wanneer er andere, niet regeneratieve materialen aan het totaalproject worden toegevoegd.



## Reflectie

Naast de voorgenoemde ontwerp oplossingen kan men er ook altijd voor opteren om materialen chemisch te gaan versterken of verbeteren. Binnen dit onderzoek werd deze piste niet verder onderzocht omdat we de focus hier vooral op het ontwerpend vermogen om materialen toe te passen wensten te leggen. Deze aanpassingen hebben vaak ook zeer negatieve ecologische gevolgen doordat de chemische samenstelling dan gewijzigd wordt en de materialen vaak niet meer reversibel zijn, waardoor hun regeneratieve karakter ook verloren gaat.

Er bestaan meer regeneratieve materialen dan de drie materialen die besproken werden binnen dit onderzoek. Die materialen bezitten elk hun eigen unieke materiaaleigenschappen die kunnen verschillen van de eerder besproken materiaaleigenschappen. Het kan ook voorkomen dat er wel een overlap in materiaaleigenschappen bestaat, zoals bij de onderzochte materialen ook het geval was. Wanneer dit voorkomt kan men de vooropgenoemde ontwerpmethodieken ook als onderlegger gebruiken voor deze materialen.

Er zijn wellicht naast de vooropgenoemde ontwerpmethodieken nog vele andere goede voorbeelden van hoe men aan de hand van slimme ontwerp oplossingen een materiaal steeds binnen een project kan toepassen.



Foto maquette eigen project

## Masterproject

### Beschrijving

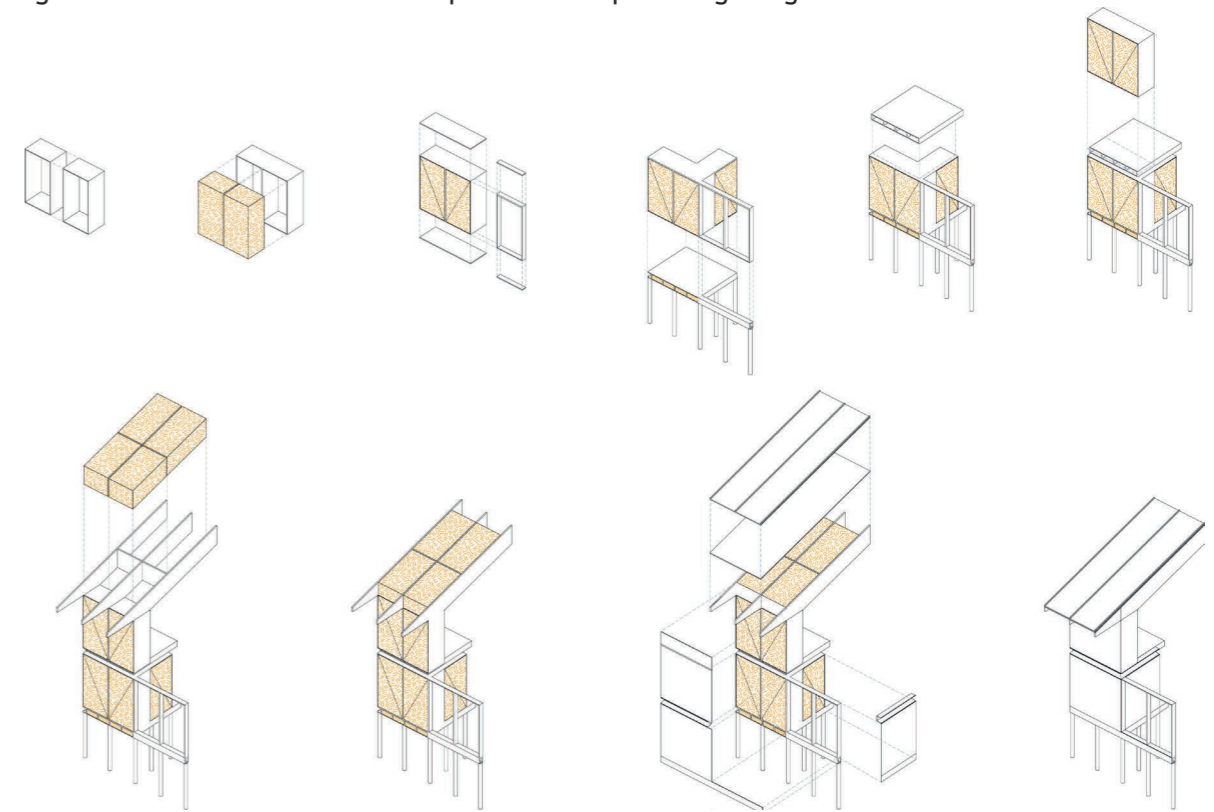
Het project situeert zich in schakkebroek. Dat ligt dan weer op zijn beurt in de regio rond Stevoort. Stevoort staat gekend als een regio vol fruitteelt. Dit soort landbouw typeert dan ook de regio en heeft een grote invloed op het ruimtelijk gebruik .

Bij het oogsten van de fruitteelt is er elk jaar een grote nood aan extra arbeidskrachten. Deze arbeiders zijn vaak buitenlandse arbeiders die, in ons land voor een laag loon, deze zware arbeid willen verrichten. Vandaag de dag krijgt deze groep mensen niet de erkenning of waardering die ze zouden moeten krijgen. Ze blijven vaak onzichtbaar binnen onze maatschappij terwijl ze deze wel voor een groot deel ondersteunen. Daarnaast worden deze seizoenarbeiders vaak onder slechte wooncondities gehuisvest.

Met dit project probeer ik een oplossing te bieden voor deze huisvestingsproblematiek. Deze wordt vandaag reeds veel besproken en er bestaan ook al enkele regelgevingen. Helaas gaan deze nog te vaak enkel over oppervlaktes en getallen, en niet over de noden van de arbeiders zelf.

Voor het huisvesten van seizoenarbeiders is er enkel tijdens de werkmomenten nood aan ruimte om deze arbeiders te laten verblijven. Tijdens andere momenten doorheen het jaar zou deze ruimte leegstaan. Daarom is het interessant om deze ruimte dubbel te gebruiken. Door ook agritoerisme te introduceren op deze site kunnen de verblijfsruimten voor arbeiders ook op andere momenten doorheen het jaar nuttig in gebruik gesteld worden. Het ontwerpvragestuk bestond er dus uit om op zoek te gaan naar een architectuur die zowel seizoenarbeiders als agritoeeristen huisvest, en dit met steeds de nodige aandacht voor de woonculturen van de arbeiders.

Om het project vorm te geven werd er gekozen voor het bouwen met stro. Dit omdat stro een lokaal oogstbaar bouw materiaal is met een regeneratief karakter. De constructie van het project werd opgebouwd rond de standaardafmetingen van een strobaal. Hieruit vloeide een modulair systeem voort dat naderhand volledig demontabel is en een kleine impact nalaat op de omgeving.



Materiaalconcept eigen project



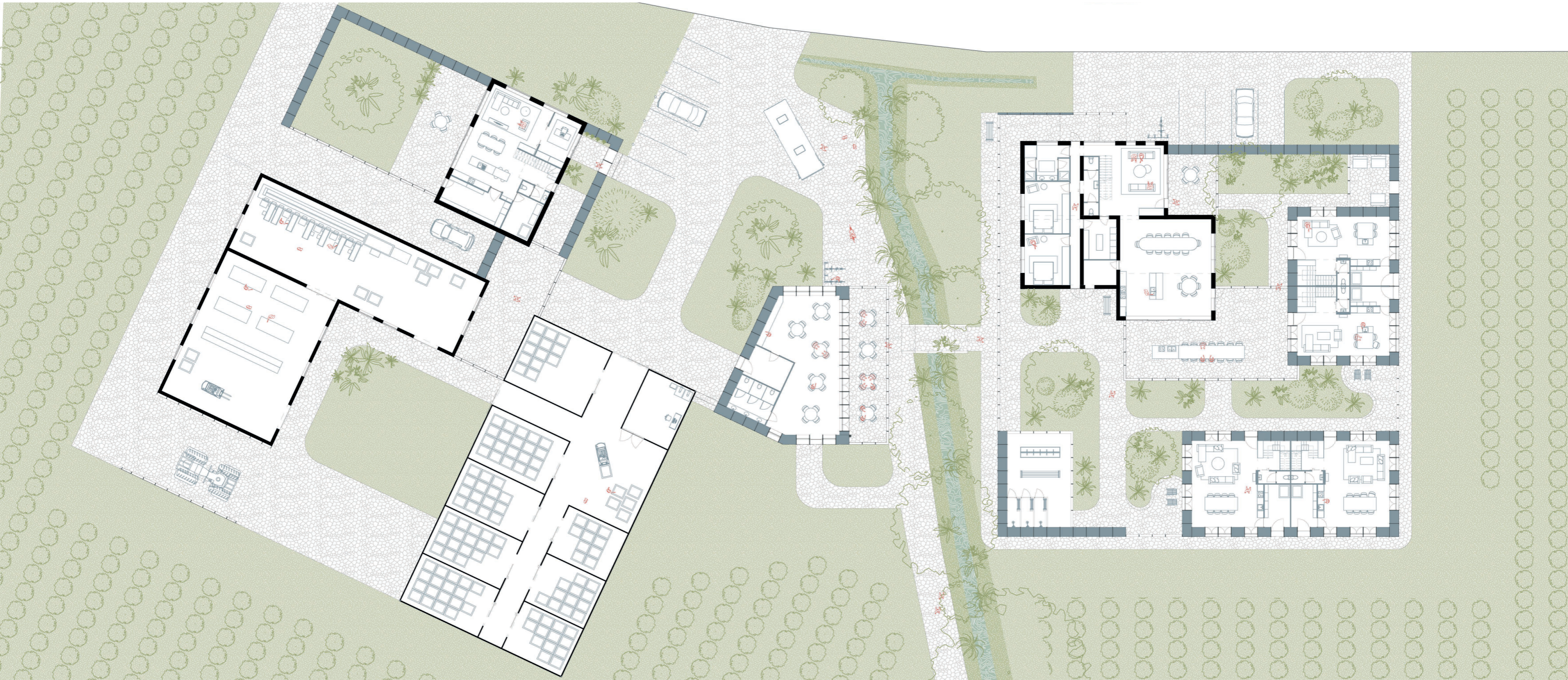
Foto maquette eigen project

## De link tussen scriptie en project

Dankzij het onderzoek dat ik deed voor het schrijven van deze scriptie bouwde ik een brede kennis op over het toepassen van regeneratieve bouwmaterialen binnen een architecturaal project. De opsomming aan good practices waren voor mij handige voorbeelden van direct toepasbare technieken en ontwerpmethoden. Hierdoor kon ik binnen mijn eigen ontwerpproces vlot de juiste materiaalkeuzes maken en de juiste technieken toepassen.

Anderzijds heeft ook mijn ontwerpproject geholpen in het bijsturen van mijn scriptie. Dankzij de voortgang binnen de ontwerpstudio ontdekte ik mijn eigen nood aan een algemene database van goede voorbeelden om een eigen ontwerp op te kunnen baseren. Dit heeft er toe geleid dat ik er voor gekozen heb om ontwerpprincipes voor regeneratiebouwmaterialen te onderzoeken aan de hand van een opsomming van good practices. Ook het kiezen voor lokale regeneratieve materialen was een keuze die voortvloeide uit de attitude die werd aangenomen binnen de ontwerpstudio. Hier werd er namelijk erg gefocust op het onderhouden van korte ketens en een lokale productie.

Grondplan eigen project



De ontwerpmethodieken die eerder opgesomd werden in deze scriptie konden dus rechtstreeks toegepast worden binnen mijn eigen ontwerp. Angezien ik er binnen de studio voor koos om met stro te werken, kon ik alle aandachtspunten die onderzocht werden binnen deze scriptie, mee nemen in mijn eigen ontwerp. De ontwerpmethodieken die ik zelf toepaste zijn de volgende:

- **Bepoelsteren van het materiaal:** Om het materiaal te beschermen tegen weersinvloeden, water, ... maar ook om het uitzicht van de architectuur te bepalen.

- **Plint/Optillen van de structuur:** Door het toepassen van een schroeffundering ontstond de mogelijkheid om de structuur boven het maaiveld te laten beginnen. Hierdoor is deze beschermd tegen opstijgen vocht.

- **Afdeksteen(metaalprofiel):** Bovenop de vrijstaande wanden werd een metalen profiel voorzien dat de functies van een afdeksteen vervult.

- **Structure infill systeem:** De stobalen werden in dit project in een houten kader-systeem geplaatst waardoor de totaalstructuur een groter draagvermogen kreeg.

- **Dikke uitvoering van het materiaal:** Het stro werd toegepast in dikke wanden om op die manier voldoende isolerend te zijn.

## Zelfevaluatie

Zowel het maken van deze scriptie als het voltooien van de studio opdracht waren voor mij erg leerrijke ervaringen. Ik leerde om meer aandacht te schenken aan het kiezen van een bouw materiaal en de eigenschappen van dit materiaal. Maar ik leerde ook om nog meer rekening te houden met de sociale gevoeligheden die in een project kunnen zitten.

Daarnaast ben ik ook heel erg dankbaar voor de collectieve kennis die binnen de studio werd opgedaan rond het productieve landschap en voedsellandschappen, in combinatie met architectuur. Net zoals ik heel erg dankbaar ben voor de kennis die ik verkreeg binnen het seminarie circulair bouwen over materiaalstromen en het gebruik van deze binnen een concrete toepassing.

Wanneer ik terugkijk op mijn scriptie ben ik erg trots op de verzameling aan goede voorbeelden die ik heb kunnen bundelen. Op die manier kon ik een breed beeld scheppen over mogelijke ontwerpmethodieken voor het toepassen van regeneratieve materialen. Anderzijds heeft dit er wel voor gezorgd dat ik niet de kans heb gehad om gedetailleerd in te gaan op bepaalde aspecten van deze methoden of technieken. Terwijl dit zeker wel een grote meerwaarde had kunnen zijn.

Binnen de studio ben ik ook erg tevreden met het behaalde resultaat. Voornamelijk de sociale gelaagdheid die terug te vinden is in mijn project en de materiaaloplossingen die bedacht werden, zijn voor mij sterke punten. Anderzijds kwam door het analytisch op zoek gaan naar oplossingen voor deze thema's, de architectuur zelf soms op de tweede plaats. Wanneer ik dit proces opnieuw zou doorlopen zou ik proberen om deze twee aspecten van het ontwerpproces meer hand in hand te laten verlopen, terwijl ze zich nu soms naast elkaar ontwikkelden.

Uiteindelijk ben ik heel erg tevreden met deze erg leerrijke ervaring. Ik geloof dat ik in dit jaar meer heb bijgeleerd dan in elk ander jaar en dit vooral omdat ik nu de kans kreeg om zelfstandig onderzoek te doen naar de thematieken die mij interesseerden. Ik ben dan ook heel erg dankbaar voor deze ervaring en blik er met een fijn gevoel op terug.

## Literatuurlijst

A. Camia, N. Robert, R. Jonsson, R. Pilli, S. García-Condado, R. López-Lozano, M. Velde, T. Ronzon, P. Gurría, R. M'Barek, S. Tamosiunas, G. Fiore, R. Araujo, N. Hoepffner, L. Marelli, J. Giuntoli, Biomass production, supply, uses and flows in the European Union, JRC (2018)

About the growing pavilion. (2021, 23 juni). The Growing Pavilion. Geraadpleegd op 6 januari 2022, van <https://thegrowingpavilion.com/about/>

Aguilar, C. (2021, 7 oktober). Library of Muyinga / BC Architects. ArchDaily. Geraadpleegd op 5 april 2022, van [https://www.archdaily.com/467129/library-of-muyinga-bc-architects?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/467129/library-of-muyinga-bc-architects?ad_medium=gallery)

Architekten, B. (2010, 9 augustus). Rammed earth house, Rauch family home. Architonic. Geraadpleegd op 22 maart 2022, van <https://www.architonic.com/en/project/boltshauser-architekten-rammed-earth-house-rauch-family-home/5100620>

Boltshauser, R., Veillon, C., & Maillard, N. (2019). *Pisé. Rammed Earth*. Beltz Verlag.

Effa, J. (2019, 24 oktober). Refuge II / Wim Goes Architectuur. ArchDaily. Geraadpleegd op 21 maart 2022, van <https://www.archdaily.com/800577/refuge-ii-wim-goes-architectuur>

Godfray, J., Clements-Croome, D., & Jeronimidis, G. (2005). Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world. *Building and Environment*, 40(3), 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.011>

Häkkinen, T., & Belloni, K. (2011). Barriers and drivers for sustainable building. *Building Research & Information*, 39(3), 239–255. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.561948>

Henry, C. (2022, 14 maart). Centre for Earth Architecture / Kéré Architecture. ArchDaily. Geraadpleegd op 22 maart 2022, van [https://www.archdaily.com/167094/centre-for-earth-architecture-kere-architecture?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/167094/centre-for-earth-architecture-kere-architecture?ad_medium=gallery)

Jones, D. (2017). Introduction to the performance of bio-based building materials. In *Performance of Bio-based Building Materials* (pp. 1–19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00001-X>

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V., & Zeeuw van der Laan, A. (2015). Material driven design (MDD): A method to design for material experiences. *International Journal of Design*, 9(2), 35–54.

Koh, C. H. A., & Kraniotis, D. (2020). A review of material properties and performance of straw bale as building material. *Construction and Building Materials*, 259, 120385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120385>

M. Jackson, Treating straw for animal feeding, Food and Agriculture Organization, [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/X6510E/X6510E05.htm> [accessed 2020].

Maine, E., Probert, D., & Ashby, M. (2005). Investing in new materials: A tool for technology managers. *Technovation*, 25(1), 15-23.

Manzini, E. (1986). *The material of invention*. Milan, Italy: Arcadia Edizioni

Meyers, L. (2019, 9 juni). NZI architectes uses wood and straw to fabricate social housing in france. *Designboom | Architecture & Design Magazine*. Geraadpleegd op 21 maart 2022, van <https://www.designboom.com/architecture/nzi-architectes-wood-and-straw-social-housing-nogent-le-rotrou-france-06-08-2019/>

Peñaloza, D., Erlandsson, M., & Falk, A. (2016). Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings. In *Construction and building materials* (Vol. 125, pp. 219–226). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.041>

Pintos, P. (2021, 27 juli). Sports Hall / Lemoal Lemoal Architectes. *ArchDaily*. Geraadpleegd op 21 maart 2022, van <https://www.archdaily.com/965794/sports-hall-lemoal-lemoal-architectes>

Pittau, F., Krause, F., Lumia, G., & Habert, G. (2018). Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. In *Building and environment* (Vol. 129, pp. 117–129). Elsevier.

Polyvalent Studio. (z.d.). *ArchHello*. Geraadpleegd op 21 maart 2022, van <https://archello.com/nl/project/polyvalent-studio>

Rael, R. (2009). *Earth Architecture*. Princeton Architectural Press.

Residence in Dornbirn - DETAIL inspiration. (z.d.). *Detail*. Geraadpleegd op 6 april 2022, van <https://inspiration.detail.de/residence-in-dornbirn-113139.html>

Rojas, C. (2021, 3 maart). SCL Straw-Bale House / Jimmi Pianezzola Architetto. *ArchDaily*. Geraadpleegd op 21 maart 2022, van <https://www.archdaily.com/875652/scl-straw-bale-house-jimmi-pianezzola-architetto>

Sánchez, D. (2021, 15 december). Casa Lienzo de Barro / Chaquiñán. *ArchDaily Colombia*. Geraadpleegd op 6 april 2022, van <https://www.archdaily.co/co/02-335942/casa-lienzo-de-barro-chaquinan>

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

Silva, V. (2021, 31 augustus). House LO / Ateliér Lina Bellovičová. *ArchDaily*. Geraadpleegd op 21 maart 2022, van <https://www.archdaily.com/955757/house-lo-atelier-lina-bellovicova>

Tapia, D. (2021, 7 oktober). Bio-climatic Preschool / BC architects. *ArchDaily*. Geraadpleegd op 5 april 2022, van [https://www.archdaily.com/896832/bio-climatic-preschool-bc-architects?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/896832/bio-climatic-preschool-bc-architects?ad_medium=gallery)

The exploded view beyond building. (z.d.). *The Exploded View*. Geraadpleegd op 6 januari 2022, van <https://theexplodedview.com/nl/the-exploded-view-beyond-building/>

Knapen, E., Janssens, B., Vandoren, B., Claes, I., Neelen, N., De Mets, T., & Hilderson, W. (2020, december). Kalkhennep, Ontwerp- en uitvoeringsondersteuning. VLAIO. <https://sites.google.com/uhaselt.be/building-beyond-borders/platform/research/research-projects/vlaio-tetra-kalkhennep?authuser=0>

Valenzuela, K. (2021, 17 december). Preschool of Aknaibich / BC Architects + MAMOTH. *ArchDaily*. Geraadpleegd op 5 april 2022, van [https://www.archdaily.com/572207/preschool-of-aknaibich-bc-architects-mamoth?ad\\_medium=gallery](https://www.archdaily.com/572207/preschool-of-aknaibich-bc-architects-mamoth?ad_medium=gallery)

Vrijders, J. (z.d.). Naar een beter beheer van bouw- en sloopafval. WTCB. Geraadpleegd op 2 mei 2021, van <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact13&art=201&lang=nl>

WTCB, & De Mets, T. (2020). Analyse en simulatie van de bouwfysische prestaties van kalkhennepoepassingen.

