

# Circulaire gevelsystemen voor renovaties

Katrien Devos, Seppe Heyde

Studentennummers: 01609053, 01602222

Promotoren: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman, prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleiders: Lisa Van Gulck, arch. Jona Van Steenkiste (Bureau Bouwtechniek)

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

Academiejaar 2020-2021



## VOORWOORD

In de hedendaagse context speelt duurzaamheid een belangrijke rol in verscheidene vakgebieden, alsook in architectuur. Deze masterproef gaf ons de kans ons te verdiepen in de wereld van circulair bouwen. De inzichten die we hierbij verwierven zullen ongetwijfeld onze verdere carrières sturen. Dit hebben we te danken aan het interessante onderzoek dat aan ons werd toevertrouwd.

Het spreekt dan ook voor zich dat we onze promotoren Marijke Steeman en Nathan Van Den Bossche bijzonder dankbaar zijn voor het aanreiken van dit onderwerp, de begeleiding en steun bij dit onderzoek. We kregen doorheen het onderzoek voldoende vrijheid om in te spelen op wat ons interesseerde, maar tegelijk werd voorkomen dat we ons verloren in de materie.

Graag willen we ook onze begeleidster Lisa Van Gulck in het bijzonder bedanken voor haar bijdrage aan dit onderzoek. Haar aanmoedigingen, tips en snelle feedback maakten ook het schrijven van deze masterproef tot een groot genoegen.

Vervolgens willen we Stéphanie Van Linden bedanken voor de bijstand in de opbouw van de testopstelling.

Reynaers Aluminium, en Koen in het bijzonder, willen we eveneens bedanken voor de hulp bij onze testopstelling. Ook aan Henco en Desco, die ons gratis producten leverden, betuigen we onze dank.

Verder een speciaal woord van dank aan onze vrienden en familie, die ons gedurende onze hele opleiding gesteund en gemotiveerd hebben.

Ten slotte willen we iedereen bedanken die de tijd neemt om onze masterproef aandachtig met een open geest te lezen.



## TOELATING TOT BRUIKLEEN

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

The authors give permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In all cases of other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state explicitly the source when quoting results from this master dissertation.

*31 mei 2021*

*Katrien Devos en Seppe Heyde*

## OVERZICHT

### **Circulaire gevelsystemen voor renovaties**

Studenten: Katrien Devos  
Seppe Heyde

Promotoren: prof.dr.ir.-arch. Marijke Steeman  
prof.dr.ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleider: ir.-arch. Lisa Van Gulck

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad:

Master in de ingenieurswetenschappen: Architectuur

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Faculteit ingenieurswetenschappen en Architectuur

Vakgroepvoorzitter: prof.dr.ir.-arch. Johan Lagae

Academiejaar 2020-2021

**Trefwoorden:** Circulariteit, dynamisch bouwen, renovaties, gevel, levenscyclusanalyse (LCA)



## ABSTRACT

Het sterk verouderd en beperkt energetisch presterend Vlaamse gebouwenpark vormt een belangrijke bijdrage aan de wereldwijde CO<sub>2</sub> uitstoot (Statistiek vlaanderen, 2016). Met 'Het Renovatiepact' streeft België ernaar tegen 2050 een energieneutraal gebouwenpark te bekomen. Om deze ambities waar te maken, zal er volop ingezet moeten worden op energetische renovaties van bestaande gebouwen (Energiesparen, 2021). Tegelijk zorgt de bouwsector in Europa voor het verbruik van 50 % van de natuurlijke grondstoffen, 40 % van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot en creëert het 38 % van de totale afvalproductie (Durmisevic, Beurskens, Adrosevic, & Westerdijk, 2017).

Door bouwmaterialen te hergebruiken en in een gesloten, circulair systeem te houden, kunnen deze schadelijke effecten gereduceerd worden. Om dit mogelijk te maken moet onder andere ingezet worden op dynamisch bouwen zodat transformaties van gebouwen doorheen de tijd niet voor degradatie van bouwmaterialen zorgen. De noodzakelijke energetische renovaties vormen bijgevolg een uitgesproken kans om de transitie naar een circulaire bouwsector te verwezenlijken. Dit onderzoek bestudeert hoe gevelrenovaties van (middel)hoogbouw op een circulaire manier uitgevoerd kunnen worden en wat belangrijke circulaire aspecten zijn bij gevelrenovaties. Deze masterproef kadert binnen een groter onderzoeksproject EURECA dat gefinancierd wordt door Vlaanderen Circulair.

In een eerste fase van dit onderzoek worden verscheidene bestaande gevel(renovatie)systemen geanalyseerd aan de hand van milieukosten. Hieruit blijkt dat milieukosten alleen niet voldoende zijn om circulariteit te beoordelen. Daarom worden de systemen vervolgens onderworpen aan een bestaande circulariteitsbeoordelingsmethode. Deze methode werd in het kader van dit onderzoek op punt gezet en laat toe de sterke en zwakke punten van de geanalyseerde systemen in kaart te brengen. Hieruit worden enkele circulaire principes zoals efficiënt materiaal gebruik, omkeerbare verbindingen, hoog 'plug and play'-gehalte etc. herkend. Deze fungeren als basis voor de ontwikkeling van eigen ontworpen circulaire gevelrenovatiesystemen. Dit ontwerpend onderzoek resulteert in drie categorieën van systemen die een verschillende benadering van circulariteit vooropstellen: varianten op houtskeletsystemen, ETICS en vliesgevels. In de laatste fase wordt uit iedere categorie één gevelrenovatiesysteem geselecteerd om verder te onderzoeken op vlak van circulariteit aan de hand van een praktische uitwerking en levenscyclusanalyse. Binnen de concrete randvoorwaarden van twee fictieve scenario's, opgebouwd uit twee casestudies (Sterre S4 en Etrimo), worden de geselecteerde systemen op een kwalitatieve wijze getoetst aan de parameters uit de circulariteitsbeoordelingsmethode. In het eerste scenario worden de gevelrenovatiesystemen 60 jaar op de Sterre S4 geplaatst, in het tweede scenario worden de systemen na 30 jaar gedemonteerd en op de Etrimo woontoren geplaatst. Na analyse van de scenario's, wordt duidelijk dat de inspanningen van circulaire systemen om hergebruik te faciliteren, lonen. Dit onderzoek toont welke aspecten van de onderzochte gevelrenovatiesystemen bepalend zijn voor de circulariteitsparameters, resulterend in een kritische reflectie op de initiële circulariteitsbeoordelingsmethode.





# Circular facade systems for renovations

Katrien Devos, Seppe Heyde

Supervisors: Marijke Steeman, Nathan Van Den Bossche, Lisa Van Gulck

**Abstract** This research studies how facade renovations of middle- and high-rise buildings can be performed in a circular way. Several existing facade (renovation) systems are analyzed in terms of environmental costs. In the next phase, these systems are subjected to a strength/weakness analysis by an existing circularity assessment method. Based on this assessment, circular principles are recognized and used to develop new circular facade renovation systems. A selection of these circular systems will be subjected to two fictitious scenarios, resulting in a reevaluation of the circularity assessment method.

**Keywords** Circularity, dynamic building, renovations, facade, life cycle assessment.

## I. INTRODUCTION

The building stock in Flanders is highly outdated. It consists of various buildings with limited energy performance, resulting in significant primary energy consumptions [1]. In order to improve this energy efficiency, Flanders launched the 'The Renovation Pact' which aims to make every home as energy efficient as a contemporary building by 2050. To realize these ambitions, energy efficiency renovations of existing buildings will have to occur more frequently. According to BENOveren (or better renovation), an initiative of the Flemish government, an energy efficiency renovation of the thermal envelope is a priority [2]. Research shows that energetic facade renovations are a very effective solution for obtaining energy neutral buildings [3], hence energetic facade renovations of medium- and high-rise buildings will become a cornerstone in improving the energy efficiency of the overall building stock.

Our built environment is subject to various developments that cause continuous transformations of the building stock [4]. On top of that, our current use of materials causes several harmful impacts on the planet: the European construction sector is responsible for 38% of the total waste production, 40% of the total CO<sub>2</sub> emissions and 50% of the consumption of natural resources [5]. The continuous transformations of our building stock can be anticipated by reusing building materials and keeping them in a closed circular system, reducing the harmful effects caused by the construction sector. To make this possible, dynamic designs should be used, preventing degradation of building materials.

Energetic facade renovations are necessary, so this renovation can be an opportunity to not only reduce the energy losses throughout the building envelope but also to apply dynamic design.

Applying circular construction to renovations can, however, create additional efforts due to the existing boundary conditions of the building [6].

This research consequently investigates how facade renovations of medium-rise and high-rise buildings can be carried out in a circular way and what the important aspects of circularity in facade renovations are. This research is part of the larger research project 'EURECA' funded by Flanders Circular.

## II. MATERIALS AND METHODS

### *Analysing existing facade renovation systems*

In a first phase, various facade systems that (may) offer a solution for renovations are selected by literature. The necessary requirements for every facade (renovation) system are considered to guarantee the water and air tightness, thermal and acoustic properties, and the fire safety of the facade. The systems will then be analysed using a life cycle assessment (LCA) through TOTEM. The functional unit is 1 m<sup>2</sup> area with a U-value of 0.23 W/m<sup>2</sup>K for a service life of 60 years. The total embedded energy of the different systems can be analysed and compared this way.

### *Circularity assessment of existing facade renovation systems*

In a second phase, the analysed systems will be further assessed and investigated in terms of circularity using the "Circularity assessment method for facade systems" [7], developed within the framework of the 'EURECA' project. This assessment method will be refined (using an alternative calculation method) within the framework of this research and applied to the analysed systems. The circularity assessment method is based on 7 parameters that will be evaluated separately. A strength/weakness analysis can be executed to identify circular concepts. The lower this score the more circular the system is considered. The parameters are recycling, environmental cost, expected lifetime, component dependency, layer dependency, flexibility for reuse and expertise. This last parameter was not present in the initial method of Van Gulck, Leenknecht and Debusseré [7], but was added in this study.

### Designing circular facade renovation systems

In a next phase, several circular facade renovation systems are developed through design research. By combining these identified circular concepts and supplementing them with our own ideas, new systems are created. The facade renovation systems are designed for a massive support structure in medium-rise and high-rise buildings, starting from an existing loadbearing wall. In terms of building physics, the systems are developed with adequate air and water barriers and a U-value of  $0.23 \text{ W/m}^2\text{K}$ . For fire safety, the materials in the facade construction must comply with B-s3, d1 according to the Belgian “Royal Decree for fire safety”. The various circular facade renovation systems are divided into three groups: variants on timber frame systems, ETICS and curtain walls.

### Review by scenarios

One in each group of these developed systems will be selected for further research. Additionally, the ETICS, will be added as a benchmark.

The circular systems will be subjected to a practical development and life cycle assessment in two predefined scenarios. The previously cited parameters from the circularity assessment method will be reviewed through the boundary conditions of these scenarios. Both scenarios are 60 years long, as this is the average lifetime of a building [8]. The first scenario places the facade renovation system upon a first case study, the Sterre S4 and it remains there for 60 years. The beginning of the second scenario is similar to the first scenario, but after 30 years the system is dismantled from the Sterre S4 and placed on a second case: the Etrimo tower. Both scenarios include the assembly and disassembly of the facade system, allowing the expertise parameter to be examined. The first scenario also discusses local damage (and replacement) which provides further insight in the component and layer dependencies. The ways in which the system can be applied from one building to another in the second scenario reveals the opportunities regarding the systems’ flexibility for reuse. The environmental cost of all systems is determined in both scenarios through a life cycle assessment modelled with SimaPro. The service life of the materials and the possibilities for recycling will also be investigated. Detailed information of the circular capabilities of the systems will be provided this way and the circularity assessment method can be critically analysed.

## III. RESULTS

### Analysing existing facade renovation systems

The first selected system is the *ETICS* which offers a light, fast and low-cost solution in both construction and renovation [9]. This system consists of EPS boards, fixed with insulation plugs and glue, with a plaster finish layer.

Next, two *timber frame systems*, one open and one closed, are chosen in the form of prefabricated panels [10], [11]. Both systems consist of a fibre cement facade on wooden battening, a fibreboard and FJI profiles with insulation. The open panel is connected to the supporting structure without a backboard, allowing the insulation (cellulose) to compensate for unevenness in the supporting structure. The closed panel, on the other hand, has an additional adaptation layer in rock wool to absorb the unevenness.

There is also a prefabricated *sandwich panel*, which has known success mainly in industrial buildings. This system consists of two steel plates with rock wool insulation glued in between them.

Finally, a *classic curtain wall system* was chosen as it is known for a clamping principle to keep the facade finish in place. The profiles are made of aluminium with panels out of aluminium cladding and rockwool insulation.

As shown in Table 1, the ETICS system has the lowest environmental cost due to a limited number of material layers. The timber frame systems follow closely with the open variant slightly better than the closed one. The environmental cost of the sandwich panel and the curtain wall is almost two to three times higher than their predecessors.

When analysing the concept of circularity, it becomes clear that the environmental cost alone is not enough to assess this multifaceted concept. For example, the ETICS has the lowest environmental cost, but the layers are glued together which makes it impossible to reuse the materials. The curtain wall on the other hand has panels that can easily be replaced or reused. That is why the next phase will look beyond environmental cost to evaluate circularity of the existing facade (renovation) systems.

System	Total environmental costs [€/FU]	Circularity assessment [%]
ETICS	4,55	120
Closed timber frame	6,33	97
Open timber frame	5,98	84
Sandwich panel	19,16	104
Curtain wall	29,43	94

Table 1: Comparison environmental cost of facade systems

### Circularity assessment of existing facade renovation systems

The evaluation of the facade systems through the circular assessment method revealed that the open timber frame panel is the best circular system, as shown in Table 1. The second place goes to the curtain wall, followed closely by the closed wood frame panel. The ETICS system achieves the highest score, and the sandwich panel finishes in penultimate place.

Figure 1 shows the scores of the facade systems on each parameter. Several circular principles were

recognized that may provide starting points in the development of new circular facade renovation systems. Examples of circular principles are: (1) efficient use of materials (achieving the basic properties of a facade with as few materials as possible), (2) layering according to lifespan (not enclosing materials with shorter technical lifespans between materials with longer lifespans), (3) reversible joints (disassembling materials with minimal damage), (4) prefabrication (producing facade panels in advance with increased technical quality and speed) and (5) 'Plug and play' content (simple connections).

### Designing circular facade renovation systems

#### 1) Variants on timber frame systems

This first group of developed facade renovation systems focuses on the search for a minimum of materials within timber frame systems. This is expressed in a *prefab and on-site spacer screw system*. The prefab system has a fibreboard that provides both the water barrier and the stiffness of the system. These fibreboards are mutually connected through 'tongue and groove'. The on-site system has a rainscreen that is attached using only a clamping frame, which allows it to be (dis)assembled without damage. The materials in both systems are attached with screw joints or clamping resulting in minimal damage.

#### 2) Variants on ETICS

The second group of developed facade renovation systems also strives for a minimum use of materials but varies on the ETICS system. This results in two systems: the XPS system and the bubble plate system. Both systems use rigid insulation boards attached with insulation plugs, on top of which a demountable facade finish is placed. The *XPS system* uses a minimum of materials by also using the XPS insulation as a water barrier. The *bubble plate* (often used in floor heating) *system* demonstrates the minimum use of materials by employing the waterproofing membrane as a facade finish and placing it fully demountable with minimal cutting

losses. However, the membrane must meet fire requirements and should ideally be impact resistant.

#### 3) Variants on curtain wall

The third and last group focuses on fully reversible joints derived from curtain walls. The basic concepts of the watertight, airtight, and still demountable connections are applied in new circular facade renovation systems. This results in three systems: the element facade connection system, the curtain wall system, and the semi-structural bonding system. The *curtain wall system* consists of a facade finish that is clamped watertight and airtight, resulting in minimal damage. In contrast to the curtain wall system, the element facade connection system and semi-structural bonding system are prefabricated. Both use watertight, airtight, and demountable connections between timber frame panels. For the *element facade connection system*, this research results in an extruded aluminium profile, in which rubber air- and water-seals are incorporated. The *semi-structural bonding system* has a simple anchorage principle that uses a rotating rod to counteract the tilt of the panels.

The research for circular construction methods expressed itself mostly in a search for dismountable connection techniques and efficient use of materials.

### Review by scenarios

The ETICS, prefab spacer screw, XPS and curtain wall system are now tested within the two scenarios against the previously cited parameters from the circularity assessment method.

The *expertise* needed for (dis)assembly is most crucial in the ETICS and curtain wall system. For the ETICS the expertise is determined by the plaster layer and for the curtain wall system it is determined by the clamping principle. For the XPS and the prefab spacer screw system, the needed expertise is relatively low and is respectively determined by the aluminium rail and the joints between the prefab panels.

Most problems in terms of *component dependency* arise with the ETICS and less with the prefab spacer screw system. The ETICS has a plaster layer, which is a single continuous layer and in the prefab spacer

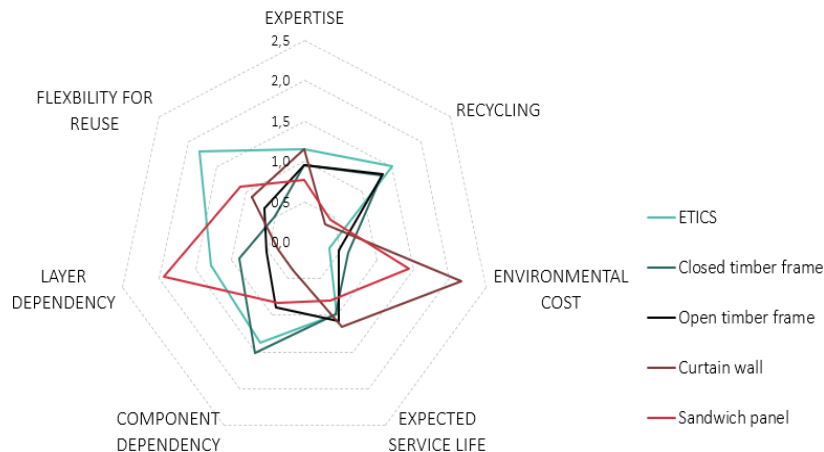


Figure 1: Circularity evaluation of analyzed systems

screw system the wood fibreboards are connected through tongue and groove-joints. Both systems create dependent components. The XPS and curtain wall system consist out of independent components. Whilst researching the component dependency it became clear that this is mostly defined by the connection in the waterproofing layer.

The *layer dependency* is determined by the type of connections between the different layers. The layers in the ETICS system depend on each other because they are glued together. The prefab spacer screw and curtain wall system consist entirely of simple connections with screws and clamping, which ensures independent layers. The XPS system lies between the two extremes with a limited layer dependency by using insulation plugs.

The *flexibility for reuse* is non-existent for the ETICS system since the materials stick together, making disassembly without damage impossible. The other systems, however, can be reused as they consist of only reversible joints. The insulation plugs cannot be reused within the XPS system because they are destroyed during disassembly. A possible optimization for these systems is using demountable insulation plugs. It is assumed that the rubbers in the curtain wall system cannot be reused because they are vulcanized (a type of glued attachment) when installed. It might be possible to install these rubbers without the vulcanization, which would facilitate their reuse. Almost all materials can be reused with the prefabricated spacer screw system, though the fixed dimensions of the prefab panels create difficulties when the system is reused on another building. A combination of on-site and prefab provides a solution for this.

The *environmental cost* was determined for every system in the two scenarios. For the first scenario (60 years on the Sterre S4), the total environmental cost was the highest for the XPS system (18,10 euro/m<sup>2</sup>)

and the lowest for the prefab spacer screw system (8,64 euro/m<sup>2</sup>). The total environmental cost of scenario 1 for the ETICS equals 11,17 euro/m<sup>2</sup>. Although the ETICS system has the lowest environmental cost for the production, it was inferior to the prefab spacer screw system over the course of the scenario. This is due to the high environmental cost of end-of-life treatment caused by the contaminated material flows. The second scenario (30 years on Sterre S4 and 30 years on Etrimo) is shown on Figure 2 and results in the highest environmental cost for the ETICS system, as it cannot be reused and when compared to scenario 1, the cost is almost doubled. The environmental cost for the prefab spacer screw system is particularly low and barely increases after the environmental cost of production. The environmental cost for reuse is very limited since virtually all materials can be reused and the prefab nature limits the further environmental costs for (dis)assembly. The spacer screw system achieved in both scenario's the lowest environmental cost, proving that a circular system does not equal high environmental costs. Both the XPS and the curtain wall system achieve a limited environmental cost in this second scenario, as the main materials can be reused. Circular systems generally invest more in the environmental costs of production but regain this investment when reused.

The *service life* of the materials plays a role in this life cycle assessment as this determines whether replacement of the materials is necessary. Only the ETICS system has materials with a service life lower than 60 years, so replacement is applied in scenario 1. All materials in the other systems have a sufficient service life. An additional analysis proved that the influence of service life in the scenario's only effect the absolute values of the environmental costs and not the ranking of the systems.

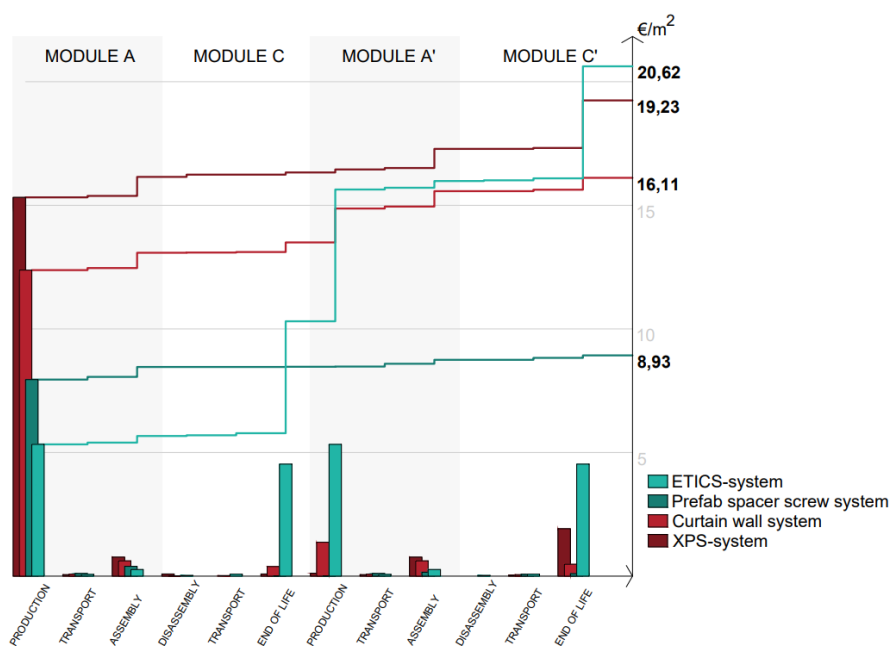


Figure 2: Environmental cost of circular renovation systems in scenario 2

Finally, the *recycling* possibilities of the systems were examined in detail. The ETICS system has no recycling possibilities because the material flows are difficult to separate due to glued joints. In the other systems, different recyclable materials, are used. Especially in the prefab spacer screw and curtain wall system various materials are used that are (partly) recycled.

#### IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

By qualitatively examining the parameters from the circularity assessment within the boundary conditions of two scenarios, it is possible to critically reflect on the initial circularity assessment method. In addition to the change in calculation method, the expertise parameter was added within the framework of this research. The value of the *expertise* parameter became clear during the (dis)assembly of the systems: feasible systems play an important role in achieving reuse. The simple connections of the XPS-system and prefabricated character of the spacer screw system especially accomplish this feasibility. The conception of the *component dependency* parameter on the other hand can be questioned. This parameter was mainly addressed in a local damage situation and was problematic for the continuous plaster layer of the ETICS and the tongue and groove-joints of the fibreboards. Facilitating these local replacements is not a necessary condition to ensure circularity. The dismountable connections are essential to enable reuse and were realized by screwed or clamped connections in the three circular systems. These systems, each in their own way, maximize the future potential of reuse by incorporating materials in a dynamic way. In this research, the main point of circular construction is maximizing the future reuse of the building materials. To accomplish this, it is essential to employ robust materials with a maximum lifespan that can also be dismantled while causing minimal damage. This

results in facade systems that invest in these aspects during production but can regain this investment during reuse. An optimal balance is sought between minimum environmental cost and maximum reuse potential.

#### V. REFERENCES

- [1] Statistiek Vlaanderen, 2016. Omgeving, p. 355-476
- [2] Vlaams energieagentschap, 2017. Ik BENOveer
- [3] Fotopoulou, A., Semprini, G., & Cattani, E., 2018. Deep renovation in existing residential buildings through facade additions: A case study in a typical residential building of the 70s. Energy and buildings.
- [4] Galle, W., 2019. Bouwen voor een circulaire economie. VUB.
- [5] Durmisevic, E., 2017. International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and. Systemic view on reuse potential of building elements, components and systems - comprehensive framework for assessing reuse potential of building elements, p. 6. TU Delft.
- [6] Paduart, A., Brancart, S., 2018. Alternatief voor traditionele renovatie. Ik ga bouwen en renoveren.
- [7] Van Gulk, L., Leenknecht, E., Debusseré, E., 2020. Development of a circularity assessment method for facade systems. UGent.
- [8] Allacker, K., Debacker, W., 2020. Environmental profile of building elements, OVAM.
- [9] Gregoire, Y., Dirx, I., Smits, A., 2016. Bepreisteringen op buitenisolatie (ETICS). WTCB.
- [10] Dubois, S., Remy, O., de Bouw, M., 2016. Retrofitting with AIM-ES. WTCB.
- [11] Maroy, K., Decorte, W., Steeman, M., & Van Den Bossche, N., 2017. Ontwerpogids-PRO3.



INLEIDING	1
<b>1 CONTEXT EN SITUERING VAN HET ONDERZOEK</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Circulariteit</b>	<b>3</b>
1.1.1    Waarom circulair bouwen?	3
1.1.2    Circulair bouwen	5
1.1.2.1    Dynamisch bouwen	6
1.1.2.2    Circulariteitsbeoordelingsmethode	7
1.1.3    Levenscyclusanalyse	8
<b>1.2 Circulaire gevelrenovaties</b>	<b>11</b>
1.2.1    Type gebouw	12
1.2.1.1    Draagstructuur	12
1.2.1.2    Maatvoering	13
1.2.2    Bouwfysische aspecten en brandveiligheid van de gevel	14
<b>2 ANALYSE BESTAANDE GEVELRENOVATIESYSTEMEN</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Onderzoeksmethode</b>	<b>18</b>
2.1.1    Eigenschappen gevelrenovatiesysteem	18
2.1.2    Milieu-impact gevelrenovatiesysteem	18
<b>2.2 Resultaten</b>	<b>20</b>
2.2.1    Categorie 1: Skeletstructuur	20
2.2.1.1    ETICS	20
2.2.1.2    Houtskelet	22
2.2.1.3    Sandwichpaneel	24
2.2.1.4    Gordijngevel	25
2.2.2    Vergelijking gevelrenovatiesystemen	26
2.2.3    Categorie 2: Massiefbouw	27
2.2.3.1    ETICS	27
2.2.3.2    Houtskelet	28
2.2.4    Vergelijking gevelrenovatiesystemen	31
<b>2.3 Conclusie</b>	<b>33</b>
<b>3 CIRCULARITEITSBEOORDELING BESTAANDE GEVELRENOVATIESYSTEMEN</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Onderzoeksmethode</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Resultaten</b>	<b>38</b>
3.2.1    ETICS	40
3.2.2    Open en gesloten houtskeletstelsysteem	40
3.2.3    Gordijngevel	41
3.2.4    Sandwichpaneel	42

3.2.5	Gevoeligheidsanalyses aanpassingen methode	42
<b>3.3</b>	<b>Conclusie</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>EIGEN CIRCULAIRE GEVELRENOVATIESYSTEMEN</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Onderzoeksmethode</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultaten</b>	<b>47</b>
4.2.1	Varianten op houtskeletsystemen	47
4.2.1.1	Prefab afstandsschroefstelsel	48
4.2.1.2	In situ afstandsschroefstelsel	51
4.2.2	Varianten op ETICS	55
4.2.2.1	XPS-systeem	55
4.2.2.2	Noppenplaatstelsel	60
4.2.2.3	Folie als regenscherm in een spouw	64
4.2.3	Varianten op verbindingstechnieken bij vliesgevels	65
4.2.3.1	Elementgevelverbindingen	67
4.2.3.2	Gordijngevelstelsel	71
4.2.3.3	Semi-structurele verlijming	74
<b>4.3</b>	<b>Conclusie</b>	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>SCENARIO'S: PRAKTISCHE UITWERKING</b>	<b>80</b>
<b>5.1</b>	<b>Onderzoeksmethode</b>	<b>80</b>
5.1.1	Praktische uitwerking	80
5.1.1.1	Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4	80
5.1.1.2	Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo	82
<b>5.2</b>	<b>Resultaten</b>	<b>84</b>
5.2.1	ETICS-systeem (referentie)	84
5.2.1.1	Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4	84
5.2.1.2	Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo	87
5.2.2	XPS-systeem	88
5.2.2.1	Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4	88
5.2.2.2	Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo	92
5.2.3	Prefab afstandsschroefstelsel	93
5.2.3.1	Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4	93
5.2.3.2	Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo	100
5.2.4	Gordijngevelstelsel	102
5.2.4.1	Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4	102
5.2.4.2	Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo	106
<b>5.3</b>	<b>Conclusie</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>SCENARIO'S: LEVENSCYCLUSANALYSE</b>	<b>109</b>
<b>6.1</b>	<b>Onderzoeksmethode</b>	<b>109</b>



6.1.1	SimaPro	109
6.1.2	Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4	111
6.1.3	Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo	112
<b>6.2</b>	<b>Resultaten</b>	<b>113</b>
6.2.1	Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4	113
6.2.1.1	ETICS-systeem (referentie)	113
6.2.1.2	XPS-systeem	115
6.2.1.3	Prefab afstandsschroefstelsel	117
6.2.1.4	Gordijngevelstelsel	119
6.2.1.5	Vergelijking systemen scenario 1	121
6.2.2	scenario 2: van Sterre S4 naar Etrimo	123
6.2.2.1	ETICS-systeem (referentie)	123
6.2.2.2	XPS-systeem	125
6.2.2.3	Prefab afstandsschroefstelsel	127
6.2.2.4	Gordijngevelstelsel	129
6.2.2.5	Vergelijking systemen scenario 2	131
6.2.2.6	Gevoeligheidsanalyses	132
<b>6.3</b>	<b>Conclusie</b>	<b>134</b>
<b>7</b>	<b>ALGEMENE CONCLUSIE EN KRITISCHE REFLECTIE</b>	<b>136</b>
<b>8</b>	<b>BIJLAGEN</b>	<b>140</b>
<b>9</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>145</b>

## LIJST MET AFKORTINGEN

<i>Afkorting</i>	<i>Betekenis</i>
<i>EPB</i>	Energieprestatie en Binnenklimaat
<i>KB</i>	Koninklijk Besluit
<i>NIBE</i>	Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie
<i>OVAM</i>	Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij
<i>WTCTB</i>	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf
<i>VMSW</i>	Vlaamse Maatschappij voor Sociaal Wonen
<i>BEN</i>	Bijna-Energieneutraal
<i>TOTEM</i>	Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials
<i>LCA</i>	Levenscyclusanalyse
<i>LCI</i>	Levenscyclusinventarisatie
<i>LCIA</i>	Levenscyclusimpactanalyse
<i>ETICS</i>	External Thermal Insulation Composite System
<i>EPS</i>	Geëxpandeerd polystyreen
<i>PIR</i>	Polyisocyanuraat
<i>PUR</i>	Polyurethaan
<i>XPS</i>	Geëxtrudeerd polystyreen
<i>PE</i>	Polyethyleen
$\lambda$ [W/mK]	Warmtegeleidingscoëfficiënt
$U$ [W/m <sup>2</sup> K]	Warmtedoorgangcoëfficiënt

## LIJST METFIGUREN

FIGUUR 1: LADDER VAN LANSINK ONDERSCHIEDT ZES MANIEREN OM MET AFVAL OM TE GAAN.	3
FIGUUR 2: DE HOEVEELHEID INGEBEDDE ENERGIE (EE), OPERATIONELE (OE) EN EINDE LEVENSDUUR (EOLE) ENERGIE VOOR STANDAARD, PASSIEVE, STANDAARD ENERGIENEUTRALE (EO) EN PASSIEVE ENERGIENEUTRALE (EO) WONINGEN (HIMPE, 2012).	4
FIGUUR 3: CIRCULAIR BOUWEN (OVAM, 2020)	5
FIGUUR 4: BIOLOGISCHE (LINKS) EN TECHNOLOGISCHE (RECHTS) CYCLUS (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015)	6
FIGUUR 5: ONTWERPRICHTLIJNEN VOOR VERANDERINGSGERICHT BOUWEN (OVAM, 2016)	6
FIGUUR 6: INFORMATIE OVER DE LEVENSCYCLUS (VILCHES, GARCÍA-MARTÍNEZ, & SÁNCHEZ-MONTAÑÉS, 2016)	8
FIGUUR 8A: LAKE SHORE DRIVE BUILDING DOOR MIES VAN DER ROHE (LAKESHOREDRIVE,2021)	12
FIGUUR 8B: MANADNOCK BUILDING DOOR DANIEL BURNHAM EN JOHN ROOT (AMUSINGPLANET,2021)	12
FIGUUR 9: MOGELIJKHEDEN VOORTPLANTINGSWEGEN BRAND (DUBOIS S. , REMY, DE BOUW, & VANHELLEMONT, 2019)	16
FIGUUR 10: PLEISTERLAAG ETICS-SYSTEEM (CREPI-INFO,2021)	21
FIGUUR 11: OPBOUW GESLOTEN HOUTSKELETPANEEL (TIMBECOWOODHOUSE,2021)	23
FIGUUR 12: MONTAGE SANDWICHPANEEL (PAROCPANELS,2021)	24
FIGUUR 13: MONTAGE GORDIJNGEVEL MET GLAS EN INVULPANELEN (ROCKWOOL, 2021)	25
FIGUUR 14: OPEN HOUTSKELETPANEEL (LINKS) EN GESLOTEN HOUTSKELETPANEEL (RECHTS) (PRO3, 2017)	28
FIGUUR 15: OPBOUW OPEN HOUTSKELETPANEEL (DUPAC,2021)	30
FIGUUR 16: SPINDIAGRAM CIRCULARITEITSBEOORDELINGSMETHODE	39
FIGUUR 17: VIJF PARAMETERS VAN DE CIRCULARITEITSBEOORDELINGSMETHODE	46
FIGUUR 18: HORIZONTALE SNEDE VARIANTEN BEVESTIGING ONDERLIGGENDE STRUCTUUR GEVELAFWERKING BIJ HOUTSKELETBOUW	47
FIGUUR 19: AFSTANDSSCHROEVEN (FISCHER, 2021)	47
FIGUUR 20: OPBOUW PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM	48
FIGUUR 21: LEVENSDUREN VAN PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM	50
FIGUUR 22: OPBOUW IN SITU AFSTANDSHOUDERSYSTEEM	51
FIGUUR 23: GORDIJNGEVELPROFIEL TECHNISCHE TEKENING MET KLEMLIJST (STABALUX, 2021)	52
FIGUUR 24: DETAIL VAN (LINKS) KOPSE AFDEKLAT EN KANTLATTEN, (MIDDEN) HORIZONTAAL REGELWERK EN KANTLATTEN EN (RECHTS) KLEMLIJSTEN AAN KOPSE ZIJDE	52
FIGUUR 25: DETAIL VAN AANSLUITING DEKLAT EN KLEMLIJST AFSTANDSHOUDERSYSTEEM	53
FIGUUR 26: LEVENSDUREN VAN IN SITU AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM	54
FIGUUR 27: OPBOUW XPS-SYSTEEM	55
FIGUUR 28: AANSLUITINGSMOGLIJKHEDEN ISOLATIEPLATEN (ISOLATIEMATERIAAL, 2021)	56
FIGUUR 29: XPS-ISOLATIEPLATEN MET DRAINAGE ONTWIKKELD DOOR NEWTON WATERPROOFING SYSTEMS (BUILDINGTALK, 2015)	56
FIGUUR 30: ONTSPANNINGSKAMER IN AANSLUITING XPS-PLATEN	56
FIGUUR 31: VERTICALE SNEDE VAN XPS-SYSTEEM MET GEVELAFWERKING OP DE LINKSE TEKENING (A) BEVESTIGD VIA ISOLATIESCHROEVEN EN OP DE RECHTSE TEKENING (B) BEVESTIGD VIA RAILS	57
FIGUUR 32: VERTICALE SNEDE VAN XPS MET (A) RAIL EN (B) AFSTANDSHOUDER EN RAIL	58
FIGUUR 33: LEVENSDUREN VAN XPS-SYSTEEM	59
FIGUUR 34: OPBOUW NOPPENPLAATSYSTEEM	60
FIGUUR 35: NOPPENPLAAT MET INGEKLEMD FOLIE	61
FIGUUR 36: VLOERVERWARMINGSPLAAT MET NOPPEN (VLOERVERWARMINGSSTORE, 2021)	61
FIGUUR 37: TESTEN VAN NOPPENPLAAT MET FOLIE	61
FIGUUR 38: WONING MET EPDM-GEVELAFWERKING (BLAF ARCHITECTEN, 2009)	62
FIGUUR 39: LEVENSDUREN VAN NOPPENPLAATSYSTEEM	63
FIGUUR 40: FOLIE ALS REGENSCHERM IN EEN SPOUW	64
FIGUUR 41: TESTOPSTELLING (LINKS) EN WATER LEKKAGE BIJ TEST (RECHTS)	65
FIGUUR 42: OPBOUW TESTOPSTELLING	66
FIGUUR 43: OPBOUW ELEMENTGEVELVERBINDINGSYSTEEM	67
FIGUUR 44: SCHÜCO ELEMENTGEVELPROFIEL (SCHÜCO, 2020)	68
FIGUUR 45: ALUMINIUM PROFIEL MET RUBBEREN DICHTINGEN	68
FIGUUR 46: TOEPASSING ELEMENTGEVELVERBINDING OP (LINKS) OPEN HOUTSKELETPANEEL EN (RECHTS) GESLOTEN HOUTSKELETPANEEL	68
FIGUUR 47: VERANKERING AA9562 ELEMENTGEVEL (KAWNEER, 2021)	69
FIGUUR 48: PLAATSING SYSTEEM ELEMENTGEVELVERBINDINGEN	69
FIGUUR 49: LEVENSDUREN VAN ELEMENTGEVELVERBINDINGSYSTEEM	70
FIGUUR 50: OPBOUW GORDIJNGEVELSYSTEEM	71
FIGUUR 51: LEVENSDUREN VAN GORDIJNGEVELSYSTEEM	73
FIGUUR 52: OPBOUW SEMI-STRUCTURELE VERLIJMING	74
FIGUUR 53: CW60-SG GORDIJNGEVELPROFIEL (REYNAERSALUMINIUM,2021)	75
FIGUUR 54: DETAIL SEMI-STRUCTURELE VERLIJMING	75
FIGUUR 55: LEVENSDUREN VAN SEMI-STRUCTURELE VERLIJMINGSSYSTEEM	77
FIGUUR 56: GEVELS EN PLAN S4 DE STERRE	81

FIGUUR 57: INPLANTINGSPLAN STERRE S4 (GOOGLE EARTH, 2021)	81
FIGUUR 58: INPLANTINGSPLAN ETRIMO	82
FIGUUR 59: GEVELS EN PLAN VAN ETRIMO	83
FIGUUR 60: ETICS-SYSTEEM, MONTAGE OP DE STERRE	84
FIGUUR 61: ETICS-SYSTEEM, RAAMAANSLUITING DETAIL	85
FIGUUR 62: ETICS-SYSTEEM, LOKALE SCHADE	86
FIGUUR 63: ETICS-SYSTEEM, SLOOP	86
FIGUUR 64: ETICS-SYSTEEM, MONTAGE OP DE ETRIMO	87
FIGUUR 65: XPS-SYSTEEM, MONTAGE STERRE	88
FIGUUR 66: DETAIL RAAMAANSLUITING XPS-SYSTEEM	89
FIGUUR 67: XPS-SYSTEEM, LOKALE SCHADE	90
FIGUUR 68: XPS-SYSTEEM, DEMONTAGE	91
FIGUUR 69: XPS-SYSTEEM, MONTAGE ETRIMO	92
FIGUUR 70: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, FABRICAGE	93
FIGUUR 71: PANELEN PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM	94
FIGUUR 72: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, PANEELVERDELING STERRE	95
FIGUUR 73: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, MONTAGE STERRE	96
FIGUUR 74: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, RAAMAANSLUITING DETAIL	97
FIGUUR 75: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, LOKALE VERVANGING	98
FIGUUR 76: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, DEMONTAGE	99
FIGUUR 77: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, MONTAGE ETRIMO	100
FIGUUR 78: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, PANEELVERDELING ETRIMO	101
FIGUUR 79: GORDIJNGEVELSYSTEEM, MONTAGE STERRE	102
FIGUUR 80: GORDIJNGEVELSYSTEEM, RAAMAANSLUITING DETAIL	103
FIGUUR 81: GORDIJNGEVELSYSTEEM, LOKALE SCHADE	104
FIGUUR 82: GORDIJNGEVELSYSTEEM, DEMONTAGE	105
FIGUUR 83: GORDIJNGEVELSYSTEEM, MONTAGE ETRIMO	106
FIGUUR 84: LUCHTBEELD STERRE	111
FIGUUR 85: LUCHTBEELD ETRIMO	112
FIGUUR 86: MILIEUKOST VAN SYSTEMEN DOORHEEN SCENARIO 1	121
FIGUUR 87: MILIEUKOST VAN SYSTEMEN DOORHEEN SCENARIO 2	131
FIGUUR 88: GEVOELIGHEIDSANALYSE EINDE LEVENSKOSTEN BIJ HERBRUIKBARE MATERIALEN	132
FIGUUR 89: GEVOELIGHEIDSANALYSE INVLOED LEVENSDUREN	133
FIGUUR 90: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, PANEELVERDELING GEVEL STERRE	143
FIGUUR 91: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM, PANEELVERDELING GEVEL ETRIMO	144

## LIJST MET TABELLEN

TABEL 1: MINIMUMWAARDE VERDIEPINGSHOOGTE	13
TABEL 2: BRANDREACTIEKLASSEN EN BESCHRIJVING	17
TABEL 3: MILIEUKOSTBEREKENING ETICS-SKELETSTRUCTUUR VIA TOTEM	20
TABEL 4: MILIEUKOSTBEREKENING GESLOTEN HOUTSKELET-SKELETSTRUCTUUR VIA TOTEM	22
TABEL 5: MILIEUKOSTBEREKENING SANDWICHPANEEL-SKELETSTRUCTUUR VIA TOTEM	24
TABEL 6: MILIEUKOSTBEREKENING GORDIJNGEVEL-SKELETSTRUCTUUR VIA TOTEM	25
TABEL 7: MILIEUKOST MATERIALEN PER SYSTEEM IN CATEGORIE 1 VIA TOTEM	26
TABEL 8: MILIEUKOSTBEREKENING ETICS-MASSIEFBOUW VIA TOTEM	27
TABEL 9: MILIEUKOSTBEREKENING GESLOTEN HOUTSKELET-MASSIEFBOUW VIA TOTEM	29
TABEL 10: MILIEUKOSTBEREKENING OPEN HOUTSKELET-MASSIEFBOUW VIA TOTEM	30
TABEL 11: MILIEUKOST MATERIALEN PER SYSTEEM IN CATEGORIE 2 VIA TOTEM	31
TABEL 12: MILIEUKOST MATERIALEN GEVELAFWERKING VIA TOTEM	31
TABEL 13: MILIEUKOST MATERIALEN THERMISCHE ISOLATIE VIA TOTEM	32
TABEL 14: MILIEUKOST MATERIALEN DRAAGSTRUCTUUR VIA TOTEM	32
TABEL 15: SCORE COMPONENTAFHANKELIJKHEID	35
TABEL 16: SCORE LAAGAFHANKELIJKHEID	36
TABEL 17: SCORE FLEXIBILITEIT VOOR HERGEBRUIK	36
TABEL 18: SCORE EENVOUD/SNELHEID	37
TABEL 19: TOEPASSING CIRCULARITEITSBEOORDELINGSMETHODE OP DE GEANALYSEERDE SYSTEMEN	38
TABEL 20: TOTAALSCORE CIRCULARITEITSBEOORDELINGSSYSTEEM	39
TABEL 21: GEVOELIGHEIDSANALYSE BEREKENINGSWIJZEN PARAMETERS	43
TABEL 22: GEVOELIGHEIDSANALYSE EXPERTISE PARAMETER	43
TABEL 23: MATERIALEN PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM	48
TABEL 24: MATERIALEN IN SITU AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM	51
TABEL 25: MATERIALEN XPS-SYSTEEM	55
TABEL 26: VERGELIJKING VAN MILIEUKOST EN GEWICHT GEVELMATERIALEN	58
TABEL 27: MATERIALEN NOPPENPLAATSYSTEEM	60
TABEL 28: MATERIALEN PANEEL VAN ELEMENTGEVELVERBINDINGEN	67
TABEL 29: MATERIALEN GORDIJNGEVELSYSTEEM	71
TABEL 30: MATERIALEN SEMI-STRUCTURELE VERLIJMING	74
TABEL 31: VERGELIJKING VAN MILIEUKOST EN TECHNISCHE LEVENSDUUR AFWERKINGSMATERIALEN	76
TABEL 32: PANELEN PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM	94
TABEL 33: ETICS IN SCENARIO 1	113
TABEL 34: XPS IN SCENARIO 1	115
TABEL 35: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM IN SCENARIO 1	117
TABEL 36: GORDIJNGEVELSYSTEEM IN SCENARIO 1	119
TABEL 37: GERECYCLEERDE INHOUD (RC) EN RECYCLAGEPERCENTAGE (RR) PER GEVELRENOVATIESYSTEEM	122
TABEL 38: ETICS IN SCENARIO 2	123
TABEL 39: XPS IN SCENARIO 2	125
TABEL 40: PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM IN SCENARIO 2	127
TABEL 41: GORDIJNGEVELSYSTEEM IN SCENARIO 2	129

### SITUERING EN RELEVANTIE

Het gebouwenpark in Vlaanderen is sterk verouderd en heeft beperkte energetische prestaties, resulterend in een aanzienlijk primair energieverbruik (Statistiek vlaanderen, 2016). Om de energie-efficiëntie van het bestaande gebouwenpark te verbeteren, lanceerde Vlaanderen 'Het Renovatiepact' dat ernaar streeft om elke woning tegen 2050 even energie-efficiënt te maken als hedendaagse nieuwbouw. Om de ambities van 'Het Renovatiepact' waar te maken zal ingezet moeten worden op energetische renovaties van bestaande gebouwen. Uit onderzoek blijkt dat energetische gevelrenovaties een zeer effectieve oplossing zijn om energieneutrale gebouwen te verkrijgen (Fotopoulou, Semprini, & Cattani, 2018).

Onze gebouwde omgeving is onderhevig aan voortdurende ontwikkelingen die zorgen voor continue transformaties van ons gebouwenpark. Er wordt verwacht dat deze transformaties in de toekomst alleen maar frequenter zullen voorkomen (Galle, 2019). Daarbovenop veroorzaakt ons huidig materiaalgebruik verschillende schadelijke gevolgen voor de planeet: de Europese bouwsector is verantwoordelijk voor 38 % van de totale afvalproductie, 40% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot en het verbruik van 50% van de natuurlijke grondstoffen (Durmisevic, Beurskens, Adrosevic, & Westerdijk, 2017). Door bouwmaterialen te hergebruiken en in een gesloten, circulair systeem te houden, kan ingespeeld worden op de continue transformaties van ons gebouwenpark en kunnen de schadelijke effecten van de bouwsector gereduceerd worden. Om dit mogelijk te maken moet ingezet worden op dynamisch bouwen zodat aanpassingen doorheen de tijd niet voor degradatie van de bouwmaterialen zorgen.

In navolging van 'Het Renovatiepact' zullen energetische gevelrenovaties bij (middel)hoogbouw een belangrijke rol spelen om de energie-efficiëntie van het gebouwenpark te verbeteren. Dit lijkt dan ook een uitgesproken kans om deze noodzakelijke renovaties te beschouwen als toepassingsgebied voor circulaire bouwmethodes. Circulair bouwen toepassen op renovaties zorgt echter voor bijkomende inspanningen omdat er rekening gehouden moet worden met de randvoorwaarden van het bestaande gebouw. In deze masterproef wordt bijgevolg onderzocht hoe circulariteit bij gevelrenovaties geïntegreerd kan worden. Zo draagt dit onderzoek bij tot de noodzakelijke transitie naar een duurzamer en circulair gebouwenpark. Deze masterproef kadert binnen een groter onderzoeksproject EURECA dat gefinancierd wordt door Vlaanderen Circulair en waarin Universiteit Gent, Algemene Bouw Maes, De Witte Aluminiumconstructies en Bureau Bouwtechniek deelnemen.

### ONDERZOEK

Deze masterproef onderzoekt hoe gevelrenovaties van (middel)hoogbouw op een circulaire manier uitgevoerd kunnen worden en wat belangrijke circulaire aspecten zijn bij gevelrenovaties. Dit onderzoek wordt opgesplitst in verschillende hoofdstukken die afzonderlijk behandeld zullen worden.

Als voorbereiding op het onderzoek, beschrijft hoofdstuk 1 de drijfveren voor circulair bouwen en de noodzakelijke energetische renovaties. Ook de relevante begrippen voor dit onderzoek komen hier aan bod.

In hoofdstuk 2 zal aan de hand van een literatuurstudie onderzocht worden welke gevelsystemen vandaag de dag een oplossing (kunnen) bieden bij renovaties en hoe deze opgebouwd zijn. Deze systemen zullen vervolgens geanalyseerd en de milieu-impact zal bepaald worden via een levenscyclusanalyse in TOTEM.

In hoofdstuk 3 zullen de geanalyseerde systemen beoordeeld en onderzocht worden op vlak van circulariteit met behulp van de bestaande 'Circulaire beoordelingsmethode voor gevelrenovatiesystemen' (Van Gulk, Leenknecht, & Debusseré, 2020), ontwikkeld in het kader van het EURECA-project. Deze beoordelingsmethode zal in deze masterproef op punt gezet worden en fungeert als leidraad voor dit onderzoek. Zo kunnen de sterke en zwakke punten van de geanalyseerde systemen in kaart gebracht worden. Er zal onderzocht worden hoe deze scores zich vertalen in circulaire principes.

In hoofdstuk 4 worden eigen gevelrenovatiesystemen ontwikkeld op basis van de eerder herkende circulaire principes en aangevuld met nieuwe ideeën. Deze ontwikkelde systemen worden opgedeeld in drie categorieën: varianten op houtskeletsystemen, ETICS en vliesgevels. Iedere categorie stelt een verschillende benadering van circulariteit voorop.

Uit elk van deze categorieën wordt één gevelrenovatiesysteem geselecteerd om verder te onderzoeken op vlak van circulariteit in hoofdstukken 5 en 6. Binnen de concrete randvoorwaarden van twee fictieve scenario's, opgebouwd uit twee casestudies, zullen de systemen getoetst worden aan de parameters uit de eerder gebruikte circulariteitsbeoordelingsmethode. Zo wordt circulariteit kwalitatief onderzocht aan de hand van deze twee scenario's. Hoofdstuk 5 bestaat uit een praktische uitwerking van de vooropgestelde scenario's. Hierin worden de parameters component-afhankelijkheid, laagafhankelijkheid, expertise en flexibiliteit voor hergebruik onderzocht.

In hoofdstuk 6 worden de milieukosten van de vooropgestelde scenario's voor de systemen bepaald met behulp van een levenscyclusanalyse gemodelleerd in SimaPro. Hierdoor kunnen de parameters milieukost, recyclage en verwachte levensduur onderzocht worden. Via deze scenario's wordt een duidelijk beeld gegeven van de circulaire en veranderingsgerichte capaciteiten van een gevelrenovatiesysteem en kan de circulariteitsmethode tegelijk ook kritisch geanalyseerd worden.

In hoofdstuk 7 wordt ten slotte een algemene conclusie en kritische reflectie gevormd op het onderzoek.

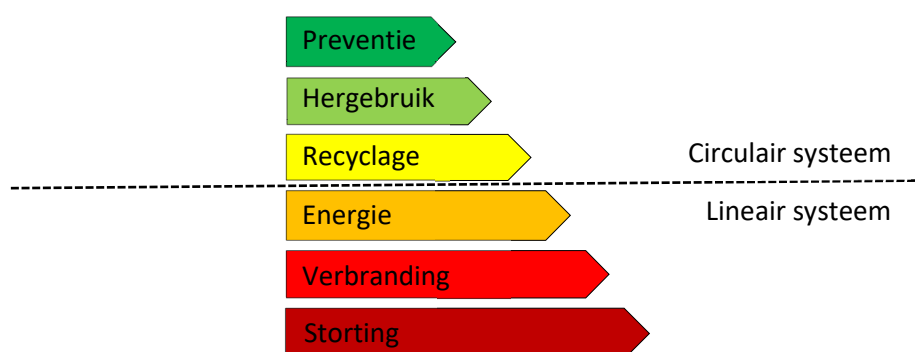
# 1 CONTEXT EN SITUERING VAN HET ONDERZOEK

## 1.1 CIRCULARITEIT

### 1.1.1 WAAROM CIRCULAIR BOUWEN?

Hoewel de kwaliteit van de hedendaagse bouwpraktijk blijft verbeteren, bereiken veel bouwmaterialen hun verwachte, technische levensduur (de tijd dat de technische prestaties van een materiaal volstaan) niet. De voortdurende transformaties van ons gebouwenpark, die in de toekomst vaker zullen voorkomen zorgen ervoor dat de gebruikslevensduur (de tijd dat een materiaal gebruikt wordt) van bouwmaterialen verder zal verkorten (Galle, 2019). Daarbovenop veroorzaakt ons huidige materiaalgebruik verschillende schadelijke gevolgen voor de planeet.

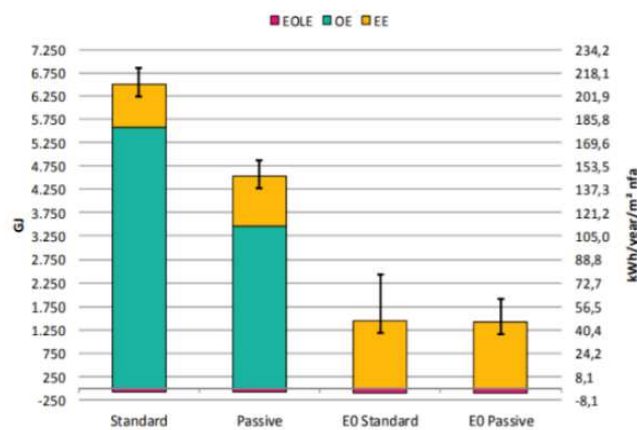
Een eerste schadelijk effect is het ontstaan van enorme afvalstromen. De Europese bouwsector is verantwoordelijk voor 38 % van de totale afvalproductie en is voornamelijk georganiseerd volgens een lineaire logica (Durmisevic, Beurskens, Adrosevic, & Westerdijk, 2017). Te vaak worden bouwmaterialen gestort, verbrand of gerecycleerd alvorens ze hun technische levensduur bereiken (Leefmilieubrussels, 2018). Het huidige Belgische afvalbeheer slaagt erin om ongeveer 90% van het bouw- en sloopafval te recyclen (Servaes & Van de Velde, 2014-202), maar er is ruimte voor verbetering. Er worden voornamelijk steenachtige fracties gerecycleerd in laagwaardige toepassingen. Ook zijn de recyclageprocessen vaak energie-intensief en blijft de hoeveelheid gerecycleerde inhoud in het productieproces doorgaans beperkt. Bovendien wordt het recyclageproces vaak belemmerd door vervuiling van de bouwmaterialen. Zo beperkt de huidige bouwsector zich hoofdzakelijk tot de onderste treden op de ladder van Lansink (een afvalrichtlijn die zes manieren van afvalbeheer onderscheidt en rangschikt). Zoals weergegeven op Figuur 1, laten de bovenste treden op de ladder van Lansink zien hoe er beter met (afval)materialen omgegaan kan worden. Volgens deze afvalrichtlijn moet er gestreefd worden naar een minimale afvalproductie door preventie en hergebruik.



Figuur 1: Ladder van Lansink onderscheidt zes manieren om met afval om te gaan.



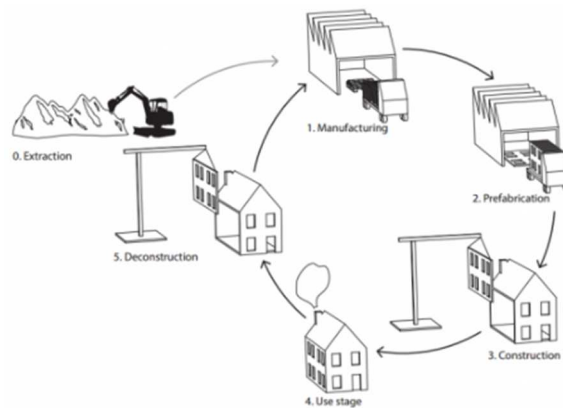
Een tweede schadelijk effect van ons huidig materiaalgebruik is de uitputting van natuurlijke grondstoffen. De Europese bouwsector verbruikt 50% van de natuurlijke grondstoffen van de planeet (Durmisevic, Beurskens, Adrosevic, & Westerdijk, 2017). Vorig jaar (2020) viel de wereldwijde 'Earth Overshoot Day' op twee augustus en nog alarmerender de 'Country Overshoot Day' van België viel op vijf april. Vanaf deze dagen, tot het einde van het jaar, verbruiken respectievelijk de wereld en België de jaarlijkse reserves aan natuurlijke grondstoffen van de planeet (Earth overshoot day, 2020). Zoals gesteld door "The World Resources Institute" (1992): "...deze voortdurende uitputting van de minerale en fossiele grondstoffen van de aarde zou uiteindelijk leiden tot hun beperkte beschikbaarheid..." (Spence & Mulligan, 2000). Om deze situatie te verbeteren, moet ernaar gestreefd worden minder natuurlijke grondstoffen te verbruiken en in plaats daarvan andere, niet-schadelijke bronnen van materialen aan te wenden. Zo kunnen gebouwen worden beschouwd als materiaalbanken die aan het einde van hun gebruikslevensduur ontmanteld kunnen worden tot waardevolle componenten. Dit verwijst naar het begrip 'Urban Mining', waarbij het bestaande gebouwenpark de plaats is om materialen te onttrekken voor nieuwe bouwprojecten (Janssens, 2019)



Figuur 2: De hoeveelheid ingebedde energie (EE), operationele (OE) en einde levensduur (EOL) energie voor standaard, passieve, standaard energieneutrale (E0) en passieve energieneutrale (E0) woningen (Himpe, 2012).

Elk gebouw heeft een milieu-impact die te wijten is aan de operationele energie (energie om het gebouw te gebruiken), de ingebedde energie (de energie die nodig is om bruikbare bouwmaterialen te produceren uit de grondstoffen van de aarde) en de einde levensenergie (de energie die nodig is om het materiaal te hergebruiken, te recyclen, te verbranden of te storten). De milieu-impact over deze volledige levenscyclus van materialen wordt begroot met behulp van levenscyclusanalyse. Gedurende deze volledige levenscyclus veroorzaken gebouwen CO<sub>2</sub>-emissies. De bouwsector in Europa is verantwoordelijk voor 40% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot (Durmisevic et al., 2017). De afgelopen jaren werd sterk ingezet op het verminderen van het operationeel energieverbruik van gebouwen, waardoor de huidige eisen voor energieprestaties van nieuwbouwwoningen resulteren in (bijna) energieneutrale woningen (Energiesparen, 2021). Zoals weergegeven op figuur 2, verdwijnt bij zeer energie-efficiënte gebouwen (zoals energieneutrale woningen) de gebruiksenergie en dragen alleen de ingebedde energie en de einde levensenergie van materialen nog bij tot de totale milieu-impact van het gebouw. Voor deze energieneutrale woningen is de hoeveelheid ingebedde energie hoger dan bij niet-energie neutrale woningen vanwege de technische installaties en de materialen van de gebouwschil die nodig zijn om de operationele energie te reduceren (Himpe, 2012). Om de voetafdruk van onze gebouwen nog verder te verkleinen verschuift de aandacht nu naar het

reduceren van de ingebodde en einde levensenergie van de gebruikte bouwmaterialen. De ingebodde energie kan onder meer verlaagd worden door te kiezen voor materialen met een energiearm productieproces. Door materialen te hergebruiken kan vermeden worden dat deze, voordat ze hun technische levensduur bereiken, tot afval gedegradeerd worden en hun ingebodde energie verloren gaat. Levenscyclusanalyses hebben aangetoond dat de impact bij hergebruik van bouwmaterialen twee tot twaalf keer kleiner is dan bij nieuwe equivalenten (Deweerd & Mertens, 2020). Hergebruik van bouwmaterialen is bijgevolg een doeltreffende manier om schadelijke effecten van de bouwsector te reduceren.



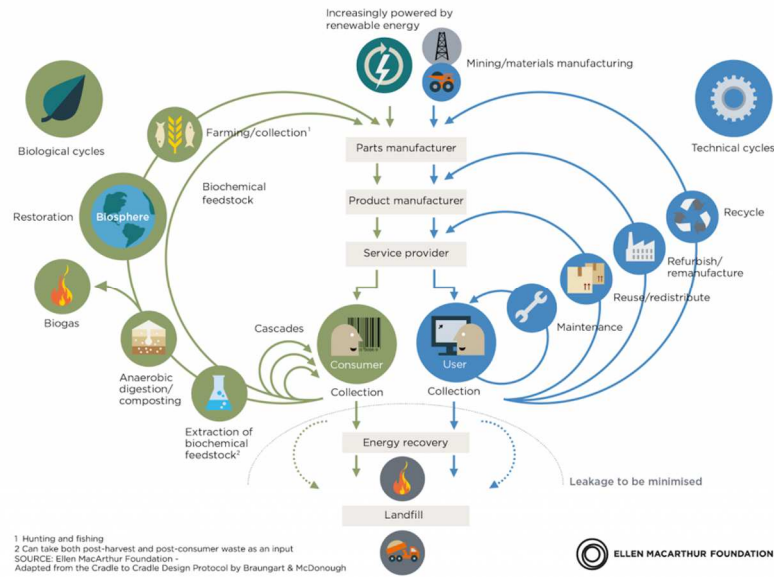
Figuur 3: Circulair bouwen (OVAM, 2020)

Door bouwmaterialen te hergebruiken en in een gesloten, circulair systeem te houden, zoals weergegeven op Figuur 3, kunnen de schadelijke effecten van de bouwsector, zoals afvalproductie, verbruik van natuurlijke grondstoffen en CO<sub>2</sub>-uitstoot, drastisch gereduceerd worden.

### 1.1.2 CIRCULAIR BOUWEN

Het gebruik van materialen kan opgedeeld worden in twee verschillende kringlopen: de biologische en technologische, weergegeven op Figuur 4 (Ellen MacArthur Foundation, 2015). De biologische kringloop bestaat uit organische materialen zoals hout, stro, leem etc. die na gebruik door biologische processen terug opgenomen kunnen worden in ecosystemen. Op die manier blijven deze materialen in een gesloten kringloop. Zolang de balans tussen consumptie van materialen en vermogen van de ecosystemen in evenwicht blijft, vormt dit een eindeloze bron aan organische materialen. De technologische kringloop bestaat uit beperkt beschikbare materialen zoals metaal, kunststof etc. die niet gemakkelijk opnieuw geproduceerd kunnen worden. Deze kringloop ambieert hergebruik van de materialen met een maximaal behoud van waarde.

In de biologische kringloop is er de mogelijkheid tot hergebruik in 'cascades'. Dit betekent dat (een deel van) de materialen worden gebruikt in een andere toepassing (kenniskaarten, 2021). Zo kunnen houten balken bijvoorbeeld hergebruikt worden als fijn lattenwerk of als vezels in vezelplaten etc. Binnen de technologische kringloop zijn er vier verschillende opties: onderhoud, hergebruik, opknappen, samenbrengen tot 'nieuw' product en recyclage. Hoe korter de kringloop hoe minder bewerkingsstappen en bijgevolg minder energie, grondstoffen en afvalproductie ermee gepaard gaan. Om de impact op het milieu te reduceren wordt ernaar gestreefd de kringloop zo kort mogelijk te houden.



Figuur 4: Biologische (links) en technologische (rechts) cyclus (Ellen MacArthur Foundation, 2015)

In deze masterproef ligt de focus op de technologische kringloop en meer bepaald op het faciliteren van hergebruik door dynamisch te bouwen.

### 1.1.2.1 DYNAMISCH BOUWEN

Veranderingsgericht of dynamisch bouwen speelt in op de voortdurend veranderende noden van de maatschappij en creëert een strategie die aanpassingen ondersteunt (OVAM, 2016). Er wordt gestreefd naar maximaal hergebruik van bouwmaterialen door deze volledig demonteerbaar te bevestigen. Op die manier kan de gebruikslevensduur van materialen geoptimaliseerd en kunnen materiaalkringlopen gesloten worden.

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

Figuur 5: Ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen (OVAM, 2016)

De '24 ontwerprichtlijnen veranderingsgericht bouwen' (OVAM, 2016) beschrijven wat belangrijke concepten zijn binnen het dynamisch bouwen. Zoals weergegeven in Figuur 5 op beschrijft deze richtlijn drie niveaus met verruimende schaal: elementniveau (het samenbrengen van materialen tot opbouwen), gebouwniveau en wijkniveau. Deze niveaus worden gelinkt aan subonderdelen (de componenten zelf), de interface (de verbinding tussen de componenten) en de compositie (de verhouding subonderdelen en interface). In deze masterproef ligt de focus voornamelijk op dynamisch bouwen op elementniveau, de richtlijnen hiervoor worden bijgevolg beschreven.

Op elementniveau wordt gekeken naar omkeerbaarheid, eenvoud en snelheid van de verbindingen (interface). Omkeerbare verbindingen spelen een sleutelrol in dynamisch bouwen aangezien deze noodzakelijk zijn om componenten te demonteren met minimale schade. Daarbovenop vormen snelle en eenvoudige verbindingen een belangrijk aspect om hergebruik te faciliteren. Op vlak van de subonderdelen ligt de focus op duurzaamheid, hergebruikte materialen en compatibiliteit van de componenten zelf. Een duurzame materiaalkeuze impliceert hier voornamelijk een robuust materiaal met lange levensduur. Het incorporeren van hergebruikte materialen is eveneens een aspect binnen circulair bouwen. Compatibiliteit refereert naar gestandaardiseerde elementen met afgestemde vormgeving en maatvoering. Bij compositie wordt er ten slotte gestreefd naar een correcte gelaagdheid, onafhankelijkheid en prefabricatie van het geheel. Een correcte gelaagdheid, m.a.w. de gelaagdheid volgens levensduur, bestaat uit gescheiden lagen die geordend zijn volgens hun levensduur. Op die manier wordt vermeden dat een laag met een korte levensduur ingesloten zit tussen lagen met een langere levensduur. Er wordt gestreefd naar een zo onafhankelijk mogelijke relatie tussen de componenten onderling. Algemeen wordt ook besproken dat prefabricatie binnen dynamisch bouwen voordelen biedt zoals minder bouwafval, snellere (de)montage etc. (OVAM, 2016).

Op gebouwniveau zijn de volgende parameters interessant voor dit onderzoek: omkeerbaarheid, demonteerbaarheid en herbruikbaarheid. Deze begrippen hangen sterk samen met de eerder besproken begrippen van elementniveau en worden bijgevolg niet verder toegelicht.

#### 1.1.2.2 CIRCULARITEITSBEOORDELINGSMETHODE

De 'Circulaire beoordelingsmethode voor gevelsystemen' (Van Gulk, Leenknecht, & Debusseré, 2020), ontwikkeld in het kader van het EURECA-project, is gebaseerd op de ontwerprichtlijn voor veranderingsgericht bouwen, maar focust op gevelsystemen. De methode bestaat uit 6 parameters: recyclage, milieukost, verwachte levensduur, componentafhankelijkheid, laagafhankelijkheid en flexibiliteit voor hergebruik.

Aan de hand van de parameter recyclage wordt rekening gehouden met de gerecycleerde inhoud en het recyclagepercentage van een materiaal. De gerecycleerde inhoud of recycled content (RC) is volgens ISO 14021 de hoeveelheid gerecycleerd materiaal gebruikt wordt bij de productie (Leefmilieu Brussel, 2021). Het recyclagepercentage, recycling rate (RR) van een materiaal is het aandeel gerecycleerde afval ten opzichte van totale hoeveelheid afval (Hotta, Visvanathan, & Kojima, 2016). De milieukost geeft het effect van de gebruikte materialen op de maatschappij en biodiversiteit weer. De verwachte levensduur houdt rekening met de circulaire principes 'duurzame materialen' (lange levensduur) en 'gelaagdheid volgens levensduur'. Componentafhankelijkheid beoordeelt het principe dat onafhankelijke componenten binnen een laag gemakkelijker vervangen of aangepast kunnen worden, zonder andere componenten te beïnvloeden. Laagafhankelijkheid houdt rekening met het type verbinding tussen een laag en de vorige (meer interne) laag. Flexibiliteit voor hergebruik ten

slotte brengt de mogelijkheid om de dimensies van een materiaal aan te passen, om het te hergebruiken in een ander project, in kaart. Deze parameters worden afzonderlijk beoordeeld en samengeteld tot een totaalscore. Hoe lager de score, hoe meer circulair. Voor iedere parameter zal in hoofdstuk 3.1 concreet besproken worden hoe de score bepaald wordt.

### 1.1.3 LEVENSCYCLUSANALYSE

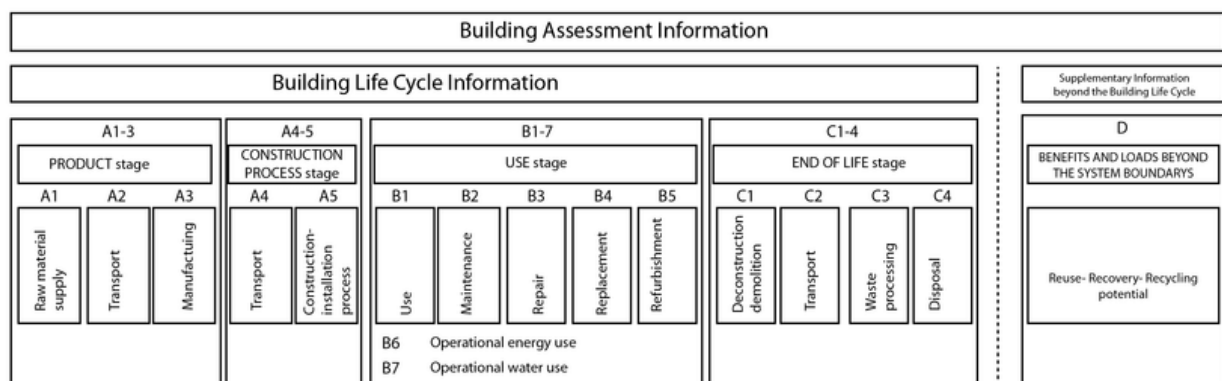
Levenscyclusanalyse (LCA) is een methode om de totale milieu-impact van bouwmaterialen over hun hele levenscyclus te begroten. Dit omvat de winning en verwerking van de benodigde grondstoffen, productie, transport en distributie, gebruik, onderhoud, verwijdering en afvalverwerking (Khasreen, Banfill, & Menzies, 2019).

Een levenscyclusanalyse bestaat uit een algemene procedure die vier fases omvat: doel en reikwijdte, levenscyclusinventarisatie, levenscyclus-impactanalyse en interpretatie (Allacker, Debacker, & Delem, 2011). In de norm 'ISO 14040: Life cycle assessment - Principles and framework' staat de algemene procedure van LCA gedetailleerd beschreven.

TOTEM (Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials) is een gebruiksvriendelijke tool om op een snelle manier de milieu-impact van gebouwelementen of gebouwen te bepalen en is specifiek voor de Belgische bouwsector ontwikkeld. TOTEM beoordeelt de milieueffecten gedurende de volledige levenscyclus van materialen volgens de normen 'EN 15804' en 'EN 15978' (Gids duurzame gebouwen, 2021). Bij een levenscyclusanalyse in TOTEM wordt de MMG (Milieu gerelateerde Materiaalprestatie van Gebouwelementen) methode gehanteerd (Allacker, Debacker, & Delem, 2011). De aannames in deze methode die relevant zijn voor het onderzoek worden hier besproken.

#### DOEL EN REIKWIJDTE

In dit onderzoek wordt LCA gebruikt om de milieu-impact van verschillende gevelrenovatiesystemen te begroten. Op die manier kan inzicht verworven worden in de milieugerelateerde prestaties van gevelrenovatiesystemen. Om de systemen op een conforme wijze te vergelijken moet een functionele eenheid vastgelegd worden. De functionele eenheid is een referentie-eenheid voor het uitdrukken van de milieu-impact. Voor een geveloppervlak is dit bijvoorbeeld één vierkant meter oppervlakte met eenzelfde U-waarde voor een levensduur van 60 jaar. 60 jaar is namelijk de gemiddelde levensduur van een gebouw (Allacker, Debacker, & Delem, 2011). Naast de functionele eenheid is het ook belangrijk op voorhand de systeemgrenzen voor de vergelijking vast te leggen.



Figuur 6: Informatie over de levenscyclus (Vilches, García-Martínez, & Sánchez-Montañés, 2016)

Zoals weergegeven in Figuur 6, bestaat de levenscyclus van een gebouw uit verschillende modules met duidelijk gedefinieerde grenzen (Allacker & Debacker, 2020). Module A bestaat uit de productie en montage van het systeem. Module A1-3 is de productiefase en omvat het ontginnen van de grondstoffen, transport en fabricatie van het materiaal. Vervolgens komt module A4-5, de bouwfase, wat zowel het transport naar de werf als de installatie omvat. Afhankelijk van het type materiaal wordt een afstand en vervoersmiddel voor transport van het product in TOTEM bepaald (Allacker & Debacker, 2020).

Module B, de gebruiksfase, bestaat uit het gebruik, onderhoud, herstelling, vervanging en opknapbeurt. Wanneer materialen een kortere levensduur hebben dan 60 jaar, de beschouwde periode in TOTEM, worden de milieukosten voor vervanging meegerekend. Meer informatie over de gebruikte levensduren in TOTEM is te vinden in het document MMG 2017 (TOTEM, 2021).

Ten slotte is er de einde levensfase, module C, die deconstructie, transport, sortering en einde levensbehandeling (storting, verbranding, recyclage etc.) omvat. TOTEM bepaalt aan de hand van het materiaaltipe welke einde levensbehandeling gehanteerd moet worden. Allocatie aan het einde van de levensduur treedt op wanneer winsten (zoals energieopwekking bij verbranding en grondstoffen bij recyclage) aan het einde van de levensduur gecreëerd worden. In TOTEM wordt gebruikt gemaakt van de 'Cut-off'-allocatiemethode, waarbij de winsten en de lasten van recyclage en hergebruik buiten de grenzen van de beschouwde levenscyclus vallen. Module D omvat deze winsten van hergebruik, recyclage en energierecuperatie en wordt in TOTEM momenteel niet in beschouwing gebracht. Meer info over de precieze berekeningswijze van de modules in TOTEM, staat gedetailleerd beschreven in het document van 'Environmental profile of building elements' (Allacker & Debacker, 2020).

### LEVENSCYCLUSINVENTARISATIE (LCI)

De tweede stap in een levenscyclusanalyse is de inventarisatie. Dit is de fase van de levenscyclusbeoordeling waarin de in- en output voor een product gedurende zijn levenscyclus samengebracht en gekwantificeerd worden (ISO, 2006). Hierin worden de gegevens van de onderzochte materialen verzameld. Van alle deelprocessen die nodig zijn voor de levenscyclusanalyse worden vervolgens de milieueffecten geïnventariseerd. In TOTEM wordt er geopteerd zo veel mogelijk gegevens uit de Belgische context te gebruiken. Bij gebrek aan specifieke productgegevens worden algemenere gegevens uit de Zwitserse Ecoinvent-database gebruikt (Allacker & Debacker, 2020).

### LEVENSCYCLUSIMPACTANALYSE (LCAI)

Dit is de fase van de levenscyclusbeoordeling die gericht is op het verkrijgen van inzicht in de potentiële milieueffecten voor een product gedurende zijn gehele levenscyclus (ISO, 2006). Deze derde fase bepaalt de impact van de milieueffecten op de omgeving, die eerder werden geïnventariseerd. In TOTEM wordt hiervoor gebruik gemaakt van twee sets impactindicatoren: de Europese milieu-indicatoren, CEN, en toegevoegde milieu-indicatoren, CEN+. De CEN en CEN+ indicatoren worden omgerekend naar milieukosten. De milieukosten geven een schatting van de kosten die de samenleving moet betalen om de milieuschade, die aan de maatschappij (bijvoorbeeld via ziekte en schade) en de biodiversiteit wordt toegebracht, te herstellen. Hoe lager deze prijs, hoe minder impact de materialen hebben op de omgeving. Deze milieukosten worden in dit onderzoek uitgedrukt in euro per functionele eenheid. Meer info over deze milieu-indicatoren kan geraadpleegd worden in het document 'Annex: Monetisation of the MMG method' (Wille, 2017).

## INTERPRETATIE

In de laatste fase worden de resultaten geanalyseerd en geïnterpreteerd. Dit is de fase van de levenscyclusbeoordeling waarin de bevindingen van hetzij de inventarisanalyse, hetzij de effectbeoordeling, hetzij beide, worden geëvalueerd om tot zo conclusies en aanbevelingen te komen (ISO, 2006).

## 1.2 CIRCULAIRE GEVELRENOVATIES

In Europa (en Vlaanderen) zijn meer dan 70% van de bestaande gebouwen tussen de jaren 1950 en '70 zonder enige regelgeving met betrekking tot energieprestaties gebouwd (EU, 2010). Dit resulteert in een sterk verouderd gebouwenpark met beperkte energetische prestaties en een beduidend primair energieverbruik (Statistiek vlaanderen, 2016). Om de energie-efficiëntie van het bestaande gebouwenpark te verbeteren, lanceerde Vlaanderen 'Het Renovatiepact' dat ernaar streeft elke woning tegen 2050 even energie-efficiënt is als hedendaagse nieuwbouw (wat overeenkomt met een energielabel (EPC) A). Momenteel voldoet slechts 5% van alle huizen en 10% van alle appartementsgebouwen aan deze eis (Energiesparen, 2021). Om de ambities van 'Het Renovatiepact' waar te maken zal volop ingezet moeten worden op energetische renovaties van bestaande gebouwen.

Om een energetische renovatie uit te voeren, kan geopteerd worden om de actieve elementen (de technische installaties) en/of de passieve elementen (de gebouwschil) aan te passen. In het onderzoek 'The challenge of sustainable building renovation' (Pombo, Rivela, & Neila, 2016) wordt duidelijk dat voornamelijk de passieve strategieën worden toegepast. Volgens BENOveren (of beter renoveren), een initiatief van de Vlaamse overheid om de energetische ambities van 'het Renovatiepact' te realiseren, wordt een energetische renovatie van de thermische schil als eerste stap vooropgezet (Ik BENOveer, 2017). Op die manier kan de hoeveelheid energie die nodig is om het gebouw te verwarmen of te koelen gereduceerd worden en kan daarna geopteerd worden voor de actieve strategieën. Aangezien de gevel bij (middel)hoogbouw, een zeer groot aandeel heeft in de buitenschil, zullen energetische gevelrenovaties bij (middel)hoogbouw een belangrijke strategie worden om de energie-efficiëntie van het bestaande gebouwenpark te verbeteren. Een energetische gevelrenovatie bestaat eruit de energie-efficiëntie van een gebouw te verbeteren door (meer) isolatiematerialen te plaatsen in de buitenschil. In de studie 'Deep renovation in existing residential buildings through façade additions' (Fotopoulou, Semprini, & Cattani, 2018) wordt het energiebesparingspotentieel van energetische gevelrenovaties geïllustreerd aan de hand van onderzoek op casestudies in verschillende klimatologische contexten. De verkregen resultaten bewijzen dat deze gevelrenovaties een zeer effectieve oplossing zijn om energieneutrale gebouwen te verkrijgen.

In navolging van het 'Renovatiepact' zullen naar alle waarschijnlijkheid de komende decennia talrijke gevelrenovaties uitgevoerd worden. Dit lijkt dan ook een uitgesproken kans om deze noodzakelijke renovaties op een circulaire manier uit te voeren. Circulair bouwen toepassen op renovaties zorgt echter voor bijkomende inspanningen omdat er rekening gehouden moet worden met de randvoorwaarden van het bestaande gebouw. Er wordt namelijk geambieerd om een statisch gebouw te transformeren tot een dynamisch gebouw, wat niet vanzelfsprekend is (Paduart & Brancart, 2018). Hoe de gevelrenovaties van (middel)hoogbouw op een circulaire manier uitgevoerd kunnen worden, wordt bijgevolg in deze masterproef onderzocht.

Een praktijkvoorbeeld hiervan is het 'Circular Retrofit lab' een van de pilootprojecten binnen het BAMB (buildings as material banks) onderzoek. Binnen dit project werd gefocust op veranderingsgericht (ver)bouwen en werd de bestaande skeletstructuur dynamisch ingevuld (BAMB, 2021). Ook Vlaanderen Circulair is een initiatief dat meehelpt aan de transitie naar een circulaire bouwsector door de overheid, bedrijven en kennisinstellingen samen te brengen. Deze masterproef



kadert in een groter onderzoeksproject EURECA eveneens binnen Vlaanderen Circulair, waarin Universiteit Gent, Algemene Bouw Maes, De Witte Aluminiumconstructies en Bureau Bouwtechniek deelnemen (Vlaanderen circulair, 2021). Er wordt geambieerd een duurzaam en herbruikbaar gevelsysteem voor renovaties te ontwikkelen. REHAB is een lopend onderzoeksproject van de TU Delft in samenwerking met AMS-instituut waarin vergelijkbaar onderzoek wordt gedaan naar 'de circulaire bouwschil' en 'de circulaire aanbouw'. Hieruit werden in 2019 vijf varianten van de 'circulaire renovatieschil' voorgesteld: een constructie uit duurzame en biologisch materialen, uit hergebruikte materialen, uit gerecyclede materialen, met eenvoudige demontage en remontage en een modulaire gevel (TUDelft, 2021).

Om een circulaire gevelrenovatie uit te voeren is het belangrijk de relevante aspecten van de gevel en het bestaande gebouw eerst te bespreken. Zo vormen het type gebouw en de bouwfysische aspecten en brandveiligheid van de gevel twee onderwerpen die inherent zijn aan de gevelrenovatiesystemen.

---

## 1.2.1 TYPE GEBOUW

### 1.2.1.1 DRAAGSTRUCTUUR

Binnen het bestaande gebouwenpark van België kunnen verscheidene typologieën met verschillende draagstructuren onderscheiden worden. De draagstructuur bepaalt de maat en de manier waarop een gevel wordt uitgevoerd. In deze masterproef wordt het onderscheid gemaakt tussen twee types draagstructuur binnen (middel)hoogbouw: de open draagstructuur (skeletstructuur Figuur 8a) en de gesloten draagstructuur (massiefbouw, Figuur 8b). Een skeletstructuur impliceert, grote openingen en geen draagmuren in de gevel. Een massieve draagstructuur daarentegen bestaat uit draagmuren die zich in het gevelvlak bevinden.



Figuur 8a: Lake Shore drive building door Mies van der Rohe (Lakeshoredrive,2021)



Figuur 8b: Manadnock building door Daniel Burnham en John Root (Amusingplanet,2021)

### 1.2.1.2 MAATVOERING

De maatvoering van circulaire systemen speelt een belangrijke rol om de herbruikbaarheid van een systeem op verschillende gebouwen te garanderen. Daarom zal er in een eerste instantie gezocht worden naar richtlijnen die de maatvoering van gevelsystemen kunnen bepalen. Hiervoor wordt een onderscheid gemaakt tussen in situ en prefab systemen.

#### IN SITU

Voor de gevelrenovatiesystemen die in situ geïnstalleerd worden hangt de maatvoering samen met de dimensies van de gevel. Om deze systemen te hergebruiken, moeten ze ontmanteld worden tot op materiaalniveau en kunnen de materialen zelf hergebruikt worden in hetzelfde of een ander systeem.

#### PREFAB

Het prefabriceren van een gevelsysteem komt onder andere de technische kwaliteit, snelheid en kostprijs ten goede (Passiefhuis, 2021). De afmetingen van de panelen moeten daarom wel op voorhand bepaald worden. Het prefabricatie aspect biedt het voordeel dat de elementen zowel op materiaal-als elementniveau hergebruikt kunnen worden. Om hergebruik op elementniveau mogelijk te maken, vormt de maatvoering van de panelen een belangrijk aspect. Er wordt een opsplitsing gemaakt in type gevel om de maatvoering van de prefab panelen te bepalen: (a) gesloten façade delen en (b) open façade delen.

#### Gesloten façade delen

Gesloten façade delen (vb. (bijna) blinde gevels) hebben als voordeel dat de prefab panelen grote afmetingen kunnen hebben. Om de maatvoering van de panelen te bepalen wordt in normen van verschillende gebouwtypologieën gezocht naar vormgevende maten voor een gebouw. Zo kan bijvoorbeeld de hoogte van de panelen gebaseerd worden op de verdiepingshoogte. In Tabel 1 wordt onderzocht of er standaardmaten voor verdiepingshoogte vooropgesteld kunnen worden. Hieruit wordt duidelijk dat er geen eenduidige maatvoering voor de verdiepingshoogte te vinden is. Een mogelijke strategie kan erin bestaan de minimumhoogte te hanteren en aan te vullen met op maat gemaakte elementen.

Type gebouw en norm	Verdiepingshoogte
<i>Sociale woningbouwnorm (VMSW, 2020)</i>	2,4 m
<i>Bouwnorm schoolgebouwen (AGION, 2021)</i>	2,5 m
<i>Woningkwaliteit (Vlaanderen is wonen, 2021)</i>	2,2 m
<i>Gangen in toegankelijke gebouwen (Toegenkelijk gebouw, 2021)</i>	2,3 m

Tabel 1: Minimumwaarde verdiepingshoogte

### Open façade delen

Open façade delen van hoogbouw (vb. (bijna) glazen gevels) bestaan vaak uit ramen alternerend met gesloten stroken ter hoogte van de vloerplaten. Om deze gesloten stroken in te vullen zal hier een paneel met specifieke afmetingen geplaatst worden. Er wordt onderzocht naar maatvoering van deze gesloten stroken.

- Minimum dikte verdiepingvloer (WTCB, 1994):
  - (a) Vloerafwerking: 1 cm
  - (b) Deklaag: 5 cm
  - (c) Draagstructuur: 20 cm
  - (d) Vals plafond?
- Minimale hoogte gesloten opstand, borstweringshoogte bij een raam (WTCB, 2021): 80 cm

De maatvoering van deze gesloten stroken kan eveneens bepaald worden door minimumafmetingen. Deze minimumafmetingen kunnen kansen bieden bij het vormgeven van geprefabriceerde panelen voor open façade delen.

Er wordt geconcludeerd dat de opsplitsing tussen gesloten façade delen en open façade delen verder kan helpen om de maatvoering van de prefab panelen vast te leggen. De strategie van minimumafmetingen kunnen een aanknopingspunt vormen voor de zoektocht naar een universele maatvoering.

---

## 1.2.2 BOUWFYSISCHE ASPECTEN EN BRANDVEILIGHEID VAN DE GEVEL

De materialen zijn een belangrijk aspect binnen een gevelrenovatiesysteem en bepalen de eigenschappen van de gevel en de achterliggende ruimtes op vlak van warmte, vocht, lucht, akoestiek, licht en brand.

### THERMISCHE PRESTATIES

De warmteverliezen in de gevel worden via de U-waarde of warmtedoorgangscoefficiënt in kaart gebracht (Leefmilieubrussels, 2018). Binnen de EPB-regelgeving worden eisen op de U-waarden van de thermische schil gelegd. De huidige maximale U-waarde van buitenmuren bedraagt 0,24 W/m<sup>2</sup>K (Energiesparen, 2021). De U-waarde speelt ook een belangrijke rol bij de functionele eenheid (hoofdstuk 1.1.3) van gevelsystemen.

### AKOESTISCHE PRESTATIES

Geluid kan zich op verschillende manieren voortplanten binnen een gebouw: enerzijds is er luchtgeluid (geluidstrillingen overgedragen via de lucht) en anderzijds is er contactgeluid (geluidstrillingen overgedragen via gebouwdelen) (Recitel insulation, 2021). Akoestische isolatie en een aandachtige uitvoering verhindert het verspreiden van lucht- en contactgeluid door de gevel. Akoestische isolatie kent twee grote principes: massa en massa-veer-massa. In de gevel wordt dit tweede principe vaak gerealiseerd wanneer het isolatiemateriaal voldoende samendrukbaar is en fungeert als veer. De Belgische norm NBN S01-400-1(2008) beschrijft uitgebreid de akoestische criteria voor woongebouwen.

## LUCHT- EN WATERDICHTHEID

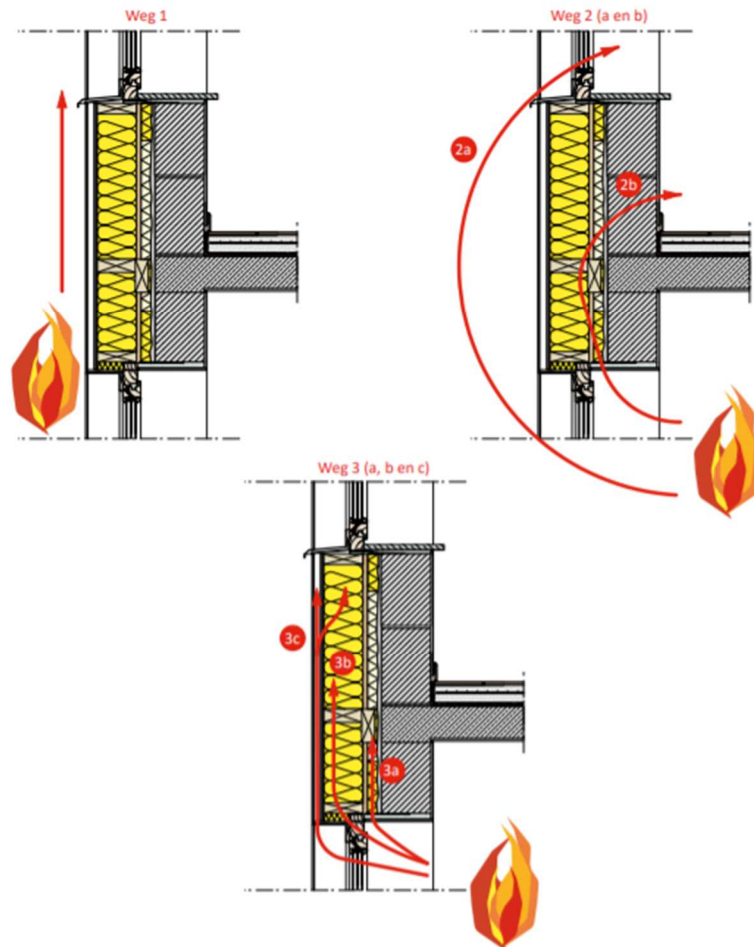
Luchtdicht bouwen speelt een belangrijke rol in het verbeteren van energieprestaties. Traditioneel wordt de luchtdichtheid van een gevelopbouw gecreëerd door pleisterwerk aan de binnenzijde. Ter hoogte van aansluitingen moeten er bijkomende folies geplaatst worden om de luchtdichtheid te verwezenlijken (Mees & Loncour, 2015). Weersinvloeden kunnen zorgen voor ‘wind-driven-rain’, een combinatie van wind en regen, waartegen de gevel beschermd moet zijn. Dit kan gebeuren door een ééntrapsdichting, een waterbarrière van één laag, of een tweetrapsdichting, waarbij de barrière in twee lagen gecreëerd wordt zoals bijvoorbeeld het geval is bij een spouwmuur. Via spouwconstructies en waterdichtingsfolies in de gevelopbouw wordt ervoor gezorgd dat binnendringend vocht naar buiten wordt afgeleid. De lucht- en waterdichtingsfolies worden in de meeste uitvoeringsdetails verkleefd en zullen bijgevolg moeilijk te installeren zijn op een circulaire wijze.

## BRANDVEILIGHEID

Materiaaleigenschappen spelen ook een belangrijke rol in het beperken en voorkomen van verspreiding van rook en vuur binnen een gebouw. Om de brandveiligheid van gebouwen te waarborgen bestaat de regelgeving: ‘Koninklijk Besluit basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing nieuwe gebouwen’, afgekort KB (FOD, 2016). Echter is er marge bij de norm rond brandveiligheid aangezien renovaties een uitzondering vormen op het eerdergenoemde Koninklijk Besluit. Toch zullen de gevelrenovatiesystemen zoveel mogelijk ontwikkeld worden met de toepassing van de vooropgestelde eisen. De aspecten die in het KB aan bod komen en relevant zijn voor gevelsystemen worden hier besproken.

### Brandvoortplanting via de gevel

Voortplanting van brand via de gevel is opgedeeld in drie concepten, weergegeven op Figuur 9. Het eerste concept (weg 1) is het verderzetten van brand via het geveloppervlak. Dit type brandverspreiding kan beperkt worden door de geschikte afwerkingsmaterialen te kiezen. Het tweede concept (weg 2) bespreekt brandoverslag tussen twee compartimenten via de gevel. Een brandcompartiment is een gedefinieerde zone van een gebouw dat bij brand verspreiding naar de rest van het gebouw verhindert. Deze brandoverslag kan zowel langs buiten, wanneer vlammen uit de gevel kunnen ontsnappen, als langs binnen, ter plaatse van de aansluiting tussen verdiepingsvloer en gevel. Het derde concept (weg 3) is brandvoortplanting doorheen het gevelsysteem. In dit geval ontstaat er een ongecontroleerde voortplanting van de brand binnenin de gevelopbouw, via brandbare materialen (Rockwool, 2021).



Figuur 9: Mogelijkheden voortplantingswegen brand (Dubois S. , Remy, de Bouw, & Vanhellemont, 2019)

### Brandweerstand

De brandweerstand is het vermogen om voor een bepaalde tijd te voldoen aan de eisen van stabiliteit (R), vlamdichtheid (E) en thermische isolatie (I) (Dubois S. , Remy, de Bouw, & Vanhellemont, 2019). De brandweerstand wordt beschreven door de letters R, E en I gevolgd door het aantal minuten weerstand: 30, 60 of 120.

### Brandreactie

De brandreactie beschrijft de bijdrage van een bouw materiaal aan de ontwikkeling van de brand. Dit wordt opgedeeld in verschillende brandreactie klassen, zoals weergegeven in Tabel 2, van A (onbrandbaar) tot F (uiterst brandbaar).

Naast deze brandreactie klassen zijn er nevenklassen met een 's' of een 'd' gevolgd door een cijfer. De nevenklassen s1, s2, s3 hebben betrekking op de rookontwikkeling, een hoog cijfer geeft aan dat er grote rookontwikkeling is. De nevenklassen d0, d1, d2 bepalen de druppelvorming, een hoog cijfer duidt eveneens op een grotere hoeveelheid brandende druppels (WTCB, 2016).

Deze masterproef spitst zich toe op middelhoogbouw (10m – 25m hoog) en hoogbouw (> 25m). Volgens het KB moeten de materialen in de gevelopbouw bij (middel) hoogbouw voldoen aan B-s3,d1. Deze eisen omvatten de 'eind-gebruik-condities', wat wil zeggen dat de gevelopbouw met inbegrip van bevestigingen volledig wordt beschouwd.

<i>Brandreactieklasse</i>	<i>Beschrijving</i>
A1	Geen bijdrage bij volontwikkelde brand
A2	Beperkte bijdrage bij volontwikkelde brand
B	Geen flashover* bij begin van brand
C	Flashover* na 10 minuten bij begin van brand
D	Flashover* binnen 10 minuten bij begin van brand
E	Flashover* binnen 2 minuten bij begin van brand
F	Slechts mogelijke categorie

*\*Een flashover of vlamoverslag is het plotseling ontbranden van een laag hete rookgassen.*

**Tabel 2: Brandreactieklassen en beschrijving**

Indien deze eis niet ingelost kan worden via de materiaaleigenschappen van het desbetreffende gevelsysteem, kan een oplossing met behulp van branddammen redding bieden. De uitvoering van een branddam is afhankelijk van het type gevelbekleding. Een voorbeeld van een branddam bestaat uit een onderbreking van het isolatiepakket met onbrandbaar isolatiemateriaal. Ook een speciale laag met SE (Self Extinguishing) kwaliteit kan bescherming bieden voor materialen met onvoldoende kwaliteiten. Deze brandvertragende laag zorgt ervoor dat de laag vermindert aan het ontstaan of het verder ontwikkelen van een brand (Sleiderlink bouwmaterialen, 2021).

## 2 ANALYSE BESTAANDE GEVELRENOVATIESYSTEMEN

In dit hoofdstuk zal onderzocht worden welke gevelsystemen vandaag de dag een oplossing (kunnen) bieden bij renovaties en hoe deze opgebouwd zijn. Deze systemen zullen vervolgens geanalyseerd worden en de milieu-impact ervan zal bepaald worden via een levenscyclusanalyse in TOTEM.

### 2.1 ONDERZOEKSMETHODE

Met behulp van literatuurstudie worden vier verschillende systemen bepaald die in dit onderzoek geanalyseerd zullen worden. Er werd beslist om courant gebruikte gevelsystemen bij renovaties zoals de ETICS en houtskeletsystemen te onderzoeken. Daarbovenop worden ook gevelsystemen die minder vaak voorkomen, maar op het eerste gezicht wel mogelijkheden bieden op vlak van circulariteit zoals een sandwichpaneel en gordijngewel meegenomen in de analyse. Op die manier is er een verscheidenheid aan gevelrenovatiesystemen die geanalyseerd en vergeleken zullen worden op vlak van milieukost. Op die manier kan ingeschat worden hoe deze parameter zich verhoudt tot circulariteit.

#### 2.1.1 EIGENSCHAPPEN GEVELRENOVATIESYSTEEM

Om de geselecteerde systemen op een conforme wijze te analyseren en te vergelijken, moeten er verschillende eigenschappen van het gevelsysteem vastgelegd worden. De belangrijkste eigenschappen voor gevels werden in hoofdstuk 1.2.2 eerder besproken. Ieder gevelrenovatiesysteem krijgt een U-waarde van  $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Op vlak waterdichtheid zullen er voldoende barrières gevormd moeten worden in de opbouw. Ook voor luchtdichtheid kan het gevelsysteem een barrière voorzien, maar kan er ook gerekend worden op een binnenafwerking in pleister. In deze analyse wordt ervan uitgegaan dat de systemen voldoen op vlak van akoestische prestaties. Ook zal er in dit hoofdstuk geen vergaand onderzoek uitgevoerd worden naar de brandveiligheid, er wordt aangenomen dat de bestaande gevelsystemen brandconform uitgevoerd kunnen worden. De geanalyseerde systemen zullen aan de twee types draagstructuur getoetst worden. Enerzijds wordt onderzocht hoe het systeem reageert op een open draagstructuur (skeletstructuur, categorie 1) en anderzijds op een gesloten draagstructuur (massiefbouw, categorie 2).

#### 2.1.2 MILIEU-IMPACT GEVELRENOVATIESYSTEEM

Naast een analyse van de opbouw, zal de milieu-impact van het gevelsysteem bepaald worden. Dit gebeurt aan de hand van een levenscyclusanalyse met behulp van TOTEM. De algemene methode van TOTEM werd beschreven in hoofdstuk 1.1.3. De toegepaste gevelrenovatiesystemen zullen op een conforme manier, via een functionele eenheid van één  $\text{m}^2$  oppervlakte met een U-waarde van  $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$  voor een technische levensduur van 60 jaar vergeleken worden. In TOTEM wordt een onderscheid gemaakt tussen ingebedde en operationele energie. Aangezien de U-waarde voor de systemen vastgelegd is, zal ook de operationele energie gelijk zijn en kan deze uit de vergelijking gehaald worden. Op die manier kan de totale ingebedde energie van de verschillende systemen geanalyseerd en vergeleken worden.

Aangezien alle materialen van het systeem onderzocht dienen te worden, wordt ook de gevelafwerking meegenomen. Ondanks het feit dat de gevelafwerking veel met esthetische overwegingen te maken heeft, is deze soms inherent aan het systeem (vb. ETICS) en kan daarom niet verwaarloosd worden. Om de systemen te belonen die een veelzijdigheid aan mogelijkheden voor de afwerking creëren, is ervoor gekozen om telkens de gevelafwerking met de kleinste milieu-impact te gebruiken. Op deze manier hebben configuraties waarbij veel gevelafwerkingen mogelijk zijn ook een voordeel bij de bepaling van de milieu-impact.



## 2.2 RESULTATEN

## 2.2.1 CATEGORIE 1: SKELETSTRUCTUUR

In deze eerste categorie wordt bekeken welke materialen in de gevelopbouw nodig zijn wanneer de gevelrenovatie wordt toegepast op een skeletstructuur. De skeletstructuur werd eerder besproken in hoofdstuk 1.2.1.1. Het gevelrenovatiesysteem zal moeten bestaan uit een binnenafwerking, eigen draagstructuur, thermische schil en gevelafwerking.

## 2.2.1.1 ETICS

De ETICS of 'External Thermal Insulation Composite System' heeft een eenvoudige opbouw, bestaande uit een isolatiemateriaal en een afwerkingsmateriaal met verlijmde verbindingen. In België wordt een ETICS veelvuldig gebruikt omdat deze efficiënt en goedkoop is (Gregoire, Dirx, & Smits, 2016).

Systeemopbouw

Nr.	Materiaal	Dikte [m]	$\lambda$ -waarde [W/m.K]	Levensduur [jaar]	Milieukost [%]
C1	Traditionele gipspleister	0,007	/	40	20
C2	EPS-beplating (met pluggen en lijm)	0,150	0,039	40	34
C3	Akoestische snelbouwsteen	0,138	0,463	>60	38
C4	Gipspleister	0,010	0,400	40	8
Totale milieukost van de materialen: 8,86 €/FE					

Tabel 3: Milieukostberekening ETICS-skeletstructuur via TOTEM

De opbouw van dit systeem (Tabel 3) bestaat uit vier opeenvolgende lagen: een binnenafwerking van pleister, snelbouwsteen, EPS-isolatie en een gevelafwerking van pleister. De isolatieplaten kunnen op verschillende manieren bevestigd worden aan de achterliggende draagstructuur. Meestal wordt gebruik gemaakt van verlijmde systemen en wordt via stroken, kambed of noppen de lijm aangebracht op de isolatieplaten en vervolgens op de draagstructuur bevestigd. Mechanische systemen, zoals isolatiepluggen en PVC-profielen zijn echter ook mogelijk ter aanvulling van de lijm. Het isolatiemateriaal zelf is in veel gevallen EPS maar wanneer een betere brandreactieklasse wordt verwacht kan minerale wol of cellenglas de oplossing bieden. Wanneer het isolatiemateriaal geplaatst is, wordt de gevelafwerking (pleister) aangebracht (Figuur 10), deze werkt tegelijk als waterdichting en afwerking. In zijn meest eenvoudige vorm bestaat deze pleister uit twee lagen: een gewapende grondpleister en een afwerkpleister. De afwerkpleister kan mineraal, silicaat of organisch zijn afhankelijk van de brandeisen, weersomstandigheden, uitvoering en esthetische eisen. Voor de detaillering in de hoeken van dit systeem worden vaak (metalen) profielen gebruikt. Hierbij is aandacht nodig voor de thermische uitzetting van dit materiaal en eventueel corrosie (Dirx, 2010).



Figuur 10: Pleisterlaag ETICS-systeem (Crep-info,2021)

Een van de nadelen van het ETICS-systeem is dat het enkel bij een buitentemperatuur tussen de 5 en 30 graden geplaatst mag worden. Deze waarden zijn vuistregels en de precieze plaatsingsomstandigheden van een ETICS-systeem kunnen geraadpleegd worden in de technische fiche van de fabrikant. Het uitvoeren van de pleisterlaag gebeurt best zo ononderbroken mogelijk (Gregoire, Dirx, & Smits, 2016).

#### Milieu-impact

Tabel 3 toont ook het aandeel van de milieukost van de materialen die gebruikt zijn in het gevelsysteem. Het ETICS-systeem scoort relatief goed en heeft een lage milieukost. Uit de analyse van de milieukost wordt duidelijk dat vooral de draagstructuur (akoestische snelbouwsteen) een grote bijdrage levert aan de totale milieukost. De isolatielaag van EPS, met een dikte van 15cm, heeft de op een na grootste impact. Beide lagen hebben een grote milieukost, maar in vergelijking met de andere lagen ook een grote dikte. Het buitenpleisterwerk zorgt voor een milieukost die gelijk is aan de helft van de milieukost van de isolatie wat duidt op een relatief grote milieukost. Dit is onder andere te wijten aan het pleisterwerk met beperkte dikte en het materiaal bezit een relatief korte, technische levensduur. In de 60 jaar die geanalyseerd wordt zal deze namelijk moeten vervangen worden na 40 jaar, wat zorgt voor een bijkomende milieukost. Ook de EPS-isolatie heeft volgens TOTEM een technische levensduur van slechts 40 jaar en zal een vervanging ondergaan.

*De totale milieu-impact van het ETICS-systeem resulteert in een milieukost van 8,86 euro per functionele eenheid.*

## 2.2.1.2 HOUTSKELET

Een volgend gevelrenovatiesysteem dat veel toepassingen kent in de renovatiesector is houtskeletbouw. Hierin kunnen verschillende types herkend worden maar deze analyse zal zich beperken tot de geprefabriceerde houtskeletpanelen.

Systeembouw

Nr.	Materiaal	Dikte [m]	$\lambda$ -waarde [W/m.K]	Levensduur [jaar]	Milieukost [%]
C1	Vezelcement golfplaten, geschroefd	0,007	0,370	>60	15
C2	Naaldhout lattenwerk (38x38, h.o.h. 600mm)	0,038	/	30	4
C3	Gebitumineerde houtvezelplaat, geschroefd	0,018	0,070	>60	11
C4a	[10%] FJI profielen, gelamineerd hout – OSB	0,170	0,130	>60	31
C4b	[90%] Thermisch isolatiedeken, Rotswol	0,170	0,036	>60	10
C5	OSB-plaat, geschroefd	0,012	0,250	>60	11
C6	Naaldhout lattenwerk (38x38, h.o.h. 600mm)	0,038	/	30	4
C7	Gipspleister beplating, geschroefd	0,013	0,250	30	14
Totale milieukost van de materialen: 8,64€/FE Milieukost bevestiging panelen: 1,52€/FE					

Tabel 4: Milieukostberekening gesloten houtskelet-skeletstructuur via TOTEM

De opbouw van het houtskeletstelsel, weergegeven in Tabel 4, bestaat uit een draagstructuur opgesteld uit samengestelde houten I-liggers waartussen rotswol geplaatst is. Aan de buitenzijde bevindt zich een afwerking met een waterdichte houtvezelplaat. Voor de gevelafwerking is er een verticale lattenstructuur uit naaldhout voorzien waarop verschillende materialen bevestigd kunnen worden. Zoals eerder aangegeven wordt als gevelafwerking gekozen voor het materiaal met de kleinste milieu-impact, wat in dit geval resulteert in golfplaten uit vezelcement (TOTEM, 2021). De binnenzijde wordt afgewerkt met een elektrospouw en een gipskartonplaat.

In de 'Retrofitting with AIMES'-gids worden verschillende voorbeelden van de types houtskeletpanelen, die een toepassing kennen in een renovatieproject, besproken (Dubois, Remy, & de Bouw, 2016). Het prefab paneel (Figuur 11) wordt enerzijds bevestigd op de draagstructuur en anderzijds op de andere panelen aangesloten. In deze analyse zal gebruik gemaakt worden van een ophangstelsel waarbij de onderkant van elk paneel aansluit in een voorziene uitsparing in het onderliggende paneel en de bovenkant wordt opgehangen via ankers. De aansluiting tussen prefab panelen onderling moet lucht- en/of waterdicht afgewerkt worden in de mate van het mogelijke. Om deze reden is het niet altijd vanzelfsprekend om de gevelafwerking al bij de plaatsing op het paneel te hebben bevestigd.



Figuur 11: Opbouw gesloten houtskeletpaneel (TimBecoWoodhouse,2021)

### Milieu-impact

In Tabel 4 wordt duidelijk dat de grootste milieu-impact wordt veroorzaakt door de FJI-profielen. Daarnaast hebben de vezelcementplaten, de beplating (OSB langs de binnenkant en de waterdichte houtvezelplaat langs buiten), de cellulose isolatie en de gipskartonplaten langs de binnenzijde een beduidend aandeel in de totale milieukost. In vergelijking met het ETICS-systeem valt hier ook meteen op dat het aandeel van thermische isolatie bijzonder laag ligt. Alle materialen, behalve het houten lattenwerk en de gipsplaten hebben een levensduur van meer dan 60 jaar.

Om de verankering van de module in rekening te brengen is in TOTEM een aluminium anker, met afmetingen 40x60x2 mm die om de 1200 mm geplaatst wordt, toegevoegd. Dit is een zeer voorzichtige aanname aangezien er mogelijkheden zijn om de panelen met minder materialen te bevestigen. Dit zorgt voor een bijkomende milieukost van 1,52 euro per functionele eenheid die voor de panelen in rekening gebracht moet worden.

*Het volledige systeem resulteert in een milieukost van 8,64 (+1,52) euro per functionele eenheid.*

### 2.2.1.3 SANDWICHPANEEL

Het volgende systeem bestaat uit een sandwichpaneel dat voornamelijk zijn toepassing kent in de industriebouw. De keuze voor dit gevelsysteem hangt samen met het geloof dat atypische vormen van bouwen opportuniteiten voor circulariteit kunnen bevatten.

#### Systeemopbouw

Nr.	Materiaal	Dikte [m]	$\lambda$ -waarde [W/m.K]	Levensduur [jaar]	Milieukost [%]
C1a	Staalplaat, gelijmd	0,0006	/	>60	48
C1b	Rotswol, gelijmd	0,1500	0,036	>60	4
C1c	Staalplaat, gelijmd	0,0006	/	>60	48
Totale milieukost van de materialen: 19,16 €/FE					

Tabel 5: Milieukostberekening Sandwichpaneel-skeletstructuur via TOTEM

Het sandwichpaneel dat zich standaard in TOTEM bevindt is opgebouwd uit rotswolisolatie afgewerkt door 2 stalen platen, zoals weergegeven in Tabel 5. De verbinding tussen de verschillende lagen in het paneel onderling is dit geval gelijmd.

Dit systeem wordt op de werf geleverd als paneel en sluit daarbij aan bij de prefabricatielogica van de eerder besproken houtskeletsystemen. De aansluitingen tussen de sandwichpanelen zijn zeer herkenbaar en zodanig ontworpen dat met relatief weinig moeite en kennis de panelen vlot verbonden kunnen worden. Deze worden idealiter verkregen via een verdoken geschroefde verbinding of zijn geïntegreerd in het plaatprofiel. Een nadeel van sandwichpanelen zijn de beperkingen in beschikbare paneelafmetingen (Kingspan, 2021). Op Figuur 12 wordt de plaatsing van een sandwichpaneel met een kraan weergegeven.



Figuur 12: Montage sandwichpaneel (Parocpanels,2021)

### Milieu-impact

Bij een analyse van de aandelen in de milieukost per materiaal, weergegeven in Tabel 5, wordt duidelijk dat het staal verantwoordelijk is voor de grootste milieukost. De staalplaatdikte zet dit cijfer in perspectief aangezien deze slechts 0,6mm bedraagt. Het sandwichpaneel heeft een technische levensduur van meer dan 60 jaar.

*De totale milieukost van het volledige systeem bedraagt 19,16 euro per functionele eenheid.*

#### 2.2.1.4 GORDIJNGEVEL

Het laatste gevelsysteem komt uit de vliesgevelbouw en kent een geheel andere aanpak. In een eerste fase wordt een ladderstructuur geplaatst waarin vervolgens invulpanelen geklemd worden. De gordijngewel, een voorbeeld van vliesgevelbouw, is in deze vergelijking betrokken in de overtuiging om circulariteit te benaderen vanuit een andere invalshoek.

### Systeemopbouw

Nr.	Materiaal	Dikte [m]	$\lambda$ -waarde [W/m.K]	Levensduur [jaar]	Milieukost [%]
C1	Aluminium profielen, geschroefd (50 x 2mm)	0,170	/	>60	5
C2a	Aluminium, gelijmd	0,002	/	30	46
C2b	Rotswol, gelijmd	0,165	0,036	30	3
C2c	Aluminium, gelijmd	0,002	/	30	46
Totale milieukost van de materialen: 29,43€/FE					

Tabel 6: Milieukostberekening Gordijngewel-skeletstructuur via TOTEM

De opbouw, zoals weergegeven in Tabel 6, is een gordijngewelsysteem dat voorgedefinieerd is in TOTEM. Om op een conforme manier te vergelijken met de andere gevelsystemen wordt het glas uit de vergelijking gehaald. De invulpanelen, zoals ze terug te vinden zijn in de TOTEM, zijn beperkt op vlak van dikte en worden bijgevolg aangevuld met een laag rotswolisolatie om de vooropgestelde U-



Figuur 13: Montage gordijngewel met glas en invulpanelen (Rockwool, 2021)

waarde te bekomen. De invulpanelen zijn samengesteld uit een aluminium afwerking verlijmt op rotswol isolatie.

Figuur 13 toont de opbouw van een gordijngewel waar het glas al geklemd zit in de structuur maar de invulpanelen nog afgewerkt moeten worden langs de buitenzijde. De structuur, gevormd door verticale en horizontale stijlen, zorgt voor de basis waartegen het glas-of invulpaneel bevestigd kan worden met een klemlijst langs de buitenzijde. De structuur van het gordijngewelsysteem wordt ter hoogte van de vloerplaten bevestigd aan de draagstructuur van het gebouw zelf (Fassada, 2021).

### Milieu-impact

Zoals weergegeven in Tabel 6 zijn de invulpanelen verantwoordelijk voor 95% van de totale milieukost en de aluminium profielen van de draagstructuur voor 5%. Dit is te wijten aan de continue invulling met panelen en de draagstructuur die zich slechts op bepaalde plaatsen bevindt. Zoals eerder aangehaald zijn ook de invulpanelen gedefinieerd in TOTEM en kunnen deze niet aangepast worden. Dit zorgt ervoor dat de afwerking die nu gebruikt is bestaat uit aluminium aan binnen- en buitenzijde, wat niet de afwerking is met de laagste milieu-impact. Dit gaat in tegen het eerder besproken principe dat voor systemen met veel afwerkingsmogelijkheden de afwerking met de laagste milieu-impact meerekent. Er moet dus rekening me gehouden worden dat de keuze van binnen-en buitenafwerking bij dit systeem een nadelig effect heeft op de totale milieu-impact van het systeem. Deze invulelementen kunnen benaderd worden als sandwichpanelen, maar verschillen in de wijze van waterdichting: bij het gordijngewelsysteem zorgt de inklemming voor de voornaamste waterdichting en afsluiting van de voegen.

*De milieu-impact van het volledige systeem is grotendeels te wijten aan het invulpaneel en veroorzaakt een totale milieukost van 29,43 euro per functionele eenheid.*

## 2.2.2 VERGELIJKING GEVELRENOVATIESYSTEMEN

In Tabel 7 wordt de totale milieu-impact van de verschillende systemen met elkaar vergeleken. Uit deze vergelijking wordt duidelijk dat het sandwichpaneel en de gordijngewel een opmerkelijk hogere milieukost hebben dan de andere systemen. Het houtskeletstelsel scoort het beste maar krijgt door de prefab uitvoering een bijkomende kost voor bevestiging, wat ervoor zorgt dat het ETICS-systeem er globaal als beste uitkomt.

<i>Systeem</i>	<i>Milieukost Materialen (€/FE)</i>
<i>ETICS</i>	8,86
<i>Houtskelet</i>	8,64 (+1,52)
<i>Sandwichpaneel</i>	19,16
<i>Gordijngewel</i>	29,43

Tabel 7: Milieukost materialen per systeem in categorie 1 via TOTEM

### 2.2.3 CATEGORIE 2: MASSIEFBOUW

In deze tweede categorie worden de gevelsystemen aan een massieve draagstructuur onderworpen en opnieuw geanalyseerd. De massiefbouw werd eerder besproken in hoofdstuk 1.2.1.1. en zal verder in deze masterproef meegenomen worden. Een bestaande draagmuur geeft namelijk een eenduidige randvoorwaarde die toelaat te focussen op het toevoegen van isolatiemateriaal en een gevelafwerking, wat de essentie vormt van dit onderzoek. Concreet wordt er in deze categorie vanuit gegaan dat de systemen gedragen kunnen worden door de bestaande massieve draagstructuur. Per gevelsysteem zullen verschillen met de eerste categorie (skeletstructuur) besproken worden.

#### 2.2.3.1 ETICS

##### Systeemopbouw

Nr.	Material	Dikte [m]	$\lambda$ -waarde [W/m.K]	Levensduur [jaar]	Milieukost [%]
C1	Traditionele gipspleister	0,007	/	40	37
C2	EPS-beplating (met pluggen en lijm)	0,150	0,037	40	63
Totale milieukost van de materialen: 4,55€/FE					

Tabel 8: Milieukostberekening ETICS-massiefbouw via TOTEM

Zoals weergegeven in Tabel 8 verliest het ETICS-systeem een groot deel van zijn opbouw in vergelijking met de skeletstructuur: de snelbouwsteen die nodig was in de vorige categorie kan hier achterwege gelaten worden. In dit ETICS-systeem hangt de thermische schil vast aan de bestaande draagstructuur en biedt deze tegelijk 'structuur' voor de gevelafwerking. De bevestiging van de EPS op de bestaande draagstructuur kan op dezelfde manier verlopen zoals in de eerste categorie. Bij renovatie kan het bestaande binnenspouwblad oneffenheden bevatten, wat voor moeilijkheden kan zorgen bij het bevestigen van de EPS-platen op de draagstructuur. Wanneer dit probleem zich voordoet, kan geadapted worden om een adaptatielaag uit rotswol toe te passen of het binnenspouwblad vlak te maken via een latten- en plaatwerk uit hout. Voor deze analyse wordt van uitgegaan dat de plaatsing van de isolatielaag kan gebeuren zonder deze toevoegingen.

##### Milieu-impact

In Tabel 8 wordt duidelijk dat de totale milieukost van het geheel opmerkelijk daalt ten opzichte van de configuratie in categorie 1. De isolatie is nu verantwoordelijk voor het grootste deel van de milieukost.

*De totale milieukost daalt van 8,86 euro in categorie 1 tot 4,55 euro per functionele eenheid in deze categorie.*



### 2.2.3.2 HOUTSKELET

Met een bestaande draagstructuur kan binnen de houtskeletsystemen het onderscheid gemaakt worden tussen twee courant gebruikte types prefab panelen: het gesloten en het open houtskeletpaneel. Zoals de naam impliceert zit het onderscheid in de aansluiting op de bestaande draagmuur (Figuur 14).



Figuur 14: Open houtskeletpaneel (links) en gesloten houtskeletpaneel (rechts) (PRO3, 2017)

Het open houtskeletpaneel wordt in deze analyse opgevat als een lichte opbouw die na plaatsing wordt vol geblazen met cellulose-isolatie. Op deze manier worden de oneffenheden in de draagstructuur opgevangen en ontstaat een continue isolatielaag. Bij het gesloten houtskeletstelsel wordt gekozen om het geheel te isoleren met rotswol. Bijkomend bevindt zich aan de achterkant van het paneel een adaptatielaag. Deze laag bestaat uit samendrukbare rotswol en heeft als functie de oneffenheden in de draagstructuur op te vangen. De voornaamste eigenschappen van beide systemen staan hieronder opgesomd (AIMES, 2016; Maroy, Decorte, Steeman en Van Den Bossche, 2017; TOTEM, 2021):

Open houtskeletpaneel:

- Samendrukbaar isolatiemateriaal vult de ongelijkheden van de draagstructuur op
- Slechts één plaat verzorgt stijfheid van het systeem
- Niet luchtdicht op zich, toevoeging dampscherm is gunstiger voor de luchtdichtheid
- Lagere milieukost aangezien minder materialen

Gesloten houtskeletpaneel:

- Adaptatielaag met samendrukbaar isolatiemateriaal om ongelijkheden van de draagstructuur op te vangen
- Risico op degradatie van de ingesloten plaat
- Plaat met hoge dampdichtheid kan in opbouw worden opgenomen
- Hogere milieukost aangezien meer materialen

## GESLOTEN HOUTSKELET

Systeemopbouw

Nr.	Materiaal	Dikte [m]	$\lambda$ -waarde [W/m.K]	Levensduur [jaar]	Milieukost [%]
C1	Vezelcement golfplaten, geschroefd	0,007	0,370	>60	20
C2	Naaldhout lattenwerk (38x38, h.o.h. 600mm)	0,038	/	30	5
C3	Gebitumineerde houtvezelplaat, geschroefd	0,018	0,070	>60	15
C4a	[10%] FJI profielen, gelamineerd hout – OSB	0,130	0,130	>60	33
C4b	[90%] Thermisch isolatiedeken, Rotswol	0,130	0,036	>60	10
C5	OSB-plaat, geschroefd	0,012	0,250	>60	14
C6	Thermisch isolatiedeken, Rotswol	0,030	0,036	>60	3
Totale milieukost van de materialen: 6,46€/FE Milieukost bevestiging panelen: 1,52€/FE					

Tabel 9: Milieukostberekening gesloten houtskelet-massiefbouw via TOTEM

Zoals eerder besproken, bevindt zich in deze opbouw (Tabel 9) de bijkomende adaptatielaag in rotswol. In vergelijking met de skeletstructuur uit de eerste categorie zijn de elektrospouw en binnenafwerking niet meer van toepassing.

Milieu-impact

Door de binnenafwerking die in deze categorie niet meer van toepassing is, daalt de milieukost. De vezelcement platen en FJI-profielen zorgen voor het grootste aandeel in deze milieukost (Tabel 11). Opnieuw zorgt het bevestigingssysteem van de prefab panelen voor een bijkomende milieukost. De materialen in deze opbouw hebben een technische levensduur langer dan 60 jaar, behalve het houten lattenwerk dat slechts 30 jaar meekan.

*De totale milieukost daalt van 8,64 (+1,52) euro in categorie 1 tot 6,46 (+1,52) euro per functionele eenheid in deze categorie.*

## OPEN HOUTSKELET

Systeemopbouw

Nr.	Materiaal	Dikte [m]	$\lambda$ -waarde [W/m.K]	Levensduur [jaar]	Milieukost [%]
C1	Vezelcement golfplaten, geschroefd	0,007	0,370	>60	27
C2	Naaldhout lattenwerk (38x38, h.o.h. 600mm)	0,038	/	30	7
C3	Gebitumineerde houtvezelplaat, geschroefd	0,018	0,070	>60	20
C4a	[10%] FJI profielen, gelamineerd hout – OSB	0,180	0,130	>60	40
C4b	[90%] Cellulose isolatie, ingeblazen	0,180	0,039	>60	6
Totale milieukost van de materialen: 4,81€/FE Milieukost bevestiging panelen: 1,52€/FE					

Tabel 10: Milieukostberekening open houtskelet-massiefbouw via TOTEM

Dit open houtskeletstelsel werd initieel ontwikkeld voor renovatietoepassingen (Dubois, Remy, & de Bouw, 2016). Op Tabel 10 is de opbouw van het systeem met een open binnenzijde weergegeven. Zoals eerder aangehaald stelt deze open achterkant het systeem in staat om oneffenheden in de bestaande draagmuur op te vangen. De cellulosevezels worden op de site ingeblazen door voorge maakte openingen in de panelen, zoals weergegeven op Figuur 15. Dit isolatiemateriaal heeft echter als nadeel dat het zeer gevoelig is aan vocht en brand (Dubois, Remy, & de Bouw, 2016) en dat er onzekerheid bestaat over uitzakken van de vezels na verloop van tijd wat ook het geval kan zijn voor andere types inblaasisolatie (Accurate Insulation, 2018). De prefab panelen moeten ten opzichte van elkaar gesloten zijn om de inblaasisolatie per paneel te kunnen verdelen. Hierdoor wordt vermeden dat er bij afhankelijk van de bouwhoogte te grote drukken ontstaan onderaan in de gevel.



Figuur 15: Opbouw open houtskeletpaneel (Dupac,2021)

### Milieu-impact

In Tabel 10 wordt duidelijk dat het grootste aandeel van de milieukost zich terug bij de draagstructuur (FJI-liggers) en beplating bevindt. Opvallend hier is dat de isolatie het kleinste aandeel (slechts 6%) veroorzaakt van de totale milieukost. Opnieuw zorgt het bevestigingssysteem van de prefab panelen voor een bijkomende milieukost.

De totale milieukost van dit open houtskeletpaneel is 4,81 (+1,52) euro per functionele eenheid in deze categorie.

#### 2.2.4 VERGELIJKING GEVELRENOVATIESYSTEMEN

Stelsel	Milieukost materialen (€/FE)
ETICS	4,55
Gesloten houtskelet	6,46 (+1,52)
Open houtskelet	4,81 (+1,52)
Sandwichpaneel	19,16
Gordijngevel	29,43

Tabel 11: Milieukost materialen per systeem in categorie 2 via TOTEM

In Tabel 11 wordt de totale milieu-impact van de verschillende systemen met elkaar vergeleken. Opnieuw scoort het ETICS-systeem het laagst op vlak van milieukost. Het onderscheid tussen open en gesloten houtskeletpaneel bevestigt opnieuw dat minder materialen gebruiken hier de meest voor de hand liggende manier is om de milieukosten te reduceren. Het sandwichpaneel en de gordijngevel liggen in een totaal verschillende grootteorde. Verder wordt gedetailleerd bekeken hoe de milieukost per systeem verdeeld is over volgende categorieën: gevelafwerking, isolatie en structuur.

### Gevelafwerking

Stelsel	Gevelafwerking	Milieukost (€/FE)
ETICS	Buitenpleister	1,70
Gesloten houtskelet	Vezelcement golfplaten en lattenwerk	1,30 + 0,33
Open houtskelet	Vezelcement golfplaten en lattenwerk	1,30 + 0,33
Sandwichpaneel	Verlijmde staalplaat	9,19
Gordijngevel	Verlijmde aluminiumplaat	13,50

Tabel 12: Milieukost materialen gevelafwerking via TOTEM

Op basis van Tabel 12 kan geconcludeerd worden dat over een periode van 60 jaar de vezelcementplaat met lattenwerk de laagste milieukost veroorzaakt. De buitenpleister heeft een hogere milieukost maar de levensduur van 40 jaar zorgt voor een vervanging. De vergelijking tussen staal en aluminium toont dat staal in dit geval de betere optie is. Dit is onder meer te wijten aan de technische levensduur van de materialen: aluminium heeft in de gordijngevel een technische levensduur van 30 jaar en staal in het sandwichpaneel 60 jaar.

Isolatie

<i>Systeem</i>	<i>Isolatie</i>	<i>Milieukost (€/FE)</i>
<i>ETICS</i>	EPS, gelijmd en gefixeerd met pluggen [15 cm]	2,86
<i>Gesloten houtskelet</i>	Rotswol, geklemd [13+3 cm]	0,86
<i>Open houtskelet</i>	Cellulose, ingeblazen [18 cm]	0,29
<i>Sandwichpaneel</i>	Rotswol [15 cm]	0,80
<i>Gordijngevel</i>	Rotswol [16,5 cm]	0,88

Tabel 13: Milieukost materialen thermische isolatie via TOTEM

Uit de vergelijking in Tabel 13 wordt duidelijk dat de EPS-isolatie een aanzienlijk hogere milieukost heeft dan de andere materialen. Dit is onder andere te wijten aan de bevestigingswijze, deze wordt namelijk verlijmd en via isolatiepluggen gefixeerd wat voor een bijkomende milieukost zorgt. Daarbovenop heeft EPS als enige materiaal in deze vergelijking een technische levensduur korter dan 60 jaar, waardoor een vervanging noodzakelijk is. Er zijn redelijk wat systemen die rotswol gebruiken maar telkens met een andere dikte en anders bevestigd. Bij het gesloten houtskeletstelsel wordt de rotswol geklemd, bij de gordijngevel en het sandwichpaneel gelijmd. In deze analyse is de verlijming meegerekend bij de materialen die erop bevestigd worden: aluminium en staalplaten.

Structuur

<i>Systeem</i>	<i>Structuur</i>	<i>Milieukost (€/FE)</i>
<i>ETICS</i>	EPS	2,86
<i>Gesloten houtskelet</i>	Houten I-liggers, OSB en houtvezelplaat	2,00 + 1,00 + 1,00
<i>Open houtskelet</i>	Houten I-liggers en houtvezelplaat	2,00 + 1,00
<i>Sandwichpaneel</i>	Volledige paneel	19,16
<i>Gordijngevel</i>	Aluminium draagstructuur	1,5

Tabel 14: Milieukost materialen draagstructuur via TOTEM

De draagstructuur van de verschillende systemen wordt in Tabel 14 vergeleken. De houtvezelplaat die nodig is bij de houtskeletsystemen doet niet alleen dienst als draagstructuur, maar vormt tegelijk ook de waterdichting. De gordijngevel heeft een duidelijke structuur waarin de invulpanelen geklemd worden. De eigen structuur van de invulpanelen wordt in deze tabel niet opgenomen. Het sandwichpaneel komt volledig voor in deze tabel aangezien de structuur bekomen wordt door het verlijmen van de 3 lagen. Ook voor het ETICS-systeem kan de structuur samenvallen met een andere laag, in dit geval de EPS-isolatie. Voor de houtskeletpanelen is de milieukost van de ankers niet aanwezig wat voor een bijkomende 1,52 euro per functionele eenheid zorgt. Opvallend is dat deze ankers in aluminium een hogere milieukost bevatten dan de draagstructuur van het gordijngevelsysteem. Dit heeft betrekking op de maatvoering van beide systemen: voor de gordijngevel zal een grotere tussenmaat gehanteerd zijn dan voor de houtskeletankers. Deze gedetailleerde analyse toont de beperkingen van het onderling vergelijken van bepaalde materialen via TOTEM.

## 2.3 CONCLUSIE

De gevelsystemen werden in dit hoofdstuk geanalyseerd aan de hand van milieukost. Ze werden getoetst aan twee types draagstructuur: een skeletstructuur en een massiefbouw. Hierdoor werd duidelijk dat massiefbouw de beste manier was om de essentie van elk gevelsysteem te vergelijken. De systemen kunnen daarbovenop eenvoudig aangepast worden naar skeletbouw. De massiefbouw wordt bijgevolg verder meegenomen in deze masterproef.

Het ETICS-systeem bevat onder andere door een beperkt aantal materiaallagen de laagste milieukost. De houtskeletsystemen volgen op de voet met de open variant iets beter dan de gesloten. Het sandwichpaneel en de gordijngewel zitten in een geheel andere categorie aangezien hun kost het respectievelijk twee- en drievoud benadert van hun voorgangers.

In deze analyse kwamen verschillende eigenschappen naar boven die tonen dat circulariteit anders benaderd kan worden dan louter via milieukost. Enkele voorbeelden hiervan zijn: (1) de manier waarop de materialen verbonden zijn (vb. gelijmde isolatielaag bij het ETICS-systeem) en (2) de levensduren van de materialen en de nood voor vervanging (vb. de pleisterlaag bij het ETICS-systeem). Deze vergelijking toont dat milieukost alleen niet voldoende is om circulariteit te beoordelen. Bijgevolg zal er in het volgende hoofdstuk verder gekeken worden dan uitsluitend de milieukost.

### 3 CIRCULARITEITSBEOORDELING BESTAANDE GEVELRENOVATIESYSTEMEN

Nadat de gevelrenovatiesystemen geanalyseerd werden in het vorige hoofdstuk, zullen ze hier beoordeeld worden op vlak van circulariteit. Met behulp van een circulariteitsbeoordeling zullen de sterke en zwakke punten van de verschillende systemen in kaart gebracht worden. Er wordt onderzocht hoe de deze scores vertaald kunnen worden in circulaire principes.

#### 3.1 ONDERZOEKSMETHODE

De 'Circulariteitsbeoordelingsmethode voor gevelsystemen' (Van Gulk, Leenknecht, & Debusseré, 2020) is ontwikkeld in het kader van het EURECA-project. Deze beoordelingsmethode, eerder aangehaald in hoofdstuk 1.1.2.2, zal in dit onderzoek gebruikt worden om de verschillende gevelsystemen uit de tweede categorie massiefbouw te beoordelen op vlak van circulariteit. Op die manier kan er een sterkte/zwakte- analyse uitgevoerd worden voor de systemen. De methode is gebaseerd op 7 parameters die afzonderlijk zullen worden beoordeeld, en hoe lager de score hoe meer circulair het systeem wordt geacht. De parameters zijn recyclage, milieukost, verwachte levensduur, componentafhankelijkheid, laagafhankelijkheid, flexibiliteit voor hergebruik en expertise. Deze laatste parameter was niet aanwezig in de initiële methode van Van Gulk, Leenknecht en Debusseré (2020), maar werd in dit onderzoek bijgevoegd.

##### RECYCLAGE (%)

Aan de hand van deze parameter wordt rekening gehouden met de gerecycleerde inhoud en het recyclagepercentage van een materiaal. Dit wordt bepaald via de materiaalhergebruiksscore (%), die door NIBE werd ontwikkeld (NIBE, 2021).

$$\text{Recyclage} = 100\% - \text{materiaalhergebruikswaarde in NIBE}$$

De materiaalhergebruikswaarde kan op de website van NIBE geraadpleegd worden of wordt bepaald door 1/3<sup>de</sup> van de gerecycleerde inhoud in rekening te brengen en 2/3<sup>de</sup> het recyclagepercentage van een materiaal. De gerecycleerde inhoud of 'recycled content' (RC) is de hoeveelheid gerecycleerd materiaal die gebruikt wordt bij de productie en kan vaak teruggevonden worden in de technische fiches. Het recyclagepercentage 'recycling rate' (RR) van een materiaal is de hoeveelheid die na gebruik van een materiaal gerecycleerd kan worden en wordt bepaald volgens het document 'Environmental profile of building elements' (Allacker & Debacker, Environmental profile of building elements, 2020).

##### MILIEUKOST (€/M<sup>2</sup>)

Het milieueffect van een gevelsysteem wordt weergegeven in deze parameter. Zoals eerder beschreven wordt deze milieukost berekend via een LCA in TOTEM (hoofdstuk 1.1.3) en wordt hierin een onderscheid gemaakt tussen de operationele energie en de ingebedde energie van de materialen. Voor deze methode wordt enkel rekening gehouden met de milieukosten van de ingebedde energie van de materialen. De milieukosten van de geanalyseerde systemen werden eerder berekend in hoofdstuk 2.2.4.

### VERWACHTE LEVENSDUUR (JAAR)

Deze parameter houdt rekening met de circulaire principes 'duurzame materialen' (lange levensduur) en 'gelaagdheid volgens levensduur' zoals beschreven volgens de '24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen' (hoofdstuk 1.1.2.1). De verwachte levensduur van bouwmaterialen is gebaseerd op 'Rapport Technische levensduur van Gebouwcomponenten' (Vandenbroucke, 2018), maar werd kritisch geanalyseerd en aangepast indien nodig. De gebruikte levensduren van de materialen die aan bod komen in dit onderzoek staan in bijlage 1. De waarde van de parameter wordt als volgt bepaald:

$$\text{Verwachte levensduur} = 100 - \text{verwachte levensduur van het materiaal}$$

Daarbovenop is er de bijkomende regel om de gelaagdheid volgens levensduur mee te rekenen: de technische levensduur van een laag mag niet langer zijn dan die van de vorige (meer interne) laag. De bepaling van de technische levensduur van elke laag dient van binnen naar buiten te gebeuren.

### COMPONENTENAFHANKELIJKHEID (%)

Deze parameter houdt rekening met het principe dat onafhankelijke componenten binnen een laag gemakkelijker vervangen of aangepast kunnen worden, zonder andere componenten te beïnvloeden. De bepaling van de scores voor deze parameter staat weergegeven in Tabel 15.

<i>Componentafhankelijkheid</i>	<i>Score (%)</i>
<i>Volledig onafhankelijk</i>	0
<i>Verwijder aansluitingen om te scheiden (materiaal en connectoren blijven intact)</i>	10-20
<i>Opeenvolgende demontage: alle onderdelen loskoppelen om er een te ontkoppelen.</i>	40-50
<i>Vernietig aansluitingen om te scheiden</i>	60-80
<i>Volledig afhankelijk</i>	100

Tabel 15: Score componentafhankelijkheid

### LAAGAFHANKELIJKHEID (%)

Deze parameter stelt de afhankelijkheid tussen de lagen onderling voor. Hij houdt rekening met het type verbinding tussen de laag en de vorige (meer interne) laag. Dit principe is gebaseerd op het door AlbaConcepts ontwikkelde scoresysteem voor de parameter 'type verbinding' die deel uitmaakt van de Detachability Index (Albaconcepts, 2019). De scores voor deze parameter worden bepaald aan de hand van Tabel 16.



<i>Laagafhankelijkheid</i>		<i>Score (%)</i>
<i>Droge verbinding</i>	Droge verbinding	0
	Klikverbinding	0
	Velcro verbinding	0
	Magnetische verbinding	0
<i>Verbonden met toegevoegde elementen</i>	Bout en moer verbinding	20
	Veerverbinding	20
	Hoekverbinding	20
	Schroefverbinding	20
<i>Geïntegreerde verbinding</i>	Pinverbinding	40
	Nagelverbinding	40
<i>Zachte chemische verbinding</i>	Verbinding met afdichtingsmiddel	80
	Verbinding met schuim	80
<i>Harde chemische verbinding</i>	Lijmverbinding	100
	Cementgebonden verbinding	100
	Chemisch anker	100

Tabel 16: Score laagafhankelijkheid

#### FLEXIBILITEIT VOOR HERGEBRUIK (%)

Deze parameter refereert naar de mogelijkheid om de dimensies van een materiaal aan te passen om het te kunnen hergebruiken in een ander project. De bepaling van de scores voor deze parameter staat weergegeven in Tabel 17.

<i>Flexibiliteit voor hergebruik</i>	<i>Score (%)</i>
<i>Makkelijk aanpasbaar</i>	0-20
<i>Flexibel door kleine afmetingen, maar moeilijk of onmogelijk aan te passen</i>	40
<i>Aanpasbaar door meer complexe/gespecialiseerde acties</i>	50-60
<i>Hergebruik niet mogelijk</i>	100

Tabel 17: Score flexibiliteit voor hergebruik

#### EXPERTISE (%)

Een eigen toevoeging aan de bestaande methode volgens Van Gulck, Leenknecht en Debusseré (2020) bestaat uit de parameter expertise. Deze parameter is gebaseerd op de circulaire principes 'eenvoud' en 'snelheid' die in de '24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen' (OVAM, 2016) werden aangehaald. Aan de hand van het type opbouw wordt een score gegeven die de expertise van de uitvoering (montage en demontage) van het gevelsysteem in kaart brengt.

Deze bijkomende parameter lijkt interessant op vlak van circulariteit, omdat de graad van moeilijkheid of expertise van het systeem beoordeeld wordt vanuit de Belgische context. Haalbare systemen hebben meer potentieel voor hergebruik. Prefab systemen bezitten een beperkte expertise aangezien deze zorgen voor een eenvoudige (de)montage op de site. De scores voor deze parameter worden bepaald aan de hand van Tabel 18.

Om de invloed van deze bijkomende parameter op de resultaten te onderzoeken zal hiervoor een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden.

<i>Expertise</i>		<i>Score (%)</i>
<i>Uitzonderingen</i>	<i>Schadelijke stoffen (vb: chemisch anker)</i>	100
<i>Professioneel nat/erkenning</i>	<i>Dakdichting, storten en cement</i>	60-80
<i>Professioneel droog</i>	<i>Klassieke houtbouw</i>	50
<i>Standaardgereedschap gevorderd</i>	<i>Zwaarder, elektrisch gereedschap</i>	40
<i>Standaardgereedschap basis</i>	<i>Silicone, schroeven, bout en moer (Ikeapakket)</i>	0-20

Tabel 18: Score eenvoud/snelheid

## BEREKENINGSWIJZE

De methode voor de berekening van de scores werd in het kader van deze masterproef aangepast. Bij de parameters expertise en milieukost zal het volledige systeem één algemene score krijgen, zonder de lagen afzonderlijk te beoordelen. Voor de andere parameters zal een algemene score bepaald worden door de verschillende lagen van de opbouw een eigen waarde toe te kennen. Bij de parameters component- en laagafhankelijkheid bestaat deze algemene score uit de som van de afzonderlijke lagen, dit zorgt ervoor dat systemen met veel lagen afgestraft worden. Daarom gebeurt dit enkel bij de parameters die de materiaaleigenschappen specifiek in rekening brengen en zal bij de overige parameters (verwachte levensduur, flexibiliteit voor hergebruik en recyclage) een gewogen gemiddelde op basis van milieukost genomen worden. Om de invloed van deze aanpassingen in de berekeningswijze te onderzoeken, zal hiervoor een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden.

Deze algemene score per systeem wordt omgezet in een relatieve waarde per parameter door het gemiddelde van verschillende systemen te nemen. Deze relatieve waarden van de verschillende parameters worden vervolgens bij elkaar opgeteld om de totaalscore te berekenen. Het zou ook mogelijk zijn om de parameters onderling een weging te geven en zo bepaalde circulariteitsparameters zwaarder te laten doorwegen in de berekening. Deze weging heeft echter een subjectief karakter aangezien er geen consensus bestaat over welke parameters precies zwaarder zouden moeten doorwegen en zal om die reden in dit onderzoek niet verder worden toegepast. Door de verschillende parameters eerst afzonderlijk en later als totaalscore in de methode weer te geven, kan duidelijk afgeleid worden in welke aspecten van circulariteit het systeem goed en minder goed scoort. Op die manier helpt deze circulariteitsbeoordelingsmethode om de sterkte en zwakke punten van de systemen in kaart te brengen.

3.2 RESULTATEN

De circulariteitsbeoordelingsmethode wordt in Tabel 19 toegepast in op de systemen die in hoofdstuk 2.2.4 geanalyseerd werden.

Percentage	ETICS zonder draagstructuur	Expertise	Relatief	Recyclage	Relatief	Milieukost	Relatief	Verwachte levensduur	Relatief
0,63	EPS 15cm			97,00				37,00	
0,37	Plaster	60,00		100,00		4,55		70,00	
		60,00	1,11	98,11	1,51	4,55	0,34	49,21	0,99
	<b>Gestloten Houtskelet</b>	<b>Expertise</b>	<b>Relatief</b>	<b>Recyclage</b>	<b>Relatief</b>	<b>Milieukost</b>	<b>Relatief</b>	<b>Verwachte levensduur</b>	<b>Relatief</b>
0,03	Adaptatielaag rotswol			98,00				25,00	
0,14	OSB plaat			70,00				50,00	
0,1	Rotswol			98,00				50,00	
0,32	houten I-profielen draagstructuur			87,00				50,00	
0,15	Gebitumineerde houtvezelplaat			92,00				50,00	
0,05	Naaldhout draagstructuur			50,00				50,00	
0,2	Vezelcement golfplaat	50,00		100,00		7,98		50,00	
		50,00	0,93	86,68	1,33	7,98	0,60	48,75	0,98
	<b>Open houtskelet</b>	<b>Expertise</b>	<b>Relatief</b>	<b>Recyclage</b>	<b>Relatief</b>	<b>Milieukost</b>	<b>Relatief</b>	<b>Verwachte levensduur</b>	<b>Relatief</b>
0,4	houten I-profielen draagstructuur			87,00				29,00	
0,06	Cellulose ingeblazen			73,00				70,00	
0,2	Gebitumineerde houtvezelplaat			92,00				70,00	
0,07	Naaldhout draagstructuur			50,00				70,00	
0,27	Vezelcement golfplaat	50,00		100,00		6,33		70,00	
		50,00	0,93	88,08	1,35	6,33	0,47	53,60	1,08
	<b>Gordijngevel</b>	<b>Expertise</b>	<b>Relatief</b>	<b>Recyclage</b>	<b>Relatief</b>	<b>Milieukost</b>	<b>Relatief</b>	<b>Verwachte levensduur</b>	<b>Relatief</b>
0,05	Draagstructuur aluminium			22,00				25,00	
0,4655	Aluminium plaat			22,00				56,00	
0,019	Rotswol - invulpaneel			98,00				56,00	
0,4655	Aluminium plaat	70,00		22,00		28,64		63,00	
		70,00	1,30	23,44	0,36	28,64	2,15	57,71	1,16
	<b>Sandwichpaneel</b>	<b>Expertise</b>	<b>Relatief</b>	<b>Recyclage</b>	<b>Relatief</b>	<b>Milieukost</b>	<b>Relatief</b>	<b>Verwachte levensduur</b>	<b>Relatief</b>
0,49	Staalplaat			28,00				40,00	
0,02	Rotswol			100,00				40,00	
0,49	Staalplaat	40,00		28,00		19,16		40,00	
		40,00	0,74	29,44	0,45	19,16	1,44	40,00	0,80

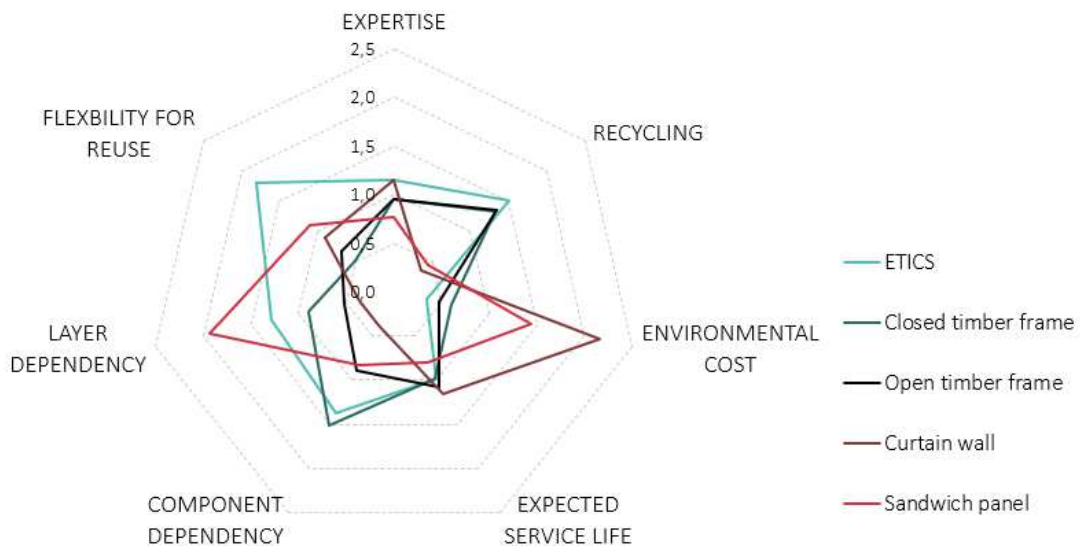
Percentage	ETICS zonder draagstructuur	Componentafhankelijkheid	Relatief	Laagafhankelijkheid	Relatief	Flexibiliteit voor hergebruik	Relatief	Totaal	
0,63	EPS 15cm	100,00		100,00		100,00			
0,37	Plaster	100,00		100,00		100,00			
		200,00	1,38	200,00	1,29	100,00	1,81	8,42	1,20
	<b>Gestloten Houtskelet</b>	<b>Componentafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Laagafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Flexibiliteit voor hergebruik</b>	<b>Relatief</b>	<b>Totaal</b>	
0,03	Adaptatielaag rotswol	50,00		20,00		20,00			
0,14	OSB plaat	50,00		20,00		20,00			
0,1	Rotswol	40,00		20,00		0,00			
0,32	houten I-profielen draagstructuur	40,00		20,00		20,00			
0,15	Gebitumineerde houtvezelplaat	50,00		40,00		50,00			
0,05	Naaldhout draagstructuur	20,00		20,00		20,00			
0,2	Vezelcement golfplaat	10,00		20,00		50,00			
		220,00	1,52	140,00	0,90	28,30	0,51	6,77	0,97
	<b>Open houtskelet</b>	<b>Componentafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Laagafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Flexibiliteit voor hergebruik</b>	<b>Relatief</b>	<b>Totaal</b>	
0,4	houten I-profielen draagstructuur	40,00		20,00		20,00			
0,06	Cellulose ingeblazen	50,00		0,00		80,00			
0,2	Gebitumineerde houtvezelplaat	50,00		40,00		50,00			
0,07	Naaldhout draagstructuur	20,00		20,00		20,00			
0,27	Vezelcement golfplaat	10,00		20,00		50,00			
		129,00	0,89	82,00	0,53	37,70	0,68	5,93	0,85
	<b>Gordijngevel</b>	<b>Componentafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Laagafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Flexibiliteit voor hergebruik</b>	<b>Relatief</b>	<b>Totaal</b>	
0,05	Draagstructuur aluminium	10,00		20,00		60,00			
0,4655	Aluminium plaat	10,00		20,00		50,00			
0,019	Rotswol - invulpaneel	40,00		20,00		0,00			
0,4655	Aluminium plaat	10,00		20,00		50,00			
		54,38	0,38	55,50	0,36	49,55	0,90	6,59	0,94
	<b>Sandwichpaneel</b>	<b>Componentafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Laagafhankelijkheid</b>	<b>Relatief</b>	<b>Flexibiliteit voor hergebruik</b>	<b>Relatief</b>	<b>Totaal</b>	
0,49	Staalplaat	40,00		100,00		60,00			
0,02	Rotswol	40,00		100,00		100,00			
0,49	Staalplaat	40,00		100,00		60,00			
		120,00	0,83	300,00	1,93	60,80	1,10	7,29	1,04

Tabel 19: Toepassing circulariteitsbeoordelingsmethode op de geanalyseerde systemen

In Tabel 20 staan de totaalscores van de systemen naast elkaar weergegeven en op Figuur 16 worden de systemen met elkaar vergeleken in een spindigram. Daaruit blijkt dat het open houtskeletpaneel volgens deze circulariteitsbeoordelingsmethode het meest circulaire systeem is, met op een tweede plaats de gordijngewel, nipt gevolgd door het gesloten houtskeletstelsel. Het sandwichpaneel behaalt een matige score en het ETICS-systeem behaalt de hoogste en dus minst goede score. In wat volgt zullen de verschillende parameters van de gevelsystemen onderzocht worden en wordt gezocht naar mogelijkheden om vlak van circulariteit.

System	Absolute totaalscore	Relatieve totaalscore
ETICS	8,42	120 %
Gesloten houtskelet	6,77	97 %
Open houtskelet	5,93	85 %
Gordijngewel	6,59	94 %
Sandwichpaneel	7,29	104 %

Tabel 20: Totaalscore circulariteitsbeoordelingssysteem



Figuur 16: Spindigram circulariteitsbeoordelingsmethode

### 3.2.1 ETICS

#### Sterkte: Lage milieukost

Het ETICS-systeem gebruikt zeer weinig materiaal wat resulteert in een lage milieukost per functionele eenheid. Dit is onder andere te wijten aan de overlap in de functies van de verschillende materiaallagen, waardoor er minder lagen (en minder materialen) nodig zijn om het gevelsysteem te realiseren. De overlap in functies uit zich in de pleisterlaag die tegelijk dienstdoet als waterdichting en gevelafwerking. De EPS-isolatie heeft naast de isolatiepluggen geen bijkomende draagstructuur wegens een laag eigengewicht en een grote stijfheid (Gregoire, Dirx, & Smits, 2016). Dit principe van efficiënt materiaalgebruik kan verder gebruikt worden bij de zoektocht naar een circulaire variant.

#### Sterkte: Lagen volgens levensduur

De circulariteitsbeoordelingsmethode maakt duidelijk dat het ETICS-systeem geen lagen met een korte technische levensduur insluit door lagen met een langere levensduur. Dit stelt elk materiaal in staat zijn maximale technische levensduur te bereiken.

#### Zwakte: Component- en laagafhankelijkheid

De oorzaak van de hoge component- en laagafhankelijkheid ligt in het feit dat de verschillende lagen van het systeem aan elkaar gelijmd worden. Dit uit zich duidelijk in de gevelafwerking van pleister, die rechtstreeks op het isolatiemateriaal wordt aangebracht, met als gevolg dat de pleisterlaag niet kan worden vervangen zonder de EPS-isolatie aan te tasten.

Daarentegen zorgt de pleisterlaag, die op een continue wijze wordt uitgevoerd, ervoor dat de moeilijkheid met bouwfysische aspecten zoals water- en luchtdichte verbindingen van het systeem omzeild worden. Zeker bij circulaire systemen vormen de verbindingen tussen de elementen voor moeilijkheden om de demontebaarheid ervan te verzekeren zonder in te boeten aan water- en luchtdichting.

#### Concepten om mee te nemen:

- Efficiënt materiaalgebruik
- Gelaagdheid volgens levensduur

---

### 3.2.2 OPEN EN GESLOTEN HOUTSKELETSYSTEEM

#### Sterkte: Lage milieukost

De resultaten van het open en gesloten houtskeletsystemen tonen dat beide goed scoren op vlak van de milieukost met een nipte tweede en derde plaats. Dit is te wijten aan het feit dat beide systemen bestaan uit materialen die een kleine impact hebben op het milieu. Door het gebruik van een waterdichte houtvezelplaat als draagstructuur en waterdichting is er bij deze systemen ook sprake van een efficiënt materiaalgebruik.

Sterkte: Laagafhankelijkheid

De opbouw van het systeem met omkeerbare verbindingen (schroeven) tussen de verschillende materiaallagen zorgt voor een goede score voor de laagafhankelijkheid. De materialen van de verschillende lagen kunnen relatief onafhankelijk van elkaar fungeren.

Sterkte: Expertise

Het houtskeletstelsel heeft de mogelijkheid om in paneelvorm geprefabriceerd te worden, wat onder meer zorgt voor een verminderde expertise bij (de)montage.

Sterkte: Flexibiliteit voor hergebruik

Het voornaamste verschil tussen het open en gesloten systeem op vlak van materiaalgebruik bevindt zich in de isolatielaag: het open houtskeletstelsel heeft ingeblazen cellulose isolatie en het gesloten rotswol isolatiedekens. De cellulose isolatie heeft de laagste milieukost maar heeft onzekerheden in verband met hergebruik (hoofdstuk 2.2.3.2). Rotswol en houten elementen hebben beiden meer flexibiliteit voor hergebruik.

Zwakte: Componentafhankelijkheid

Een minder goede parameter bij het gesloten houtskeletsystemen is de componentafhankelijkheid. Deze parameter wordt bepaald door de som te nemen van de verschillende lagen en aangezien dit systeem bestaat uit veel lagen vormt dit bijgevolg een nadeel.

Concepten om mee te nemen:

- Efficiënt materiaalgebruik
- Omkeerbare verbindingen
- Prefabricatie

---

### 3.2.3 GORDIJNGEVEL

Sterkte: Component- en laagafhankelijkheid

Een gordijngesysteem is ontworpen om na verloop van tijd de glas- of invulpanelen te vervangen en bestaat dus voornamelijk uit omkeerbare verbindingen. Deze glas- of invulpanelen worden ingeklemd tussen de hoofdstructuur en de klemlijst van de gordijngesvel. De verschillende elementen van de draagstructuur worden aan elkaar bevestigd met geschroefde verbindingen en de waterkeringen bestaande uit rubbers (Fassada, 2021). Al deze omkeerbare verbindingen tussen de componenten en lagen, zorgen ervoor dat het systeem bijzonder goed scoort op vlak van component- en laagafhankelijkheid

Sterkte: Recyclage

Zwakte: Hoge milieukost

De gordijngesvel heeft een hoge milieukost, wat te wijten is aan de keuze voor een draagstructuur in aluminium. Aluminium heeft een relatief hoge milieu-impact vergeleken met de draagstructuur van andere systemen.

Zwakte: Verwachte levensduur

De verwachte technische levensduur van de materialen die gebruikt zijn in de gordijngewel zijn niet slecht, maar missen de opportuniteit die gepaard gaat met de omkeerbare verbindingen. Deze verbindingen laten namelijk toe dat een materiaal meermaals gebruikt kan worden zolang zijn technische levensduur voldoende blijft. Voor een circulair concept is het ideale scenario dat de materialen omkeerbaar verbonden zijn én een lange technische levensduur hebben. Op die manier kunnen ze voor een lange periode circuleren in de bouwsector.

Concepten om mee te nemen:

- Omkeerbare verbindingen

---

### 3.2.4 SANDWICHPANEEL

Sterkte: Verwachte levensduur

Sterkte: Expertise

Door het gebruik van relatief eenvoudige verbindingen en zijn prefab karakter bekommt dit systeem een hoog 'plug en play' gehalte (NomaCool, 2021).

Zwakte: Laagafhankelijkheid

Zoals eerder aangehaald hebben de materialen die gebruikt zijn in het sandwichpaneel een lange technische levensduur, maar zijn ze zeer moeilijk te hergebruiken. De materialen zijn echter aan elkaar gelijmd wat het niet haalbaar maakt om een materiaal aan te passen zonder de andere materialen te beschadigen.

Zwakte: Milieukost

Ondanks het efficiënte gebruik van materialen bij een sandwichpaneel, heeft deze toch een hoge milieukost. Dit is voornamelijk te wijten aan het gebruik van staalplaten en gelijmde verbindingen.

Concepten om mee te nemen:

- Efficiënt materiaalgebruik
- Hoog 'Plug en play' gehalte

---

### 3.2.5 GEVOELIGHEIDSANALYSES AANPASSINGEN METHODE

#### BEREKENINGSWIJZE

De berekeningswijze van de parameters waar de lagen uit de opbouw samengeteld worden tot de algemene score van de opbouw werd in deze masterproef aangepast. Zoals beschreven in hoofdstuk 3.1, bestaat bij de parameters component- en laagafhankelijkheid de algemene score uit de som van de afzonderlijke lagen, omdat deze parameters de materiaaleigenschappen specifiek in rekening brengen. Bij de overige parameters (verwachte levensduur, flexibiliteit voor hergebruik en recyclage) wordt een gewogen gemiddelde op basis van milieukost genomen. Om de invloed van deze beslissing na te gaan, wordt deze berekeningswijze 'gewogen gemiddelde' vergeleken met 'rekenkundig

gemiddelde' (bij alle parameters wordt het rekenkundig gemiddelde van de lagen genomen) en 'som' (bij alle parameters wordt de som van de lagen genomen), deze laatste methode werd initieel gebruikt bij Van Gulck, Leenknecht en Debusseré.

<i>Systeem</i>	<i>Gewogen gemiddelde</i>	<i>Rekenkundig gemiddelde</i>	<i>Som</i>
<i>ETICS</i>	120 %	141 %	95 %
<i>Gesloten houtskelet</i>	97 %	77 %	119 %
<i>Open houtskelet</i>	85 %	80 %	96 %
<i>Gordijngewel</i>	94 %	95 %	88 %
<i>Sandwichpaneel</i>	104 %	107 %	101 %

Tabel 21: Gevoeligheidsanalyse berekeningswijzen parameters

Uit deze analyse, Tabel 21, blijkt dat de 'som' nadelig is voor de houtskeletsystemen, die uit veel lagen bestaan en zeer voordelig voor het ETICS-systeem, dat slechts uit twee lagen bestaat. Het 'rekenkundig gemiddelde' is daartegenover zeer nadelig voor de ETICS en voordelig voor de houtskeletsystemen. Het 'gewogen gemiddelde', de gehanteerde methode, ligt tussen deze twee extremen in. De invloed van berekeningswijze uit zich minder bij de gordijngewel en het sandwichpaneel. Uit deze analyse wordt duidelijk dat de berekeningswijze een grote invloed heeft op de totaalscore en de rangschikking van de systemen onderling.

#### EXPERTISE PARAMETER

De parameter expertise werd zoals eerder beschreven in dit onderzoek toegevoegd. Om deze aanpassing te onderzoeken wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd en worden de resultaten met en zonder de expertise parameter vergeleken.

<i>Systeem</i>	<i>Met expertise</i>	<i>Zonder expertise</i>
<i>ETICS</i>	120 %	122 %
<i>Gesloten houtskelet</i>	97 %	97 %
<i>Open houtskelet</i>	85 %	83 %
<i>Gordijngewel</i>	94 %	88 %
<i>Sandwichpaneel</i>	104 %	109 %

Tabel 22: Gevoeligheidsanalyse expertise parameter

Hieruit (Tabel 22) blijkt dat de invloed van de toevoegde expertise parameter over het algemeen beperkt is. De rangschikking van de resultaten verandert niet, maar de percentages verschillen naargelang de systemen. Bij de systemen waar expertise een extremere waarde heeft (gordijngewel en sandwichpaneel) zijn de verschillen duidelijk zichtbaar.



### 3.3 CONCLUSIE

Uit de circulaire beoordelingsmethode is gebleken dat het open houtskeletpaneel het meest circulaire systeem is met een totaalscore van slechts 85 %. Op de tweede plaats komt de gordijngewel met een totaalscore van 94 %, nipt gevolgd door het gesloten houtskelet die een score behaalt van 97 %. Het ETICS-systeem behaalt de hoogste en minst goede score, 120 %, en het sandwichpaneel eindigt op de voorlaatste plaats met een score van 104 %. De berekeningswijze van de circulariteitsbeoordelingsmethode werd in het kader van dit onderzoek aangepast en een nieuwe parameter werd aan de methode toegevoegd. Met behulp van een gevoeligheidsanalyse werd aangetoond dat de berekeningswijze een beduidende impact heeft op de randschikking van de systemen onderling. De toevoeging van de expertise parameter heeft daarentegen geen grote invloed.

Gebaseerd op deze circulariteitsbeoordeling werd onderzocht wat de voornaamste sterktes en zwaktes zijn van de geanalyseerde systemen. Zo werden verschillende circulaire principes erkend die in een latere fase aanknopingspunten kunnen vormen voor het ontwikkelen van eigen circulaire gevelrenovatiesystemen. Volgende concepten werden vooropgesteld: (1) efficiënt materiaalgebruik (het verwezenlijken van de basiseigenschappen van een gevel met een minimum aan materialen), (2) gelaagdheid volgens levensduur (materialen met lange levensduur gebruiken en geen materialen met kortere technische levensduur insluiten tussen materialen met een langere levensduur), (3) omkeerbare verbindingen (materialen demonteren met minimale schade), (4) prefabricatie (op voorhand produceren van gevelpanelen met verhoogde technische kwaliteit en snelheid) en (5) hoog 'Plug en play'- gehalte (eenvoudige aansluitingen).

## 4 EIGEN CIRCULAIRE GEVELRENOVATIESYSTEMEN

In dit hoofdstuk werden verscheidene circulaire gevelrenovatiesystemen ontwikkeld. Deze zijn gebaseerd op circulaire concepten die in hoofdstuk 3.2 erkend werden en worden gecombineerd en aangevuld worden met eigen ideeën.

### 4.1 ONDERZOEKSMETHODE

Via ontwerp onderzoek zal gezocht worden naar concrete opbouwen van circulaire systemen. Dit onderzoek wordt opgedeeld in drie categorieën: varianten op houtskeletsystemen, ETICS en vliesgevels. Volgende onderwerpen zullen voor de verschillende systemen aangehaald worden: algemeen concept, materialen en circulaire eigenschappen.

#### ALGEMEEN CONCEPT

Om te beginnen wordt voor elk systeem het basisconcept uiteengezet en de opbouw van het systeem voorgesteld. De gevelrenovatiesystemen worden ontworpen voor een massieve draagstructuur bij (middel)hoogbouw, startend van een bestaande draagmuur.

#### MATERIALEN

De materiaalkeuze in de opbouw wordt veelal bepaald door bouwfysische aspecten en brandveiligheid van de gevel. In het kader van de thermische prestaties, zal ieder gevelrenovatiesysteem moeten voldoen aan een U-waarde van  $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Daarbovenop zullen voldoende lucht- en waterdichte barrières gevormd moeten worden, en dat op een circulaire manier. Zoals eerder besproken zal dit voor uitdagingen zorgen, aangezien deze folies vaak verkleefd worden (WTCB, 2021). Voor brandveiligheid moeten de materialen in de gevelopbouw volgens het 'Koninklijk besluit' bij (middel)hoogbouw voldoen aan brandreactieklasse B-s3,d1. Deze bouwfysische aspecten en brandveiligheid zorgen echter niet voor een eenduidige keuze van een bepaald materiaal aangezien deze vaak ook te maken heeft met praktische randvoorwaarden zoals mogelijkheden bij plaatsing of prefabricatie etc. (WTCB, 2017).

De keuze van een gevelafwerking hangt samen met de systeemopbouw, maar is voor een groot deel ook afhankelijk van esthetische voorkeuren. Om deze reden wordt hier hetzelfde principe als bij eerdere analyse gehanteerd (hoofdstuk 2.1.2): de gevelafwerking met de laagste milieukost wordt gekozen voor ieder systeem tenzij andere eigenschappen van de gevelafwerking meer bepalend zijn.

## CIRCULAIRE EIGENSCHAPPEN

Voor ieder systeem wordt aangehaald wat de sterke eigenschappen zijn binnen de eerder besproken parameters uit de circulariteitsbeoordelingsmethode (hoofdstuk 3.1) aan de hand van de symbolen in Figuur 17. Aangezien de focus in dit hoofdstuk ligt op verbindingsmethodes en opbouwen (elementniveau), worden de sterktes onder de parameters verwachte levensduur, expertise, laag- en componentafhankelijkheid en flexibiliteit voor hergebruik hier aangehaald. De gebruikte waarden voor levensduren zijn weergegeven in Bijlage 1. Er wordt gestreefd naar een volledig correcte gelaagdheid volgens levensduur, laag benodigd expertise, lage laag-en componentafhankelijkheid en hoge flexibiliteit voor hergebruik.



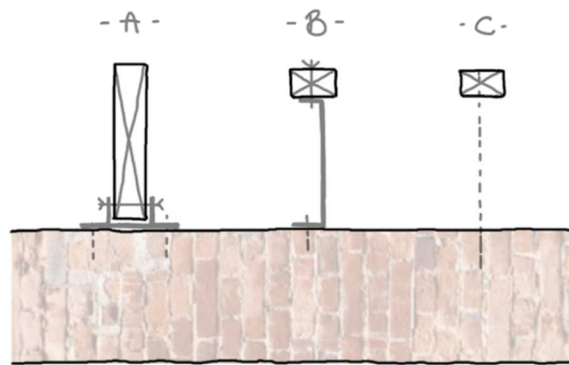
Figuur 17: Vijf parameters van de circulariteitsbeoordelingsmethode

## 4.2 RESULTATEN

Het ontwerpend onderzoek wordt opgedeeld in drie categorieën: varianten op houtskeletsystemen, ETICS, en verbindingstechnieken vliesgevel.

### 4.2.1 VARIANTEN OP HOUTSKELETSYSTEMEN

Vanuit het circulaire principe efficiënt materiaalgebruik werd hier de zoektocht naar een minimale draagstructuur voor de gevelafwerking vooropgesteld. De ontwikkelde systemen vormen een variant op een klassiek houtskeletstelsel, waarbij de onderliggende structuur van de gevelafwerking met afstandsschroeven bevestigd wordt aan de draagstructuur.



Figuur 18: horizontale snede varianten bevestiging onderliggende structuur gevelafwerking bij houtskeletbouw

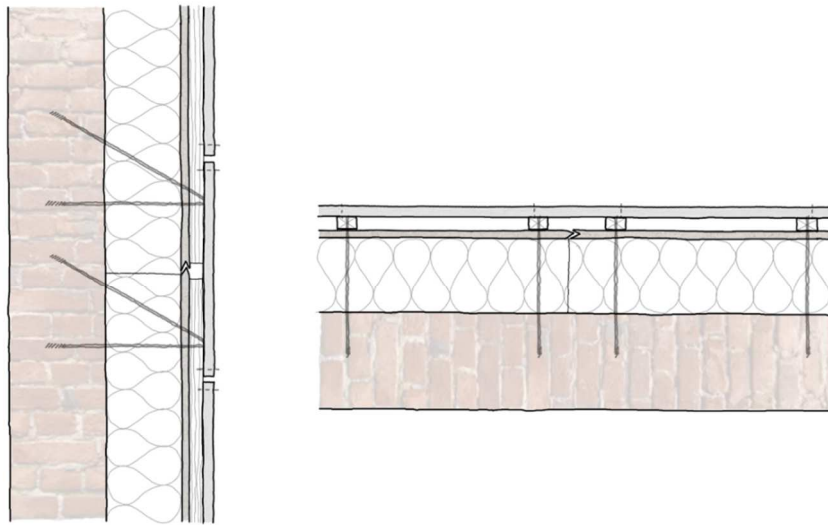
De bevestiging op de structuur kan bestaan uit verschillende varianten (Figuur 18): (a) een houten lat over de hele diepte met aluminium of stalen (U-)profiel als verankering aan de draagstructuur, (b) houten lat die via een stalen of aluminium (U-)profiel bevestigd wordt en (c) houten lat die met behulp van afstandsschroeven aan draagstructuur bevestigd wordt. De laatste optie is diegene met een minimum aan materiaal en zal daarom verder onderzocht worden. Een bijkomend voordeel van (c) is dat deze afstandsschroeven een ruim toepassingsgebied hebben wat hergebruik ervan kan bevorderen. Figuur 19 toont de bevestiging op de draagstructuur, die bestaat uit een horizontale en een schuine afstandsschroef (30 graden). De afstandsschroeven dienen in verticale richting op 60 cm van elkaar geplaatst te worden (Fischer, 2021). Er worden verder twee gevelrenovatiesystemen, die deze afstandsschroeven gebruiken, onderzocht: een in situ systeem en een prefab systeem.



Figuur 19: Afstandsschroeven (Fischer, 2021)

#### 4.2.1.1 PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM

##### ALGEMEEN CONCEPT



Figuur 20: Opbouw prefab afstandsschroefstelsel

Het prefab afstandsschroefstelsel (Figuur 20) streeft naar een volledig demonteerbare verbindingen met minimale materiaalhoeveelheid en een lage milieukost. Het systeem bestaat uit prefab panelen die eenvoudig te plaatsen zijn en op de site een gevelafwerking krijgen.

##### MATERIALEN

	Dikte- [mm]	Gewicht- [kg/m <sup>2</sup> ]	Brand	Water- dichtheid	Lucht- dichtheid
<i>Vezelcementplaten</i>	8	15,40	A2-s1, d0	X	
<i>Houten lattenwerk</i>	40	1,30	Incl.		
<i>Houtvezelplaat</i>	18	4,86	E	X	
<i>Rotswol isolatie</i>	140	5,60	A1		
<i>Draagmuur</i>	/	/	/		
<i>Pleisterwerk</i>	/	/	/		X
<i>Maatvoering</i>	Prefab				
<i>U-waarde</i>	0,23 W/m <sup>2</sup> K				

Tabel 23: Materialen prefab afstandsschroefstelsel

Zoals weergegeven in Tabel 23, bestaat dit systeem uit rotswolisolatie, een waterdichte en dampopen houtvezelplaat, een houten lattenwerk (bevestigd met afstandshouders aan draagstructuur) en een gevelafwerking uit vezelcement.

### Opbouw paneel

Prefab systemen moeten getransporteerd en op de site geïnstalleerd worden en hebben daarvoor voldoende stijfheid nodig. De stijfheid van dit paneel wordt tot stand gebracht door de houtvezelplaat die tegelijk ook de waterdichting vormt. Het combineren van beide functies zorgt voor een efficiënt materiaalgebruik in deze opbouw. Een praktijkvoorbeeld van een waterdichte houtvezelplaat is een Celit-plaat (Celit, 2021). Deze Celit-platen gebruiken een tand en groef om de platen waterdicht op elkaar aan te sluiten. Deze aansluiting heeft echter als nadeel dat de platen afhankelijk van elkaar fungeren wat een lokale vervanging bemoeilijkt. Indien dit een probleem vormt, kan er geopteerd worden voor een sponningverbinding of rechte aansluiting met bijkomende folie.

Voor het isolatiemateriaal werd geopteerd voor rotswol omdat deze over schroeven geprikt kan worden en op die manier demonteerbaar met beperkte beschadiging geplaatst is. Daarbovenop heeft rotswol goede brandeigenschappen, een brandreactieklasse A (Rockwool, 2021).

### Gevelafwerking

Voor de gevelafwerking van dit systeem zijn er veel mogelijkheden die op het lattenwerk bevestigd kunnen worden. Zoals eerder beschreven wordt in dit geval gekozen voor het materiaal met de laagste milieukost in TOTEM: vezelcementplaten. Een praktijkvoorbeeld van de vezelcementplaat is een Equitone met volgende eigenschappen (Equitone, 2021):

- 8mm dik
- Gewicht van 15,4 kg/m<sup>2</sup>
- Brandreactieklasse A2-s1, d0
- Waterbestendig, bestand tegen extreme temperaturen, geluidsisolerend
- Bevestiging van de platen op het lattenwerk met schroeven

De gevelafwerking is geen deel van het prefab paneel, maar wordt ter plaatse geïnstalleerd. De afstandsschroeven moeten namelijk op de site in de latten geschroefd worden, wat niet mogelijk is als de gevelbekleding al op het lattenwerk aanwezig is. De maatvoering van het lattenwerk is gebaseerd op de technische eigenschappen van de gevelafwerking en bekomt zo een hart-op-hartafstand van 40 cm.

### Fabricage en plaatsing

De afmetingen van het prefab paneel zullen onder andere gebaseerd worden op de afmetingen van de houtvezelplaat (250 cm x 60 cm (Celit, 2021)) om zo de snijverliezen te beperken. De fabricage van het systeem verloopt als volgt:

- (a) Bevestigen van het lattenwerk op de houtvezelplaat met schroeven die uitsteken
- (b) Prikken van de rotswol over deze schroeven
- (c) Plaatsen tijdelijke afstandshouders voor installatie prefab paneel

Een alternatieve methode bestaat erin om in plaats van de uitstekende, metalen schroeven houten nagels te gebruiken die met behulp van een nagelpistool geplaatst kunnen worden. Dit zou recycling kunnen bevorderen door minder menging van materialen. De plaatsing van het systeem op de site verloopt als volgt:

- (a) Positionering via kraan, arbeiders en afstandshouders
- (b) Verankering van de panelen met behulp van afstandsschroeven
- (c) Installatie gevelafwerking vanop de stelling

## CIRCULAIR EIGENSCHAPPEN



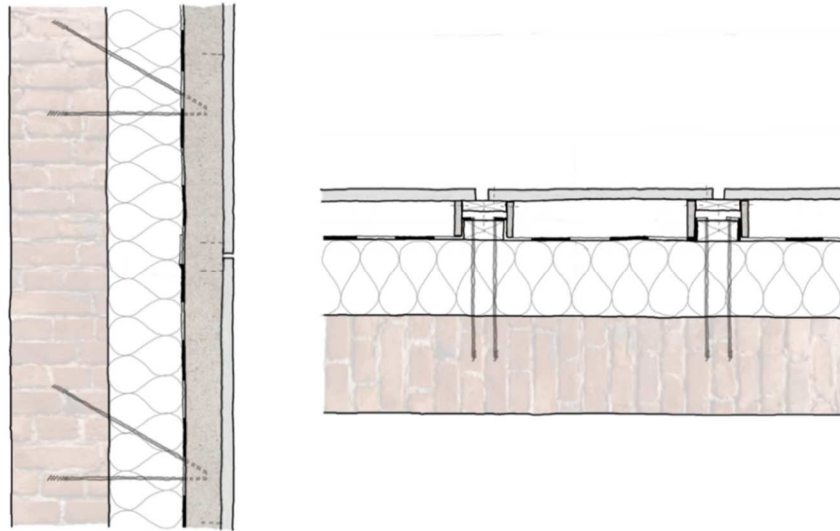
Het prefab paneel zorgt ervoor dat hergebruik niet alleen mogelijk is op materiaalniveau, maar ook op elementniveau. Daarbovenop zorgt prefabricatie voor een toegankelijk systeem waar verminderde expertise voor nodig is. Er werd gezocht naar efficiënt materiaalgebruik, resulterend in een minimum aan materialen. Dit uit zich in het gebruik van afstandsschroeven en een houtvezelplaat die zowel zorgt voor de waterdichting als voor de stijfheid van het prefab paneel. Alle materialen van dit systeem worden volledig demonteerbaar aan elkaar bevestigd, resulterend in een beperkte laagafhankelijkheid. De meeste materialen in deze opbouw hebben een technische levensduur langer dan 60 jaar, enkel de vezelcementplaat heeft een kortere. Zoals weergegeven op Figuur 21 wordt de houtvezelplaat ingesloten door materialen met een langere levensduur.



Figuur 21: Levensduren van prefab afstandsschroefstelsel

## 4.2.1.2 IN SITU AFSTANDSCHROEFSTEEEM

## ALGEMEEN CONCEPT



Figuur 22: Opbouw in situ afstandhoudersysteem

Het in situ afstandsschroefstelsel (Figuur 22) is in navolging van het prefab afstandsschroefstelsel op zoek naar minimum aan materialen, demonteerbare verbindingen en een eenvoudige opbouw. In tegenstelling tot het geprefabriceerde systeem, waar een plaat nodig was om voldoende stijfheid te creëren, zal de plaat in deze opbouw vervangen worden door een waterdichtingsfolie. Op die manier kan de waterkerende laag met minder materiaal en zonder beschadiging geconstrueerd worden.

## MATERIALEN

	Dikte- [mm]	Gewicht- [kg/m <sup>2</sup> ]	Brand	Water- dichtheid	Lucht- dichtheid
Vezelcementplaten	8	15,40	A2-s1, d0	X	
Houten lattenwerk	40	1,30	Incl.		
Regenscherm	2	0,21	B-s1, d0	X	
Rotswol isolatie	145	5,80	A1		
Draagmuur	/	/	/		
Pleisterwerk	/	/	/		X
Maatvoering	In situ				
U-waarde	0,23 W/m <sup>2</sup> K				

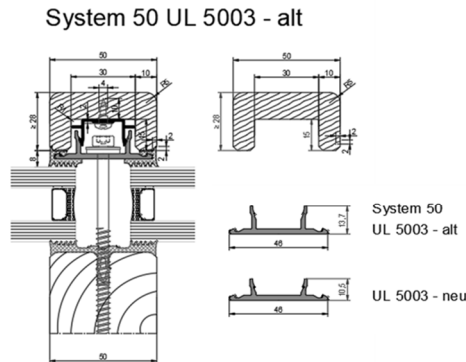
Tabel 24: Materialen in situ afstandsschroefstelsel

In Tabel 24 staat de opbouw weergegeven, bestaande uit rotswolisolatie, een regenscherm, een houten lattenwerk en een gevelafwerking. Het lattenwerk wordt op zijn plaats gehouden door middel van afstandsschroeven, waartussen de rotswolisolatie geklemd wordt. Op deze manier wordt de



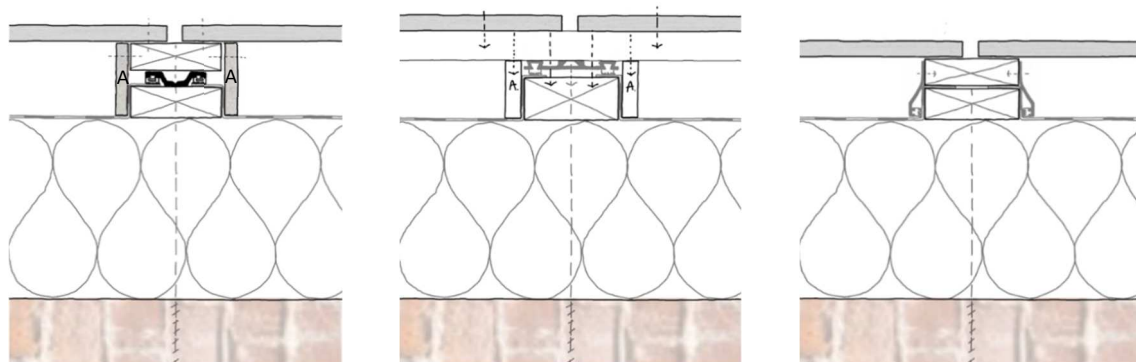
rotswolisolatie geplaatst zonder enige beschadiging. Op het lattenwerk wordt het regenscherm ingeklemd met behulp van een klemlijst met een deklat als afwerking. Op deze deklat wordt ten slotte de vezelcement gevelafwerking bevestigd.

### Klemlijst en deklat



Figuur 23: Gordijngevelprofiel technische tekening met klemlijst (Stabalux, 2021)

Aangezien het regenscherm met behulp van een klemlijst op zijn plaats wordt gehouden, kan deze op een omkeerbare wijze geplaatst worden zonder het regenscherm te beschadigen. In een klassieke gordijngevel wordt een klemlijst vaak gebruikt, zoals weergegeven op Figuur 23 (Stabalux, 2021). De klemlijst bestaat uit aluminium en rubbers, met daarbovenop een houten deklat. De deklat (Figuur 24 links), die bestaat uit een hoofdlat en twee kantlatten, wordt samen met de klemlijst in de verticale gevelstructuur geschroefd. De kopse kanten van de kantlatten (aangeduid met A) zorgen ervoor dat de folie tegen de achterliggende isolatielaag gedrukt en op spanning wordt gebracht. Als er een bijkomend horizontaal regelwerk gebruikt wordt (bv. In functie van de gevelafwerking), kunnen de kantlatten (Figuur 24 midden), geïntegreerd worden in het lattenwerk. Een aandachtspunt bij deze variant is echter dat de klemlijst zo onbeschermd in de spouw zit, wat ervoor zorgt dat een bijkomende rubber op de klemlijst geplaatst moet worden of dat de verticale voegen tussen de gevelbekleding niet mogen samenvallen met de ritmering van de klemlijst. Een derde variant (Figuur 24 rechts) plaatst de klemlijsten langs de kopse kanten van de deklat, waardoor de bevestiging van de gevelafwerking vereenvoudigt en geen kantlatten meer geplaatst moeten worden.



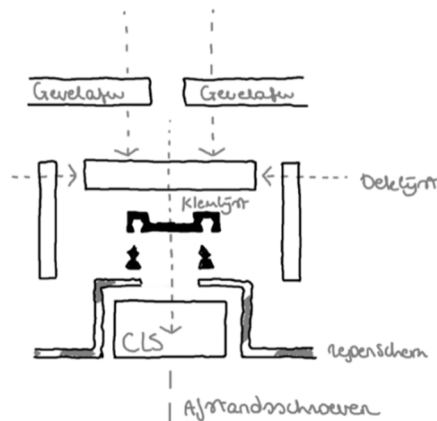
Figuur 24: detail van (links) kopse afdeklat en kantlatten, (midden) horizontaal regelwerk en kantlatten en (rechts) klemlijsten aan kopse zijde

De verticale voegen tussen folie en klemlijst zijn steeds ononderbroken over de volledige hoogte uitgevoerd. De horizontale voegen tussen de folies zijn open maar worden als waterdicht beschouwd door een plaatsing met overlap (volgens het dakpanprincipe).

## Gevelafwerking

Opnieuw wordt hier gekozen voor de gevelafwerking met de laagste milieukost, een Equitone vezelcementplaat, die eerder werd besproken (hoofdstuk 4.2.1.1). De maatvoering van het lattenwerk (h.o.h. 40 cm) is ook hier gebaseerd op de technische eigenschappen van de gevelafwerking.

## Installatie



Figuur 25: Detail van aansluiting deklat en klemlijst afstandshoudersysteem

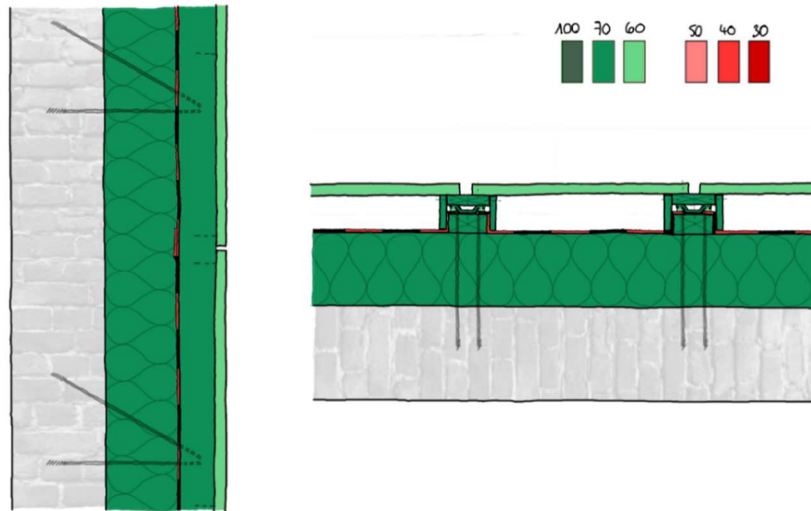
De installatie van het systeem, op Figuur 25 gedetailleerd weergegeven, verloopt als volgt:

- (a) De verticale latten, die de draagstructuur van de gevelafwerking vormen, worden via afstandsschroeven geïnstalleerd en uitgelijnd met elkaar.
- (b) Eenmaal deze latten op hun plaats zitten kan de rotswolisolatie tussen de afstandsschroeven van de verticale latten geklemd worden.
- (c) Vervolgens wordt met een klemlijst het regenscherm op de verticale latten bevestigd.
- (d) De bevestiging van de hoofdlat (deel van de deklat), bovenop de klemlijst, gebeurt met schroeven die door de klemlijst in het lattenwerk worden bevestigd.
- (e) Langs de zijkanten van de hoofdlat worden daarna de kantlatten aangebracht om de folie op spanning te brengen en tegen de isolatie te duwen.
- (f) Als laatste stap wordt de gevelafwerking op de deklatten bevestigd.

## CIRCULAIR EIGENSCHAPPEN



Er werd bij het in situ afstandsschroefstelsel gestreefd naar een minimum aan materialen door een efficiënt materiaalgebruik. Dit uit zich onder meer in het gebruik van afstandhouders en een regenscherm. Door het regenscherm met een klemlijst op de houten structuur te klemmen, kan deze



Figuur 26: Levensduren van in situ afstandsschroefstelsel

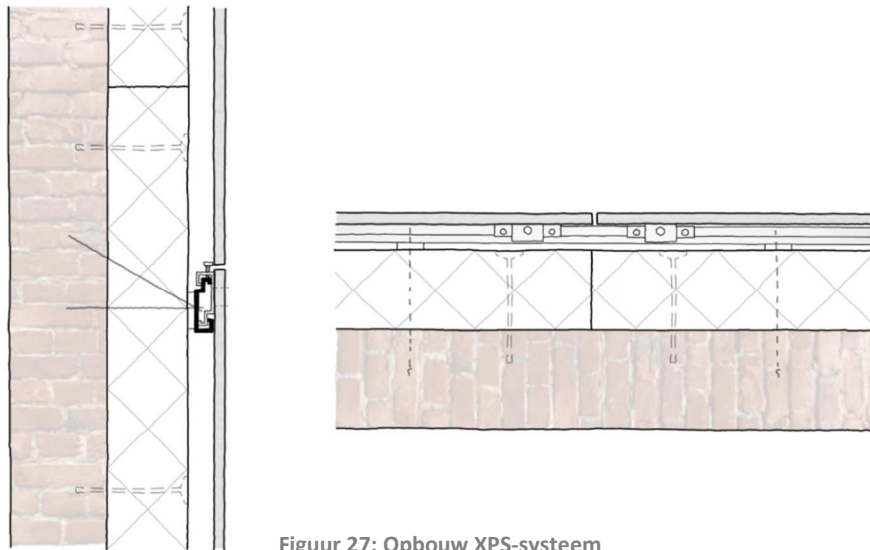
zonder beschadiging geplaatst worden, wat hergebruik ervan bevordert. Ook het isolatiemateriaal wordt zonder beschadiging geklemd tussen de afstandsschroeven. Dit systeem creëert een opbouw die volledig demonteerbaar is met minimale beschadiging aan de materialen en bestaat uit onafhankelijke componenten en lagen. Zoals weergegeven op Figuur 26, wordt het regenscherm ingeklemd tussen materialen met een langere levensduur. Enkel het regenscherm heeft een levensduur korter dan 60 jaar.

## 4.2.2 VARIANTEN OP ETICS

Deze tweede categorie systemen zoekt naar een variant op de ETICS, aangezien deze een minimum aan materialen verwezenlijkt. Vanuit het circulaire principe efficiënt materiaalgebruik, worden systemen ontwikkeld hoofdzakelijk opgebouwd uit twee lagen: isolatiemateriaal en gevelafwerking. Dit uit zich in deze categorie in het gebruik van een hard isolatiemateriaal met isolatiepluggen waarop een demonteerbare gevelafwerking bevestigd is. Twee systemen zullen ontwikkeld worden: XPS-systeem en noppenplaatsysteem.

### 4.2.2.1 XPS-SYSTEEM

#### ALGEMEEN CONCEPT



Figuur 27: Opbouw XPS-systeem

In deze zoektocht naar een minimum aan materialen zal functieoverlap binnen eenzelfde laag moeten plaatsvinden. Het dynamische aspect van de gevelafwerking is moeilijk te combineren met een statisch uitgevoerde waterdichting. Om die reden wordt er gezocht naar het verwezenlijken van de waterdichting in de isolatielaag. Dit systeem, weergegeven op Figuur 27, ambieert efficiënt materiaalgebruik (zoals bij de ETICS) in combinatie met een dynamische vormgeving.

#### MATERIALEN

	Dikte- [mm]	Gewicht- [kg/m <sup>2</sup> ]	Brand	Water- dichtheid	Lucht- dichtheid
Rockpanel	8	8,00	B-s2,d0	X	
Aluminium rails	30	0,90	Incl.		
XPS-isolatie	140	4,83	E	X	
Draagmuur	/	/	/		
Pleisterwerk	/	/	/		X
Maatvoering U-waarde	In situ 0,23 W/m <sup>2</sup> K				

Tabel 25: Materialen XPS-systeem

## Isolatiemateriaal



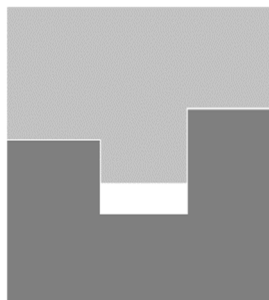
Figuur 28: Aansluitingsmogelijkheden isolatieplaten (Isolatiemateriaal, 2021)

In dit systeem speelt het isolatiemateriaal een belangrijke rol: het is tegelijk de thermische laag, maar zorgt ook voor waterafdichting. Er bestaan verschillende isolatiematerialen die dit kunnen verwezenlijken, waaronder XPS. De XPS-platen worden met pluggen op de bestaande draagstructuur geplaatst. De aansluiting van de platen onderling kan zowel met rechte kanten, met sponning of tand en groef uitgevoerd worden (Figuur 28). De tand en groef aansluiting lijkt de meest waterdichte, maar zorgt er tegelijk voor dat de platen afhankelijk van elkaar functioneren. Om die reden wordt er geopteerd voor rechte kanten zonder bijkomende afwerking (vb. tape). Er wordt vanuit gegaan dat deze aansluiting voldoende waterdicht is. Zo kan verder onderzocht worden wat de circulaire kwaliteiten zijn van onafhankelijke isolatieplaten.



Figuur 29: XPS-isolatieplaten met drainage ontwikkeld door Newton Waterproofing

Als de gevelafwerking rechtstreeks op de isolatielaag bevestigd wordt (zonder spouw), dienen er enkele maatregelen met betrekking tot drainage genomen te worden. Een ingewerkt drainagesysteem, zoals op Figuur 29 weergegeven, biedt hierbij een oplossing. XPS-isolatie is een zeer brandbaar materiaal en behoort tot de brandreactieklasse E (Sleiderlink bouwmaterialen, 2021). Dit maakt van XPS een slechte keuze op vlak van brandveiligheid. Om dit op te lossen kan er gebruik gemaakt worden van branddammen (zie hoofdstuk 1.2.2) bestaande uit een onbrandbaar isolatiemateriaal, lokaal afgewerkt met een folie.

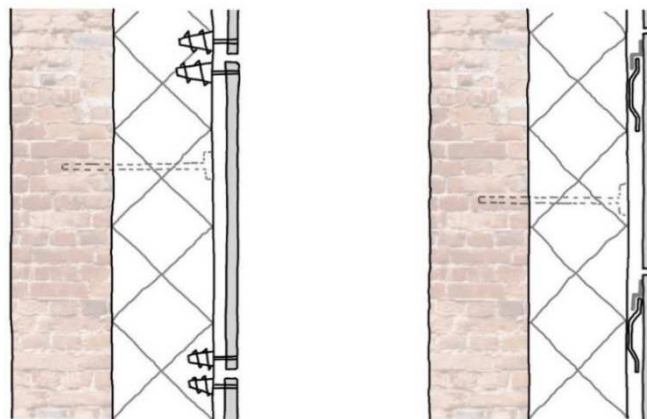


Figuur 30: Ontspanningskamer in aansluiting XPS-platen

Er zou ook geopteerd kunnen worden voor EPS in de plaats van XPS. EPS-platen worden via tand- en groef aan elkaar bevestigd, waardoor er een ontspanningskamer (Figuur 30) gevormd wordt die de waterdichting van het systeem garandeert. Een ontspanningskamer wordt veelal gebruikt bij de opbouw van schrijnwerkprofielen om drainage in deze profielen mogelijk te maken (Salomez, 1995). EPS is nog steeds een brandbaar isolatiemateriaal, maar valt onder de brandreactieklasse C. Om echter aan de eisen voor (middel) hoogbouw te voldoen volgens het, brandreactieklasse B-s3,d1, hebben beide materialen een onvoldoende brandreactieklasse. Isolatiematerialen met een brandreactieklasse B (bijvoorbeeld PIR-isolatie) kennen nog geen toepassing met geïntegreerde waterdichting. Op dit moment is het ontwikkelde systeem met XPS- of EPS-isolatie volgens de huidige brandeisen voor nieuwbouw enkel toepasbaar voor laagbouw. Het potentieel van dit systeem zal verder onderzocht worden en kan een aanleiding vormen voor producenten om een product te ontwikkelen dat toepassing op (middel)hoogbouw mogelijk maakt.

### Gevelafwerking

Op Figuur 31 zijn twee mogelijkheden voor bevestiging van de gevelafwerking weergegeven: (a) met isolatieschroeven en (b) met een verdoken bevestiging met rails en schroeven doorheen het isolatiemateriaal.



Figuur 31: Verticale snede van XPS-systeem met gevelafwerking op de linkse tekening (a) bevestigd via isolatieschroeven en op de rechtse tekening (b) bevestigd via rails

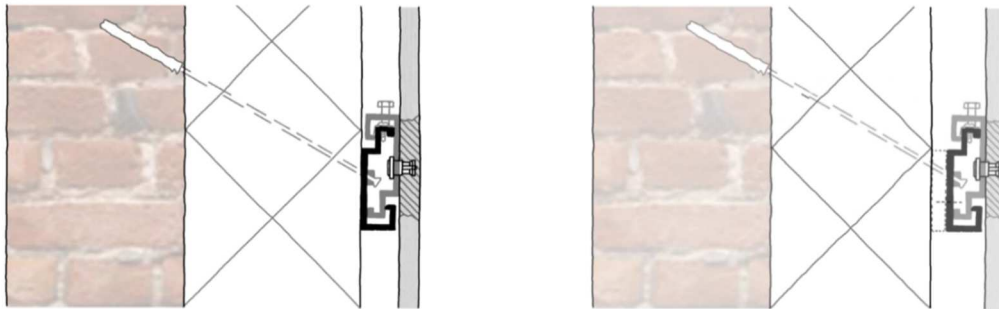
#### (a) Isolatieschroeven

De eerste mogelijkheid bestaat erin om de gevelafwerking via isolatieschroeven rechtstreeks te bevestigen op de XPS-platen. Deze schroeven bestaan uit polystyreen en kunnen 5 tot 20 kg opnemen (Fisher, 2021). In deze opstelling zal de uitlijning van het systeem (ervoor zorgen dat alle afwerkingspanelen in hetzelfde vlak liggen) gebeuren via de isolatieschroeven.

#### (b) Verdoken bevestiging met rails

De tweede mogelijkheid bestaat erin om horizontale rails via schroeven doorheen de isolatie te bevestigen aan de draagstructuur. Aan deze rails kunnen de gevelpanelen met een verdoken bevestiging geplaatst worden. Hiervoor zijn een horizontale en schuine bevestiging in de draagmuur nodig om respectievelijk de druk-, trek- en dwarskrachten op te vangen die op de rail komen. Deze horizontale rails (LeonardoFix, 2021), zoals weergegeven op Figuur 32, maken de uitlijning van het systeem eenvoudiger. Als de isolatieplaat drainagekanalen heeft kan de rail

rechtstreeks op de isolatieplaat bevestigd worden (a), indien dit niet het geval is zijn er afstandshouders nodig tussen de isolatieplaat en de rail (b).



Figuur 32: Verticale snede van XPS met (a) rail en (b) afstandhouder en rail

Er wordt beslist om de rail met afstandshouders toe te passen bij dit gevelrenovatiesysteem. Om te vermijden dat de bevestiging bezwijkt onder het eigengewicht van de gevelafwerking, mag deze niet te zwaar zijn. Daarbovenop wordt de voorkeur gegeven aan een materiaal met een lage milieukost. Om die reden werd gekozen voor een licht gevelmateriaal bestaande uit samengeperste, organische steenwolvezels (Tabel 26).

Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> ) (TOTEM,2021)
Vezelcementplaat	4,8
Rotswolvezelplaat	7,2

Materiaal	Gewicht (kg/m <sup>2</sup> ) (productfiches)
Vezelcementplaat	15,4 (Equitone)
Rotswolvezelplaat	8 (Rockpanel)

Tabel 26: Vergelijking van milieukost en gewicht gevelmaterialen

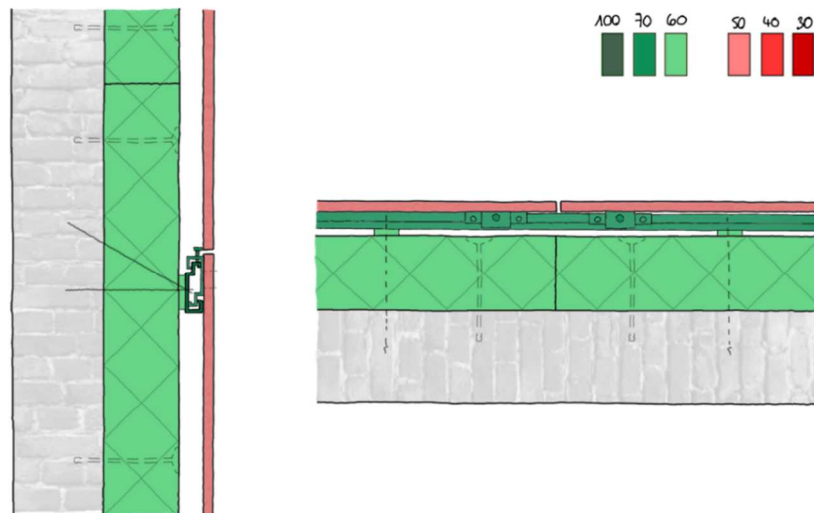
Een praktijkvoorbeeld hiervan is een Rockpanel met volgende eigenschappen (Rockpanel, 2021) (Verbouw, 2021):

- 8 mm dik
- Gewicht van 8 kg/m<sup>2</sup>
- Brandreactieklasse B-s2, d0
- Weers-, temperatuur en UV-bestendig
- Bevestiging met nagels, schroeven of verlijmen

## CIRCULAIR EIGENSCHAPPEN



Dit gevelrenovatiesysteem heeft weinig materialen en een eenvoudige opbouw, waardoor het makkelijk te begrijpen en toe te passen is. De gevelpanelen worden onafhankelijk van elkaar aan de rail opgehangen, waardoor een dynamische afwerkingslaag gecreëerd wordt. Door de recht op recht aansluiting van de isolatieplaten ontstaan onafhankelijke componenten. Dit systeem is volledig opgebouwd uit robuuste materialen die demonteerbaar verbonden zijn. Bij hergebruik moet er echter rekening gehouden worden met de beschadiging van de isolatieplaten door de schroeven en isolatiepluggen. Op Figuur 33 wordt duidelijk dat de gevelafwerking het enige materiaal is met een technische levensduur korter dan 60 jaar. Echter heeft de aluminium rail een langere levensduur dan het isolatiemateriaal, wat ingaat tegen de ‘gelaagdheid volgens levensduur’.

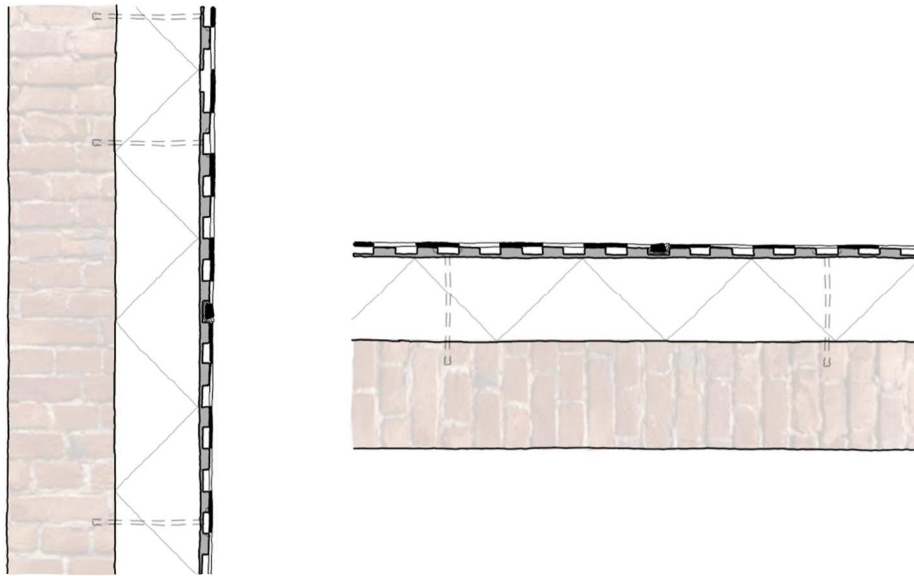


Figuur 33: levensduren van XPS-systeem



## 4.2.2.2 NOPPENPLAATSYSTEEM

## ALGEMEEN CONCEPT



Figuur 34: Opbouw noppenplaatstelsysteem

Het noppenplaatstelsysteem stelt een zoektocht naar een minimum aan materiaal gecombineerd met volledig omkeerbare verbindingen voorop. Het systeem (Figuur 34) ambiert om een gevelafwerking, bestaande uit een dichtingsfolie, te bevestigen zonder enig materiaalverlies en maakt het mogelijk om (hergebruikte) folies met verschillende afmetingen te incorporeren in het systeem. Daarbovenop wordt gestreefd naar een hoog en 'plug and play'-gehalte, door het gebruik van eenvoudige verbindingen.

## MATERIALEN

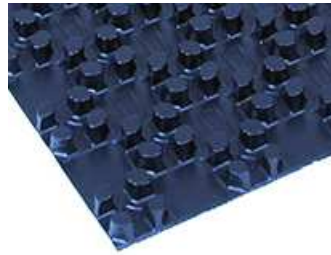
	<i>Dikte- [mm]</i>	<i>Gewicht- [kg/m<sup>2</sup>]</i>	<i>Brand</i>	<i>Water- dichtheid</i>	<i>Lucht- dichtheid</i>
<i>Resitrix folie</i>	1	1,51	A	X	
<i>Noppenplaat</i>	20	2,08	B2	X	
<i>PIR-isolatie</i>	120	4,20	B		
<i>Draagmuur</i>	/	/	/		
<i>Pleisterwerk</i>	/	/	/		X
<i>Maatvoering</i>	In situ				
<i>U-waarde</i>	0,23 W/m <sup>2</sup> K				

Tabel 27: Materialen noppenplaatstelsysteem

Zoals weergegeven in Tabel 27, bestaat het systeem uit een hard isolatiemateriaal (PIR) dat met rechte kanten onderling aangesloten en bevestigd is met isolatiepluggen aan de bestaande draagstructuur.

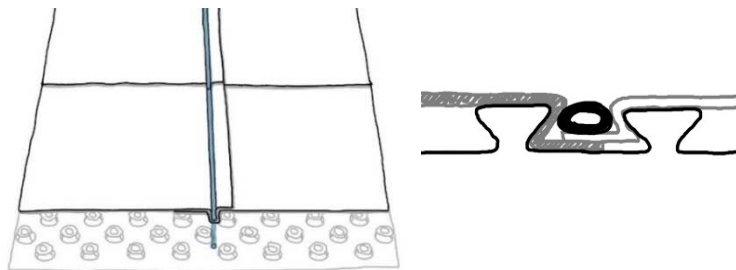
Aan de PIR-platen wordt een vloerverwarmingsplaat met noppen bevestigd met daarin een waterdichtingsfolie geklemd door middel van rubberen buisjes.

### Noppenplaat



Figuur 35: Vloerverwarmingsplaat met noppen (Vloerverwarmingsstore, 2021)

Op Figuur 35 is een vloerverwarmingsplaat met noppen, of noppenplaat, weergegeven. Deze bestaat uit polystyreen en wordt voornamelijk gebruikt om vloerverwarming te installeren, door tussen de noppen de buisjes voor water te klikken (VloerverwarmingTips, 2021). In dit systeem wordt de noppenplaat bevestigd aan de achterliggende laag, de PIR-isolatieplaten, via (isolatie)schroeven of isolatiepluggen als de plaatsing van de pluggen dit toelaat. Zoals weergegeven op Figuur 36, wordt een folie in deze noppenplaat geklemd met een rubberen buisje. Dit zorgt ervoor dat de folie zonder beschadiging en eenvoudig demonteerbaar geplaatst kan worden. Deze inklemmingsverbinding kan tussen alle noppen uitgevoerd worden, wat zorgt voor grote vrijheden in maatvoering: folies van verschillende afmetingen kunnen zonder snijverliezen geïncorporeerd worden in dit systeem. Het is evenwel mogelijk om de horizontale voegen tussen de foliestroken open te houden, waardoor de noppenplaat als drainagelaag kan fungeren. Hiervoor moeten echter onderaan de noppenplaat openingen zijn opdat het water kan weglopen naar buiten.



Figuur 36: Noppenplaat met ingeklemd folie

Aangezien dit een vooruitstrevend idee is voor het bevestigen van een folie werd de haalbaarheid hiervan getest. Op Figuur 37 staat de verbinding weergegeven met een EPDM-folie, een noppenplaat en kunststofbuisjes. Met deze kunststofbuisjes is het mogelijk om deze verbinding uit te voeren, maar het flexibele karakter van rubbers zou deze uitvoering verbeteren.



Figuur 37: testen van noppenplaat met folie

### Dichtingsfolie

BLAF architecten heeft een woning ontworpen waarin de gevelafwerking bestaat uit een EPDM-folie (Figuur 38). Dit biedt verschillende voordelen: een folie heeft een zeer laag eigengewicht en een beperkt volume vergeleken met klassieke gevelmaterialen. Daarbovenop zorgen de variabele afmetingen van de folie voor een beperkt aantal voegen in de gevelafwerking. Naast deze principes streeft het noppenplaatsysteem naar het inzetten van gerecupereerde dakdichtingen (EPDM, TPO, PVC...) als gevelafwerking om 'Urban Mining' in dit systeem mogelijk te maken. 'Urban Mining' zet in op het hergebruik van materialen die reeds in het gebouwenpatrimonium aanwezig zijn.



Figuur 38: Woning met EPDM-gevelafwerking (BLAF Architecten, 2009)

Om aan de eisen van brandveiligheid, brandreactieklasse B-s3,d1, te voldoen wordt er in dit systeem gebruikt gemaakt van een Resitrix-dakdichting. Dit is een combinatie van EPDM en bitumen waarop een coating is aangebracht en bijgevolg een brandreactieklasse A1 verwezenlijkt wordt (Resitrix, 2019). Voor laagbouw vormen andere dakdichtingen of folies met een minder goede brandreactieklasse eveneens een mogelijkheid.

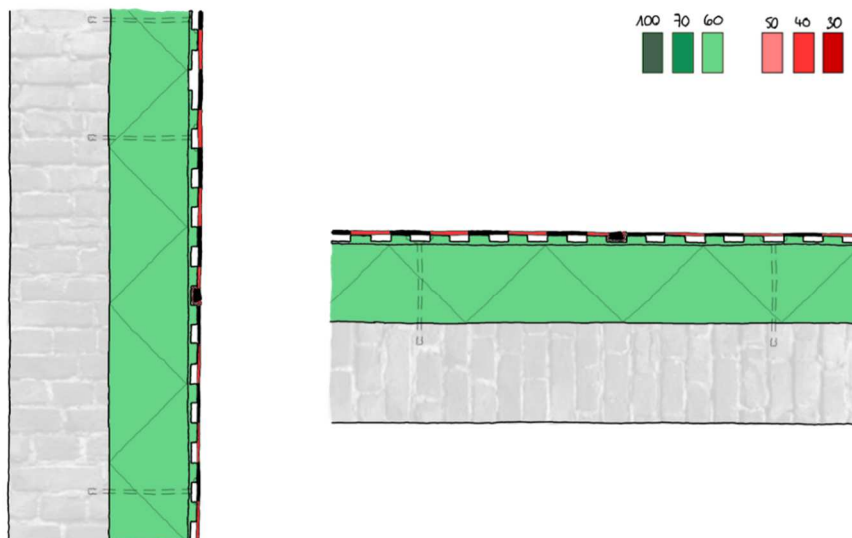
De folie als gevelafwerking heeft als nadeel dat de buisjes zomaar uit de noppenplaat getrokken kunnen worden. Daarbovenop is het systeem langs de buitenzijde niet schokbestendig. Ook zijn er onzekerheden in verband met thermisch uitzetting en UV-resistentie van de folies. Om die reden worden volgende alternatieven vooropgesteld:

- (a) Een eerste mogelijkheid bestaat erin om een groengevel toe te passen op dit systeem. Indien er gekozen wordt voor een specifiek membraan dat wortelwerend is zou daarboven een raster van staaldraad gespannen kunnen worden waarop de begroeiing zich kan enten. Deze groengevel kan groeien vanuit de grond of vanuit plantenbakken die bijvoorbeeld op terrassen geplaatst worden.
- (b) Een tweede mogelijkheid bestaat erin een gevelstructuur toe te voegen en de 'folie als regenscherm in een spouw' te gebruiken. Dit systeem krijgt een andere opbouw en wordt in hoofdstuk 4.2.2.3 verder onderzocht.
- (c) Een derde mogelijkheid is om bij de folie een secundair verbindingssysteem in te klemmen (vb. velcro) waaraan een afwerkingslaag met beschermende functie bevestigd kan worden. Er wordt zo gezocht naar een gevelafwerking die mee in de logica van de inklemming wordt bevestigd.

## CIRCULAIR EIGENSCHAPPEN



Dit systeem is echter vooruitstrevend en kan in zijn huidige configuratie nog niet gerealiseerd worden, maar verwezenlijkt verschillende, circulaire principes. Het gebruik van een noppenplaat met ingeklemde folie laat toe om de folie zonder beschadiging en met minimale snijverliezen te plaatsen. De isolatieplaten en noppenplaat worden demonteerbaar geplaatst met pluggen en (isolatie)schroeven aan de draagstructuur. De verschillende componenten in deze configuratie fungeren onafhankelijk. Het systeem bestaat uit verbindingen die eenvoudig uit te voeren zijn en een hoog 'plug and play'-gehalte mogelijk maken. Zoals weergegeven op Figuur 39, hebben de meeste materialen in deze opbouw een lange technische levensduur. Alleen de folie voldoet niet aan de levensduur van 60 jaar. De levensduren van de materialen in deze opbouw zijn oplopend van buiten naar binnen toe, wat in lijn is met de 'gelaagdheid volgens levensduur'.

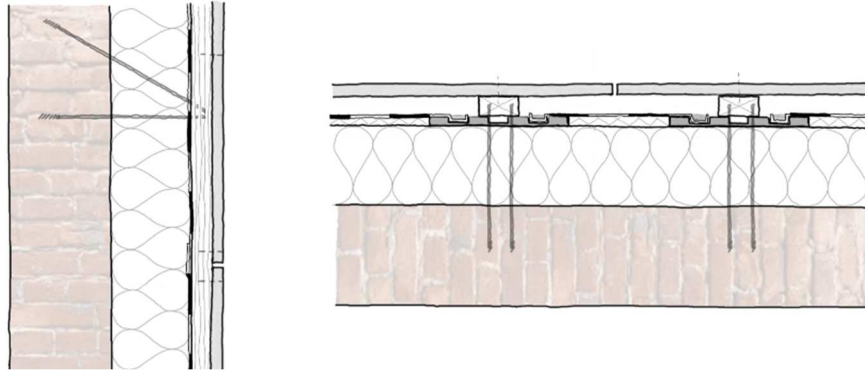


Figuur 39: Levensduren van noppenplaatsysteem

#### 4.2.2.3 FOLIE ALS REGENSCHERM IN EEN SPOUW

Dit systeem onderzoekt voornamelijk de mogelijkheden van de inklemming in een noppenplaat als verbindingwijze. De dichtingsfolie wordt niet langer als gevelafwerking gebruikt en krijgt een gevelafwerking langs de buitenzijde.

#### MATERIALEN



Figuur 40: folie als regenscherm in een spouw

De algemene opbouw van het systeem is weergegeven op Figuur 40 en bestaat uit rotswol isolatie die tussen een lattenwerk (met afstandsschroeven bevestigd aan de draagmuur) geklemd zit.

#### Dichtingsfolie

In dit systeem wordt de folie beschermd door een gevelafwerking. Dit zorgt ervoor dat de eisen voor de folie minder streng zijn en keuze ervan bijgevolg vrijer is. Doordat een houten lattenwerk nodig is om deze gevelafwerking te bevestigen, zal de folie onderbroken worden (Figuur 40). Zoals bij het noppenplaatsysteem werd besproken, wordt de folie bevestigd met behulp van een inklemming in een noppenplaat aan weerszijden van het lattenwerk. Op die manier wordt de folie nergens doorboord wat het hergebruik ervan zal bevorderen. De noppenplaat wordt hier tegelijk gebruikt als bevestigingssysteem van de folie en als drainagelaag ter hoogte van de houten latten, waar de folie onderbroken is. De opbouw van dit systeem komt echter in de buurt van de afstandsschroevensystemen die eerder werden besproken en zal bijgevolg niet uitgebreid besproken worden.

### 4.2.3 VARIANTEN OP VERBINDINGSTECHNIEKEN BIJ VLIESGEVELS

Het gordijngesysteem scoorde in de circulariteitsbeoordelingsmethode van het vorige hoofdstuk goed voornamelijk doordat het bijna volledig bestaat uit omkeerbare verbindingen. Bij een elementgevel, een prefab systeem voor vliesgevels, komen deze ‘omkeerbare verbindingen’ zowel op materiaal- als elementniveau voor. De installatie van een elementgevel gebeurt op een efficiënte wijze en waardoor dit systeem vaak bij hoogbouw wordt toegepast (De Groot en Visser, 2021). De elementen worden via ankers aan de draagstructuur, vaak ter hoogte van de vloerplaat, bevestigd en worden op elkaar aangesloten met behulp van rubberen dichtingen die een lucht- en waterdichte aansluiting creëren en tegelijkertijd demonteerbaar zijn (Schüco, 2020). Er zal onderzocht worden hoe de basisconcepten van de verbindingen bij een elementgevel toegepast kunnen worden in nieuwe circulaire gevelrenovatiesystemen. Uit de principes van gordijngesystemen en elementgevels zullen drie systemen ontwikkeld worden: elementgevelverbindingen, gordijngesysteem en semi-structurele verlijming. Om voldoende inzicht te verschaffen in deze elementgevels, werd in het kader van deze masterproef een testopstelling opgebouwd en getest.

#### TESTOPSTELLING ELEMENTGEVEL

Deze testopstelling werd mogelijk dankzij een tweedaagse opleiding bij Reynaers Aluminium en bestaat uit een EF7 elementgevelsysteem (Reynaers Aluminium, 2021) van ongeveer 1,3 m x 1,3 m groot, waarin vier kaderelementen zitten. Het glas dat normaal in deze elementgevel zit wordt vervangen door een invulpaneel met betonplex. De voegen tussen de prefab elementen en de aansluiting met de invulpanelen worden in het labo van de UGent getest op lucht- en waterdichtheid. De opzet van de test is tweeledig; enerzijds is het de bedoeling om de kwaliteiten op vlak van lucht- en waterdichtheid van deze opstelling te testen en anderzijds verschaft deze test inzicht in de expertise van het systeem.

#### Testopstelling



Figuur 41: Testopstelling (links) en water lekkage bij test (rechts)

De testopstelling werd onderworpen aan constante watertoevoer met sproeiers aan 3,4 liter per minuut en stijgende overdruk van 150 Pa per 5 minuten. De test is gebaseerd op de norm ‘NBN EN 1027 waterdichtheid - ramen en deuren’, waarin water- en luchtdichtheidsklassen erkend worden op basis van drukverschillen. Het systeem behoort tot de water- en luchtdichtheidsklassen waarbij het faalt. De testopstelling vertoonde geen water langs de binnenzijde tot een overdruk van 2400 Pa. Bij

het bereiken van deze druk, kwam er water aan de binnenzijde van het systeem, zoals weergegeven op Figuur 41 (rechts). De druk werd verder verhoogd tot 3000 Pa, waardoor de hoeveelheid indringend water toenam.

### Opbouw testopstelling



Figuur 42: Opbouw testopstelling

De opbouw van een elementgevel, zoals weergegeven op Figuur 42, verloopt als volgt:

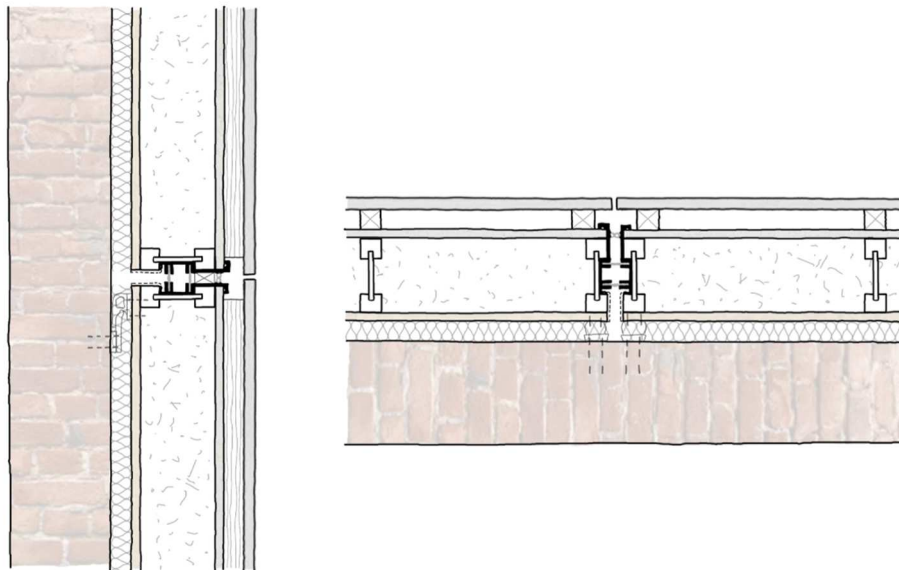
- (a) De kaderprofielen worden in elkaar gezet, ingevuld met het invulpaneel uit betonplex en waterdicht afgewerkt met een glaslat en rubbers langs binnen- en buitenzijde.
- (b) De opstand wordt onderaan de testopstelling gerealiseerd en de onder- en zijprofielen worden bevestigd aan de houten betonplex kader. Dit resulteert in een L-vorm.
- (c) De kaderprofielen worden geplaatst met de rubberen aansluiting tussen de randprofielen en de kaderprofielen en tussen de kaderprofielen onderling.
- (d) De zij- en bovenprofielen worden geplaatst en het betonplex kader wordt vervolledigd. De testopstelling is nu klaar om te testen.

Door de opbouw volledig zelf uit te voeren, werden inzichten gerelateerd aan de parameters uit de circulariteitsbeoordelingsmethode (hoofdstuk 3.2.3) verworven. De expertise nodig om deze gevelelementen te monteren en demonteren is relatief hoog. Het elementgevelsysteem is een gecompliceerd systeem dat voldoende inzicht vraagt om hiermee aan de slag te kunnen. De kaderelementen zijn onderling met elkaar verbonden via rubbers die in beide kaderelementen geklemd zitten en aan één kant ge vulkaniseerd zijn. Vulkanisatie is een lijmachtige verbinding die een lucht- en waterdichte aansluiting tussen de rubbers onderling en tussen de rubbers en de profielen tot stand brengt. Bij demontage moeten de rubbers wegens vulkanisatie echter weggesneden worden, en kunnen deze bijgevolg niet hergebruikt worden. De componenten zijn van beneden naar boven opgebouwd en zijn op die manier afhankelijk van elkaar. Wanneer een onderste element vervangen dient te worden, moeten bijgevolg de bovenliggende elementen tijdelijk weggehaald worden. De lagen onderling zijn omkeerbaar verbonden met behulp van schroeven en inklemmingen. Aangezien de verbindingen bijna uitsluitend demonteerbaar zijn uitgevoerd, is hergebruik op element- en materiaalniveau bij de elementgevel mogelijk.

Een elementgevelsysteem bezit buiten een hoge benodigde expertise veel potentieel voor circulariteit door een beperkte laagafhankelijkheid. Bijgevolg zullen op basis van de sterke eigenschappen uit dit systeem, twee variante systemen ontwikkeld worden.

## 4.2.3.1 ELEMENTGEVELVERBINDINGEN

## ALGEMEEN CONCEPT



Figuur 43: Opbouw lementgevelverbindingssysteem

Bij dit systeem (Figuur 43) staat de zoektocht naar een lucht- en waterdichte en tegelijk demonteerbare verbinding tussen gesloten panelen centraal. Zo worden de omkeerbare verbindingen van de elementgevel gebruikt om prefab houtskeletpanelen, met een efficiënte opbouw, op elkaar aan te sluiten op een circulaire manier. Er wordt geopteerd voor een gesloten paneel aangezien deze zonder bijkomend materiaal luchtdicht uitgevoerd kan worden. Op die manier worden de circulaire principes 'efficiënt materiaalgebruik' en 'omkeerbare verbindingen' gecombineerd in dit systeem.

## MATERIALEN

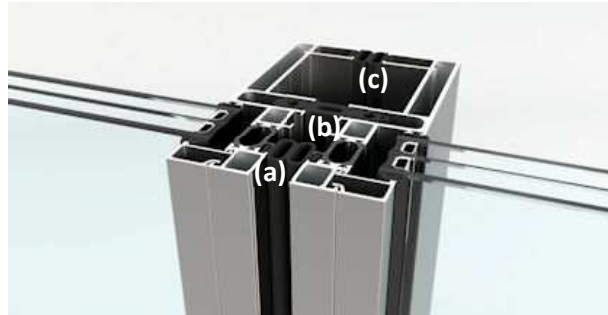
	Dikte- [mm]	Gewicht- [kg/m <sup>2</sup> ]	Brand	Water- dichtheid	Lucht- dichtheid
<i>Vezelcementplaten</i>	8	15,40	A2-s1, d0	X	
<i>Houten lattenwerk</i>	40	1,30	Incl.		
<i>Houtvezelplaat</i>	18	4,86	E	X	
<i>FJI-liggers</i>	180	3,20	A1		
<i>Cellulose isolatie</i>	180	8,10	D-s2,d0		
<i>Luchtdichte plaat</i>	15	9,45	D-s2,d0		X
<i>Rotswol</i>	40	1,60	A1		
<i>Aluminium randprofiel</i>	/	3,51	A1		
<i>Draagmuur</i>	/	/	/		
<i>Pleisterwerk</i>	/	/	/		
<i>Maatvoering</i>	Prefab				
<i>U-waarde</i>	0,23 W/m <sup>2</sup> K				

Tabel 28: Materialen paneel van elementgevelverbindingen



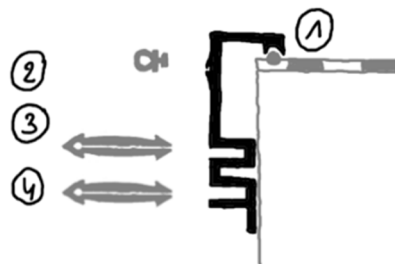
### Rubberen dichtingen

De rubberen dichtingen binnen een elementgevel zitten telkens geklemd in aluminium profiel en bestaan uit drie lagen (Figuur 44): (a) een ballondichting, de eerste water barrière, (b) een tweede rubberen dichting die de definitieve water barrière vormt en (c) een derde rubber die voor een luchtdichte afsluiting zorgt (Schüco, 2020).



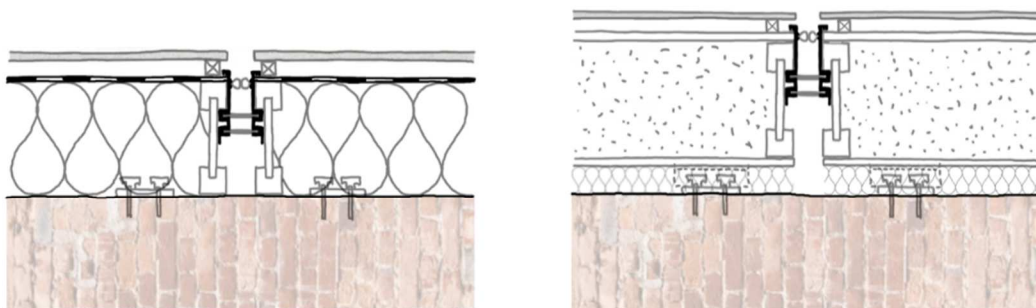
Figuur 44: Schüco elementgevelprofiel (Schüco, 2020)

Voor de geprefabriceerde houtskeletpanelen zal een aluminium profiel ontworpen worden dat de rubbers kan huisvesten en op de panelen bevestigd kan worden (Figuur 45). Om een doorlopende waterdichting te verkrijgen wordt rubber 1, een schoenveterverbinding, toegepast om het aluminium profiel waterdicht op het houtskeletpaneel aan te sluiten. Zoals bij de originele elementgevel, vormen rubbers 3 en 4 de waterdichting. Rubber 2 is een ballondichting en zorgt onder andere voor een esthetische afwerking aan de buitenzijde.



Figuur 45: Aluminium profiel met rubberen dichtingen

### Prefab houtskeletpaneel



Figuur 46: Toepassing elementgevelverbinding op (links) open houtskeletpaneel en (rechts) gesloten houtskeletpaneel

Het ontworpen verbindingssysteem kan zowel voor open als gesloten houtskeletpanelen gebruikt worden (Figuur 46). De rubberen dichtingen vormen een lucht- en waterdichte aansluiting tussen de

panelen onderling. In deze geprefabriceerde open en gesloten houtskeletpanelen zorgen respectievelijk het regenscherm en de waterdichte houtvezelplaat voor de waterdichte laag. De luchtdichte aansluiting creëert een opportuniteit in het volledig luchtdicht afwerken van het systeem. Op die manier rekent dit systeem niet op een binnenaafwerking uit pleister, maar is het luchtdicht op zich. Bij een gesloten houtskeletpaneel wordt de luchtdichtheid tot stand gebracht met een luchtdichte plaat zoals Vapourblock (Durelis, 2016) aan de binnenzijde. Het is echter wel nodig om een dampscherm te monteren die de brug maakt tussen de rubberen dichtingen en de Vapourblock-plaat. Om een open houtskeletpaneel luchtdicht te realiseren moet een dampscherm toegevoegd worden over de volledige oppervlakte van het paneel. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een gesloten prefab paneel.

### Gevelafwerking

Opnieuw wordt gekozen voor de gevelafwerking met de laagste milieukost, een Equitone vezelcementplaat (hoofdstuk 4.2.1.1). De gevelafwerking kan mee opgenomen worden in de geprefabriceerde module, maar ter hoogte van de aansluitingen is het eenvoudiger deze ter plaatse uit te voeren. Op die manier zijn de achterliggend ankers en voegen makkelijker toegankelijk.

### Plaatsing

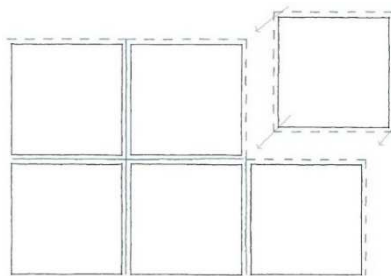


Figuur 47: Verankering AA9562 elementgevel (Kawneer, 2021)

Net zoals bij de elementgevels worden de panelen aan de draagstructuur bevestigd met een anker (Figuur 47) en kunnen ze ook zo uitgelijnd worden (Kawneer, 2021). In tegenstelling tot een klassiek elementgevelsysteem, waarbij geen (draag)muren aanwezig en de ankers langs binnenuit toegankelijk zijn, is dit hier enkel langs buiten mogelijk. Zoals weergegeven op Figuur 48, bevinden de ankers van het ene paneel zich deels onder de omliggende panelen. Dit zorgt ervoor dat de inregeling van het systeem direct bij de plaatsing moet gebeuren, aangezien de ankers achteraf niet meer toegankelijk zijn. Door deze achterliggende ankers zijn de panelen onderling afhankelijk van elkaar.

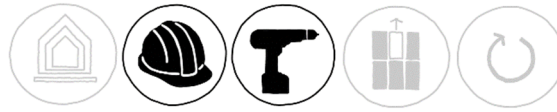
De plaatsing gebeurt als volgt:

- (a) Het installeren en uitlijnen van de ankers op de draagmuur
- (b) Plaatsing van de geprefabriceerde houtskeletmodules en uitlijnen ervan
- (c) Plaatsing van de gevelafwerking ter hoogte van de aansluitingen van de panelen onderling

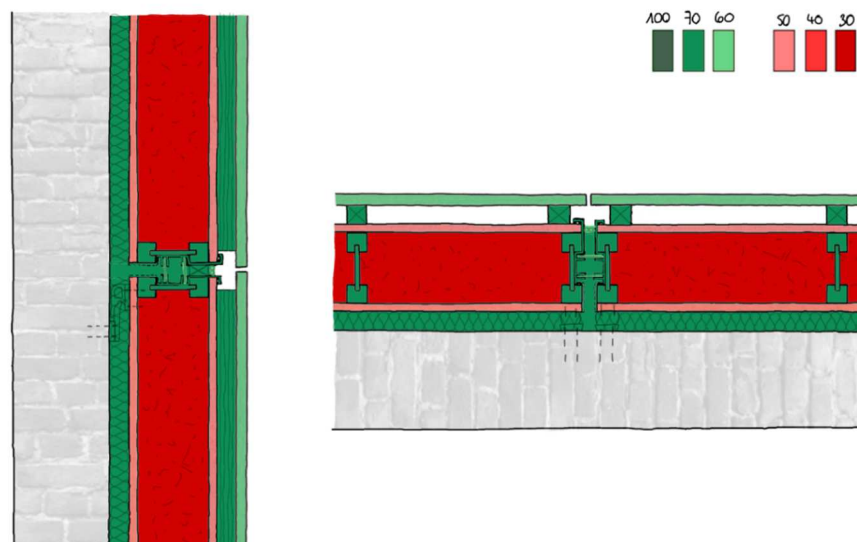


Figuur 48: Plaatsing systeem elementgevelverbindingen

## CIRCULAIR EIGENSCHAPPEN



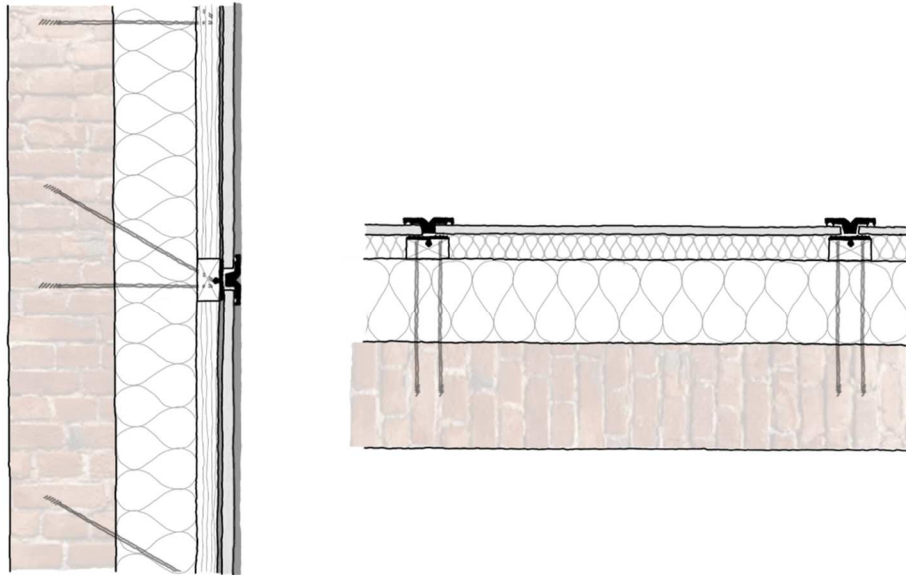
Dit systeem bestaat uit prefab panelen, die ter plaatse op elkaar aangesloten worden met behulp van een aluminium profiel met rubbers. Op die manier kan deze verbinding op een demonteerbare, lucht- en waterdichte manier uitgevoerd worden. De houtskeletpanelen zijn volledig demonteerbaar opgebouwd en hebben bijgevolg een beperkte laagafhankelijkheid. De prefabricatie van het paneel zorgt ervoor dat zowel hergebruik op materiaalniveau als elementniveau mogelijk is. Daarbovenop zorgt dit prefab systeem voor toegankelijk systeem waar weinig expertise voor nodig is. Zoals weergegeven op Figuur 49, volgt de opbouw van het gesloten houtskeletpaneel de gelaagdheid van de levensduren niet. Materialen met een relatief korte technische levensduur, cellulose isolatie en de platen, zitten ingesloten achter materialen met een langere levensduur.



Figuur 49: Levensduren van elementgevelverbindingssysteem

## 4.2.3.2 GORDIJNGEVELSYSTEEM

## ALGEMEEN CONCEPT



Figuur 50: Opbouw gordijngesysteem

De zoektocht naar een minimum aan materialen resulteert in het gebruik van afstandsschroeven in combinatie met het inklemmingsprincipe van een gordijngewel. In dit systeem (Figuur 50) wordt een gevelafwerking volledig demonteerbaar ingeklemd op een lucht- en waterdichte manier, waardoor het gevelmateriaal eveneens fungeert als lucht- en waterdichting.

## MATERIALEN

	Dikte- [mm]	Gewicht- [kg/m <sup>2</sup> ]	Brand	Water- dichtheid	Lucht- dichtheid
Rockpanel	8	8,00	A1	X	X
Aluminium klemlijst	/	1,14	A1	X	X
Houten lattenwerk	40	1,30	Incl.		
Rotswol isolatie	145	5,80	A1		
Draagmuur	/	/	/		
Pleisterwerk	/	/	/		X
Maatvoering	In situ				
U-waarde	0,23 W/m <sup>2</sup> K				

Tabel 29: Materialen gordijngesysteem

Het systeem, weergegeven in Tabel 29, bestaat voornamelijk uit twee materialen: rotswol en een gevelafwerking. De gevelafwerking wordt met een aluminium klemlijst vastgezet op een houten lattenwerk dat met afstandsschroeven aan de draagmuur is bevestigd. De rotswolisolatie wordt

tussen deze afstandsschroeven en het lattenwerk geklemd en is op die manier volledig demonteerbaar geplaatst.

#### Inklemming met klemlijst

Zoals eerder besproken, wordt een inklemming door middel van een klemlijst bij gordijngevelsystemen toegepast (Stabalux, 2021). Dit principe wordt hier toegepast om de gevelafwerking te bevestigen. Deze aansluiting wordt lucht- en waterdicht beschouwd door de rubbers tussen het lattenwerk, de klemlijst en de gevelafwerking. Op die manier doet de gevelafwerking ook dienst als waterdichting. Aangezien deze rubbers ontworpen zijn om glas te bevestigen bij gordijngevels, werd in de testopstelling (hoofdstuk 4.2.3) onderzocht of dit principe toegepast kan worden bij andere materialen. De waterdichting in de test bleek geen problemen te vormen, wat vertrouwen geeft in dit systeem.

Aangezien de aansluiting met rubbers en een aluminium klemlijst luchtdicht is, kan de luchtdichtheid eveneens in dit systeem geïntegreerd worden wanneer het gevelmateriaal zelf luchtdicht is. Op die manier moet er niet gerekend worden op de binnenafwerking in pleister om de luchtdichting te verwezenlijken. Echter moet er bij een luchtdichte gevelafwerking aandacht besteed worden aan de omstandigheden bij plaatsing. De draagmuur en de isolatie moeten zo droog mogelijk zijn, aangezien uitdroging langs de buitenkant verhinderd wordt. Is dit niet het geval, dan kan vocht gevangen blijven tussen de draagmuur en gevelafwerking wat kan resulteren in verminderde prestaties.

#### Gevelafwerking

Omdat de gevelafwerking wordt bevestigd via inklemming tussen de houten draagstructuur en de klemlijst, zal geopteerd worden voor een materiaal met beperkt gewicht. Om die reden wordt gekozen voor een Rockpanel (hoofdstuk 4.2.2.1). Indien er om specifieke redenen een zwaardere gevelafwerking of invulling geplaatst moet worden, kan dit opgelost worden door ook een zwaardere draagstructuur (bv. houten lattenwerk met grotere afmetingen en aangepaste verbindingen), te gebruiken. Eveneens voor de integratie van schrijnwerk (dat ook een zwaarder gewicht heeft) kan dit systeem toegepast worden.

#### Installatie

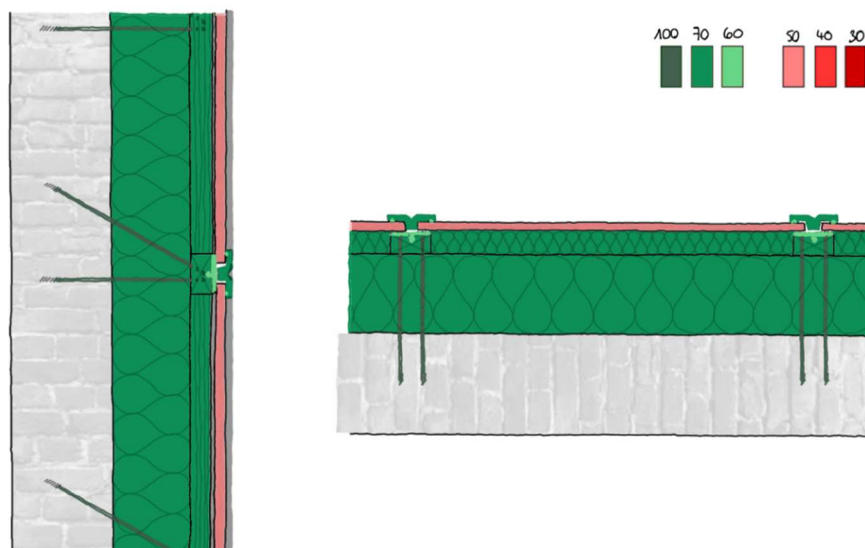
De installatie van het systeem verloopt als volgt:

- (a) De verticale en horizontale latten worden uitgelijnd en met afstandsschroeven bevestigd
- (b) De rotswol isolatie wordt geplaatst tussen de rastering
- (c) Op de latten worden de overeenkomstige rubbers geplaatst
- (d) De klemlijsten zorgen ervoor dat de gevelafwerking, die tegelijk geplaatst wordt, vast komt te zitten

## CIRCULAIR EIGENSCHAPPEN



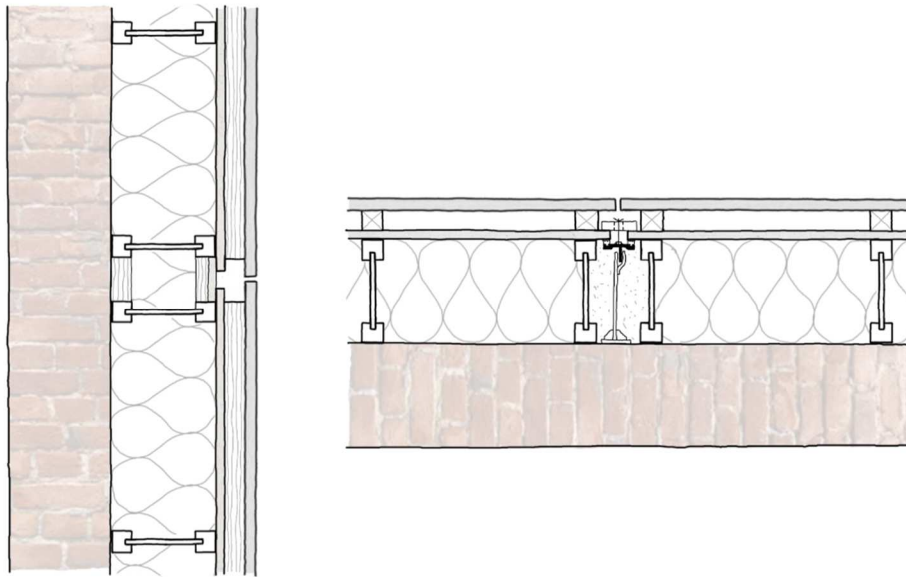
Het systeem combineert een efficiënt gebruik van materialen met de demonteerbare, lucht- en waterdichte verbindingen van de gordijngevel. Het efficiënt materiaalgebruik komt tot stand doordat de gevelafwerking ook functioneert als waterdichting. Het systeem heeft een eenvoudige opbouw die grotendeels bestaat uit slechts twee materialen. De belangrijkste materialen in deze configuratie, rotswol en de gevelafwerking, worden ingeklemd en zonder beschadiging geplaatst. Echter zorgt de plaatsing van de rubbers met vulkanisatie voor problemen bij hergebruik. Wanneer de materialen gedemonteerd worden zorgt deze vulkanisatie echter voor beschadiging van de rubber. Figuur 51 maakt duidelijk dat de materialen in deze opbouw volledig met oplopende technische levensduur naar binnen toe zijn geplaatst. Het systeem voldoet bijgevolg aan 'gelaagdheid volgens levensduur' en heeft voornamelijk materialen met een levensduur langer dan 60 jaar.



Figuur 51: Levensduren van gordijngevelsysteem

## 4.2.3.3 SEMI-STRUCTURELE VERLIJMING

## ALGEMEEN CONCEPT



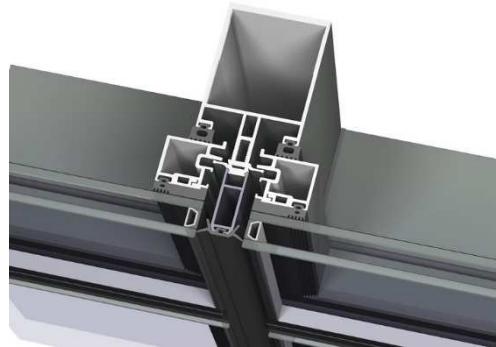
Figuur 52: opbouw semi-structurele verlijming

Dit systeem, weergegeven op Figuur 52, creëert een eenvoudig en volledig omkeerbare bevestiging van prefab panelen. De prefab panelen worden bevestigd door middel van een inklemmingsprincipe gebruikt bij semi-structurele verlijming van gordijngewels. Dit systeem creëert een 'slotje' dat de panelen op een vlotte manier bevestigd tegen de draagmuur. Aangezien een open houtskeletpaneel een lage milieukost en licht gewicht heeft, wordt deze hier toegepast. Er wordt geambieerd om variabele maatvoering mogelijk te maken aan de hand van uitbreidbare voegen.

## MATERIALEN

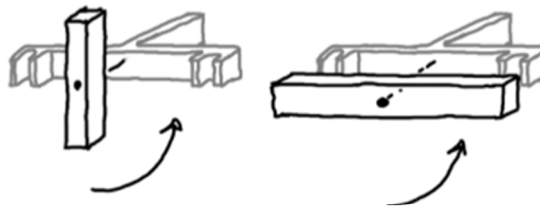
	Dikte- [mm]	Gewicht- [kg/m <sup>2</sup> ]	Brand	Water- dichtheid	Lucht- dichtheid
<i>Keramisch materiaal</i>	12	30,0	A2-s1,d0	X	
<i>Houten lattenwerk</i>	40	1,30	Incl.		
<i>Houtvezelplaat</i>	18	4,86	E	X	
<i>FJI-liggers</i>	140	3,20	A1		
<i>Rotswol isolatie</i>	140	5,60	D-s2,d0		
<i>Aluminium structuur</i>	140	1,03	A1		
<i>Draagmuur</i>	/	/	/		
<i>Pleisterwerk</i>	/	/	/		X
<i>Maatvoering</i>	Prefab				
<i>U-waarde</i>	0,23 W/m <sup>2</sup> K				

Tabel 30: Materialen semi-structurele verlijming

Semi-structurele verlijming

Figuur 53: CW60-SG gordijngevelprofiel (ReynaersAluminium,2021)

De semi-structurele-verlijming wordt bij gordijngevels met verborgen profielen toegepast zoals weergegeven op Figuur 53. Dit systeem bestaat uit een dubbele lat die instaat voor de inklemming van het glaspaneel in het profiel. Deze lat ontvangt in zijn smalste vorm de twee panelen en wordt vervolgens opgedraaid tot een bredere vorm, wat de panelen op zijn plaats klemt. Dit continue systeem met een uitschuivende lat kan op opgevat worden als een lokale bevestiging via draaiende staafjes.



Figuur 54: Detail semi-structurele verlijming

Gebaseerd op dit inklemmingsprincipe wordt hier de verticale aansluiting van de panelen ontworpen. De ontworpen verbinding (Figuur 54) bestaat uit een doorlopend U-profiel, dat zorgt voor een waterdichte afsluiting met behulp van rubbers, waarop lokale draaiende staafjes ('slotjes') het systeem vastklemmen. Dit maakt het mogelijk om de gevelpanelen onafhankelijk van elkaar te kunnen plaatsen en weghalen. De open ruimte ter hoogte van de verankering kan benut worden om marges bij de plaatsing op te nemen en wordt aangevuld met randisolatie. De uitregeling van het gevelsysteem zal gebeuren door de U-profielen. De panelen zelf steunen af op de draagstructuur met behulp van afsteunvlakken die in de U-profielen geïntegreerd worden. Ter hoogte van de horizontale voegen zijn er geen profielen voorzien om de randen op elkaar aan te sluiten, maar de onderkant van elke module wordt afgewerkt met een strook zachte isolatie die de verticale speling tussen de panelen kan opvangen en een waterkerende folie die met overlap geplaatst zal worden.



## Gevelafwerking

In tegenstelling tot andere systemen werd bij dit systeem bewust niet gekozen voor de gevelafwerking met de kleinste milieukost, maar voor een alternatief. Door het robuuste karakter, de lange technische levensduur (Tabel 31), de kleine afmetingen en het feit dat de gevelbekleding al prefab uitgevoerd kan worden, werd hier gekozen voor keramische tegels met aluminium draagstructuur (Dekton, 2021). Op die manier hebben de verschillende systemen verschillende types gevelbekleding, wat een interessant vergelijkend onderzoek kan opleveren.

<i>Materiaal</i>	<i>Milieukost (€/m<sup>2</sup>) (TOTEM,2021)</i>
<i>Vezelcementplaat</i>	4,8
<i>Rotswolvezelplaat</i>	7,2
<i>Keramische tegels</i>	21,1

<i>Materiaal</i>	<i>Levensduur (jaar)</i>
<i>Vezelcementplaat</i>	37 (NIBE, 2021), >60 (TOTEM,2021)
<i>Rotswolvezelplaat</i>	30 (TOTEM,2021), 60 (Rockpanel, 2021)
<i>Keramische tegels</i>	> 60 (TOTEM,2021), 75 (NIBE,2021)

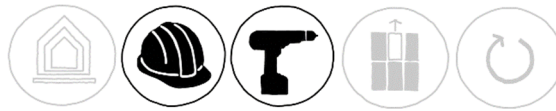
Tabel 31: Vergelijking van milieukost en technische levensduur afwerkingsmaterialen

## Plaatsing

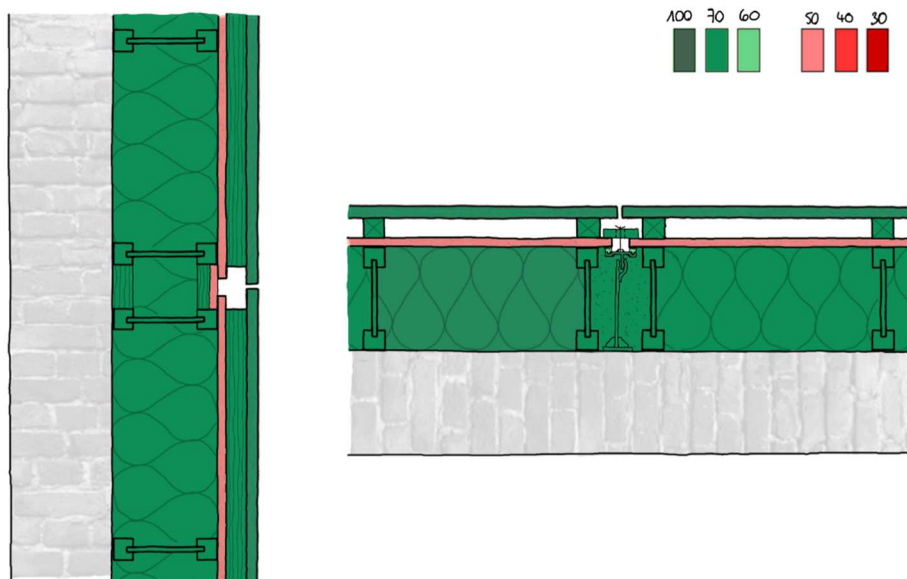
De plaatsing van het systeem wordt als volgt uitgevoerd:

- (a) De ankerpunten voor verticale U-profielen worden geplaatst en uitgelijnd.
- (b) De U-profielen worden geplaatst en op elkaar uitgelijnd zodat alles in eenzelfde vlak ligt.
- (c) De geprefabriceerde panelen inclusief gevelbekleding worden geplaatst met een kraan en op hun plaats ingeklemd
- (d) Ten slotte worden de voegen afgewerkt.

## CIRCULAIR EIGENSCHAPPEN



De prefabricatie van het paneel zorgt ervoor dat zowel hergebruik op materiaal- als elementniveau mogelijk is. Daarbovenop is er voor dit prefab systeem weinig expertise vereist: de semi-structurele verlijming bevestigt het paneel op een eenvoudig demonteerbare manier tegen de draagstructuur. Het paneel zelf bestaat uit volledig demonteerbare, onafhankelijke lagen. Zoals weergegeven op Figuur 55, wordt de houtvezelplaat ingesloten tussen materialen met een langere levensduur. Behalve deze vezelplaat hebben alle materialen een levensduur langer dan 60 jaar.



Figuur 55: Levensduren van semi-structurele verlijmingssysteem

## 4.3 CONCLUSIE

### VARIANTEN OP HOUTSKELETSYSTEMEN

In deze eerste categorie staat de zoektocht naar een minimum aan materialen binnen houtskeletsystemen centraal. Dit uit zich in een prefab en in situ afstandsschroefstelsel, respectievelijk gebruik makend van een houtvezelplaat en een regenscherm als waterdichting. In het prefab afstandsschroefstelsel verwijzen de houtvezelplaat daarbovenop ook de stijfheid van het paneel. Deze plaat is met tand- en groef verbonden, wat zorgt voor afhankelijke componenten. Het in situ-systeem heeft een regenscherm dat volledig bevestigd is met behulp van een klemlijst, wat ervoor zorgt dat deze zonder beschadiging geplaatst wordt. In beide systemen worden alle materialen volledig demonteerbaar bevestigd met schroefverbindingen of inklemmingen. In beide systemen heeft de waterdichtingslaag een relatief korte technische levensduur en is ingesloten tussen materialen met een langere levensduur. Een optimalisatie hiervoor zou bestaan uit een water barrière met langere technische levensduur.

### VARIANTEN OP ETICS

De tweede categorie gevelrenovatiesystemen streeft eveneens naar een minimum materiaalgebruik en combineert de sterktes van het ETICS-systeem met circulaire eigenschappen. Dit resulteert in twee systemen: het XPS-systeem en het noppenplaat systeem. Beide systemen gebruiken harde isolatieplaten die recht op elkaar aansluiten, met pluggen zijn bevestigd en waarop een demonteerbare gevelafwerking komt. Het XPS-systeem creëert een minimum aan materialen door de XPS-isolatie eveneens in te zetten als waterdichting. De noppenplaat demonstreert het efficiënt materiaalgebruik door een waterdichtingsfolie als gevelafwerking in te zetten. Daarbovenop wordt deze (hergebruikte) folie volledig demonteerbaar met minimale snijverliezen geplaatst. Echter moet de folie die geplaatst wordt voldoen aan de brandeisen en idealiter schokbestendig zijn.

### VARIANTEN OP VERBINDINGSTECHNIEKEN VLIESGEVEL

De derde categorie focust op volledig omkeerbare verbindingen afgeleid van vliesgevels. Er werd onderzocht hoe de basisconcepten van de demonteerbare, lucht- en waterdichte verbindingen bij een elementgevel toegepast kunnen worden in circulaire gevelrenovatiesystemen. Dit resulteerde in drie systemen: de elementgevelverbindingen, gordijngelvelsysteem en semi-structurele verlijming. Het gordijngelvelsysteem bestaat uit een gevelafwerking die lucht- en waterdicht ingeklemd wordt. Op die manier bestaat dit systeem grotendeels uit twee materialen, een isolatiemateriaal en gevelafwerking, die volledig demonteerbaar en zonder beschadiging bevestigd worden. De elementgevelverbindingen en semi-structurele verlijming zijn in tegenstelling tot het gordijngelvelsysteem geprefabriceerd. Deze systemen combineren de algemene opbouw van een houtskeletpaneel met de verbindingstechnieken van vliesgevels. De houtvezelplaten in de algemene opbouw van houtskeletsystemen gaan in tegen het circulaire principe gelaagdheid volgens levensduur. Een optimalisatie zou hier bestaan uit een beplating met lange technische levensduur. Beide systemen streven naar een eenvoudige, onafhankelijke, lucht- en waterdichte en tegelijk demonteerbare aansluiting tussen de panelen onderling.

In de ontwikkeling van de systemen werd er gebotst op secundaire eigenschappen zoals brandeisen, materiaaleigenschappen van producenten etc. De systemen moesten hierop afgestemd worden, waardoor verschillende varianten ontwikkeld werden. Dit resulteerde in een specifiek onderzoek dat circulaire aspecten combineert met de basisaspecten van een gevel. In dit onderzoek uitte de zoektocht naar circulaire bouwmethodes zich in een veelal in een zoektocht naar demonteerbare verbindingstechnieken en efficiënt materiaalgebruik.

## 5 SCENARIO'S: PRAKTISCHE UITWERKING

Uit de eigen, circulaire gevelrenovatiesystemen worden drie systemen geselecteerd om verder te onderzoeken. Deze zullen in de twee laatste hoofdstukken getoetst worden op vlak van circulariteit met behulp van twee fictieve scenario's, opgebouwd met casestudies. Binnen de concrete randvoorwaarden van deze twee vooropgestelde scenario's worden de gevelrenovatiesystemen getoetst aan de parameters uit de eerder gebruikte circulariteitsbeoordelingsmethode. In dit hoofdstuk ligt de focus op de praktische uitwerking van de gevelrenovatiesystemen in deze scenario's. De parameters expertise, componentafhankelijkheid, laagafhankelijkheid en flexibiliteit voor hergebruik worden in detail geanalyseerd.

### 5.1 ONDERZOEKSMETHODE

Uit de drie categorieën gevelrenovatiesystemen die ontwikkeld werden in hoofdstuk 4.2 wordt telkens een systeem geselecteerd dat verder onderzocht zal worden. Er wordt gekozen voor het gordijngevelsysteem, dat als enige uit zijn categorie geen houtskeletpaneel gebruikt. Binnen de varianten van het ETICS-systeem is het XPS-systeem het meest realistische met bestaande materialen. Ten slotte werd er het prefab afstandsschroefstelsel toegevoegd om een verscheidenheid aan types systemen te bekomen. Deze systemen zullen verder onderzocht en vergeleken worden met een ETICS-referentiesysteem.

#### 5.1.1 PRAKTISCHE UITWERKING

De geselecteerde systemen worden onderworpen aan de praktische uitwerking van twee vooropgestelde scenario's. Beide scenario's zijn 60 jaar lang, wat wordt beschouwd als de gemiddelde technische levensduur van een gebouw (Van Steenkist, 2012), maar hebben verschillende invullingen.

##### 5.1.1.1 SCENARIO 1: 60 JAAR OP STERRE S4

In het eerste scenario wordt het gevelrenovatiesysteem op de Sterre S4 geplaatst en blijft het daar 60 jaar lang. Dit eerste scenario onderzoekt hoofdzakelijk de circulaire parameters expertise en component- en laagafhankelijkheid.

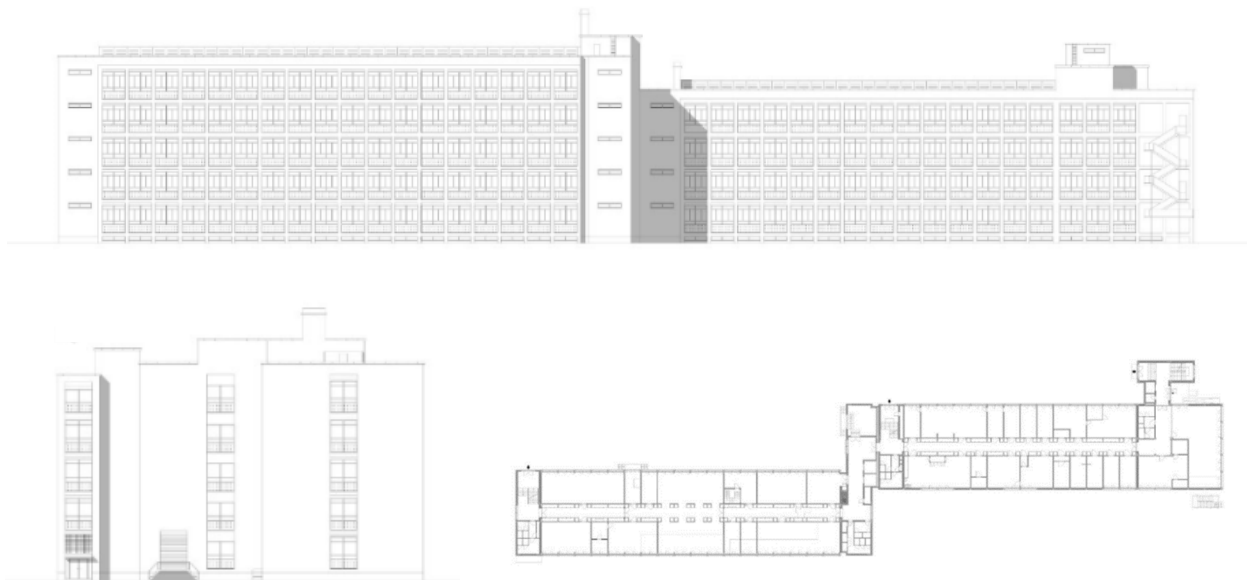
##### STERRE S4

De Sterre S4 werd in het kader van het EURECA-project vooropgesteld als case study. Het S4-gebouw is gelegen op campus Sterre zoals weergegeven op Figuur 56 en is representatief voor deze site met vijf gebouwen van dezelfde typologie.



Figuur 56: Inplantingsplan Sterre S4 (Google Earth, 2021)

Dit gebouw is middelhoog en heeft open en gesloten façadedelen, wat het relevant maakt om de ontworpen gevelrenovatiesystemen aan te toetsen. Het raster van de open façadedelen bestaat uit stroken van 40 cm breed. Op Figuur 57 zijn de gevels en een verdieppingsplan van het gebouw weergegeven.



Figuur 57: Gevels en plan S4 de Sterre

Uit de originele plannen kan afgeleid worden dat er zich geen isolatiemateriaal in de gevelopbouw bevond, wat resulteert in het verwijderen van de gevelafwerking om een vrijgemaakt binnenspouwblad te bekomen.

### FABRICATIE (0 JAAR)

Wanneer het systeem bestaat uit prefab panelen, wordt in eerste instantie uiteengezet hoe de panelen gefabriceerd worden. Een gedetailleerd stappenplan voor de opbouw van het paneel wordt besproken.

### MONTAGE (1 JAAR), EXPERTISE

De tweede stap bij prefab systemen of de eerste bij in situ systemen bestaat uit het monteren van het gevelrenovatiesysteem op de Sterre S4. Voor de opbouw van het systeem wordt een stappenplan uitgetekend. Bij de prefab systemen wordt er aandacht besteed aan de maatvoering van de panelen

en hoe deze op de gevel geplaatst worden. Daarnaast wordt bij zowel in situ als prefab systemen het schrijnwerk geïntegreerd in het gevelrenovatiesysteem met behulp van een uitgetekende raamaansluiting. Bij deze raamaansluiting wordt extra aandacht gevestigd op de mogelijkheden om schrijnwerk in de loop van het scenario te vervangen. Schrijnwerk heeft namelijk een beperkte levensduur van ongeveer 30 jaar (TOTEM, 2021). Door de montage van de gevel te overlopen kan inzicht verschaft worden in de expertise van het gevelrenovatiesysteem.

#### LOKALE SCHADE (1-60 JAAR), COMPONENT- EN LAAGAFHANKELIJKHEID

Er wordt een fictieve situatie aangenomen waarbij een vooropgestelde zone in de gevel 'aangetast' is. Dit uit zich in een 'worst case'-scenario met een beschadiging op een kritieke plaats. Deze aantasting kan het gevolg zijn van een impact van buitenaf, onderliggend defect, materiaalprobleem etc. en vraagt om een lokale vervanging. Voor ieder systeem moeten alle materialen van de opbouw die zich in de 'aangetaste' zone bevinden, vervangen worden. Deze lokale schade geeft voornamelijk informatie over de component- en laagafhankelijkheid van de gevelrenovatiesystemen.

#### DEMONTAGE (>60 JAAR), EXPERTISE

Na 60 jaar wordt het systeem op de Sterre S4 gedemonteerd. Vergelijkbaar aan de montage beschrijft deze demontage de graad van moeilijkheid en bijgevolg de expertise nodig bij demontage van het systeem.

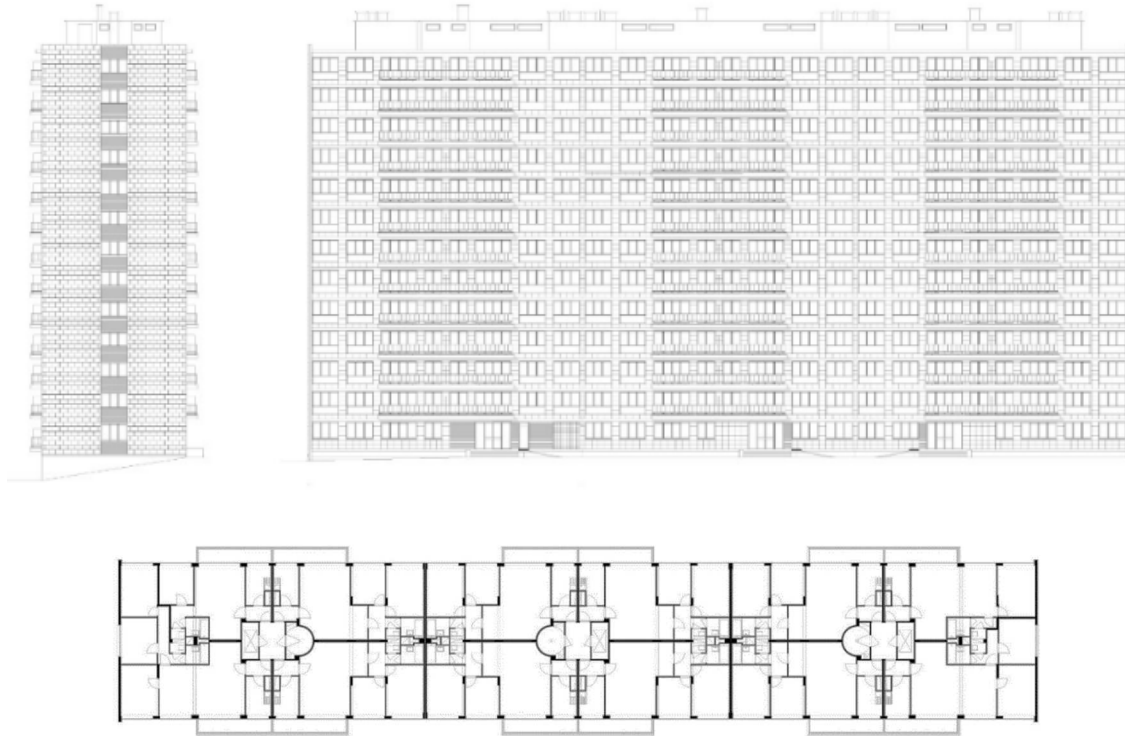
#### 5.1.1.2 SCENARIO 2: VAN STERRE S4 NAAR ETRIMO

Het begin van dit scenario loopt gelijk met scenario 1, maar na 30 jaar wordt het systeem gedemonteerd van de Sterre S4. Vervolgens wordt hetzelfde systeem op een Etrimo woontoren geplaatst, voor een periode van 30 jaar. Op die manier wordt in dit scenario de focus gelegd op de flexibiliteit voor hergebruik van het gevelrenovatiesysteem. Er wordt onderzocht hoe een systeem, ontworpen voor een specifiek gebouw, aangepast kan worden aan een ander gebouw. Dit scenario geeft op die manier een beeld over de circulaire parameter flexibiliteit voor hergebruik.



Figuur 58: Inplantingsplan Etrimo

De Etrimo woontoren werd eveneens in het kader van het EURECA-project vooropgesteld als case study. Zoals weergegeven op Figuur 58, zijn er op de site meerder gebouwen van dit type aanwezig. De opbouw van de gevels is weergegeven op Figuur 59 en is vergelijkbaar met de gevels van de Sterre S4. Deze hoogbouw heeft eveneens gesloten en open façadedelen. Het raster van de open façade bestaat uit stroken van 60 cm breed, wat een derde breder is dan deze van de Sterre S4.



Figuur 59: Gevels en plan van Etrimo

### MONTAGE (30 JAAR), FLEXIBILITEIT VOOR HERGERBUIK

De montage van het hergebruikte gevelrenovatiesysteem op de Etrimo woontoren wordt gedetailleerd uitgetekend en beschreven. Er wordt uitgegaan van een 'Urban mining'-principe waarbij het aantal herbruikbare materialen groot genoeg is om de volledige gevel te bekleden. De aandacht gaat voornamelijk uit naar welke materialen hergebruikt kunnen worden vanop de Sterre S4 en hoe het systeem aangepast kan worden.

Na de montage blijft het systeem nog 30 jaar op deze Etrimo woontoren, om uiteindelijk opnieuw gedemonteerd te worden. Aangezien de demontage op de Etrimo nauwelijks verschilt van de Sterre S4, zal deze hier niet meer aan bod komen.



## 5.2 RESULTATEN

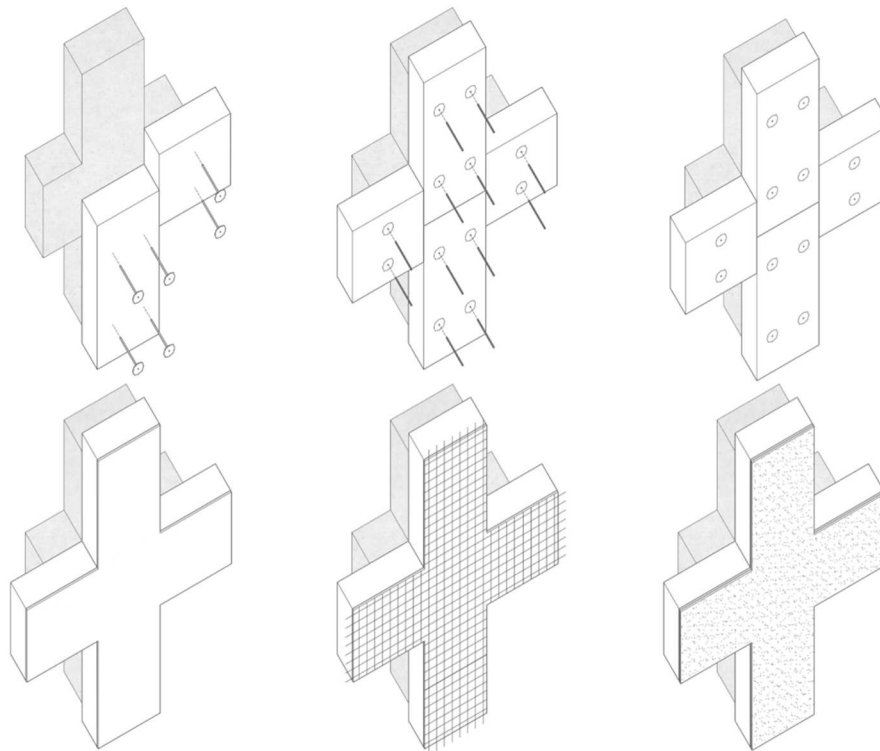
## 5.2.1 ETICS-SYSTEEM (REFERENTIE)

## 5.2.1.1 SCENARIO 1: 60 JAAR OP STERRE S4

## MONTAGE

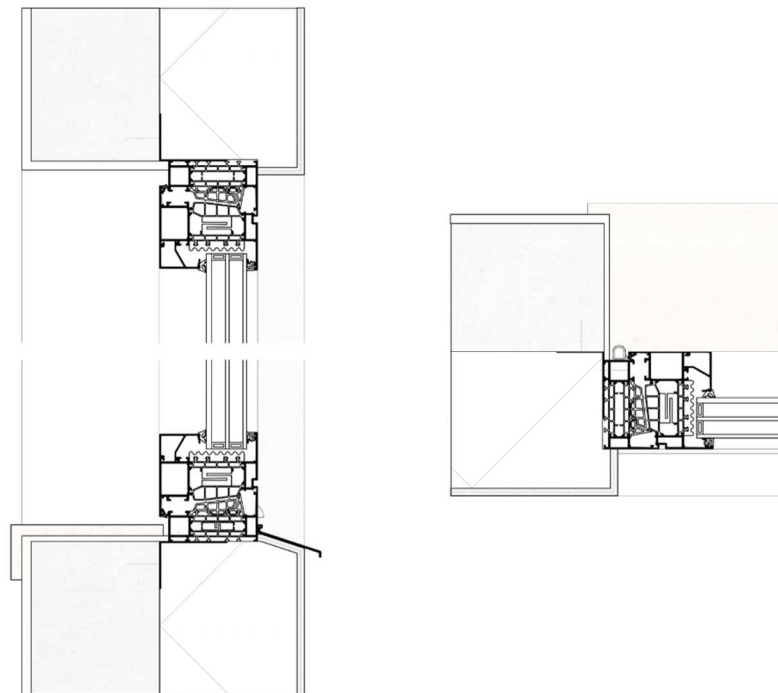
Zoals weergegeven op Figuur 60, wordt op het vrijgemaakte binnenspouwblad de EPS-isolatie in eerste instantie via lijm bevestigd. De EPS-panelen worden recht op recht aangesloten aangezien de naad beschermd zal zijn door de pleisterlaag. Bij elk paneel worden na positionering isolatiepluggen voorgeboord en geïnstalleerd. In een volgende stap worden de isolatieplaten verankerd door de pluggen vast te zetten in de structuur. Dit gebeurt door een sluitpin die in elke plug wordt geschoven en zo zorgt voor een volumetoename die de fixatie verzekert. Eenmaal de isolatie op zijn plek is geïnstalleerd blijft deze onbeschermd tot het gehele geveloppervlak is bedekt. Het continue karakter van de pleisterlaag verlangt ernaar in één keer uitgevoerd te worden. Als eerste laag komt een grondpleister op de isolatie, daarbovenop wordt de wapeningen geplaatst. Een afwerkingspleister bedekt vervolgens het geheel en zorgt voor een egale afwerking van het gevelvlak.

*De montage van de isolatielaag verloopt klassiek via lijm, isolatiepluggen en recht op recht aansluitingen. Het aanbrengen van de pleisterlagen is een meer gespecialiseerde taak waar een opleiding voor nodig is. Deze pleisterlaag zorgt voor hogere moeilijkheidsgraad bij de montage van dit systeem.*



Figuur 60: ETICS-systeem, montage op de Sterre S4

### Integratie van het schrijnwerk



Figuur 61: ETICS-systeem, raamaansluiting detail

Bij een ETICS-systeem is het mogelijk eenvoudige aansluitingsdetails te ontwerpen. Door de ééntrepsdichting, verwezenlijkt via de pleisterlaag, kan het gebruik van folies bij aansluitingen tot een minimum beperkt worden. Voldoende aandacht dient echter uit te gaan naar de aansluiting van pleister op andere materialen (zoals de ramen en vensterbanken) om scheuren in het pleisterwerk te vermijden.

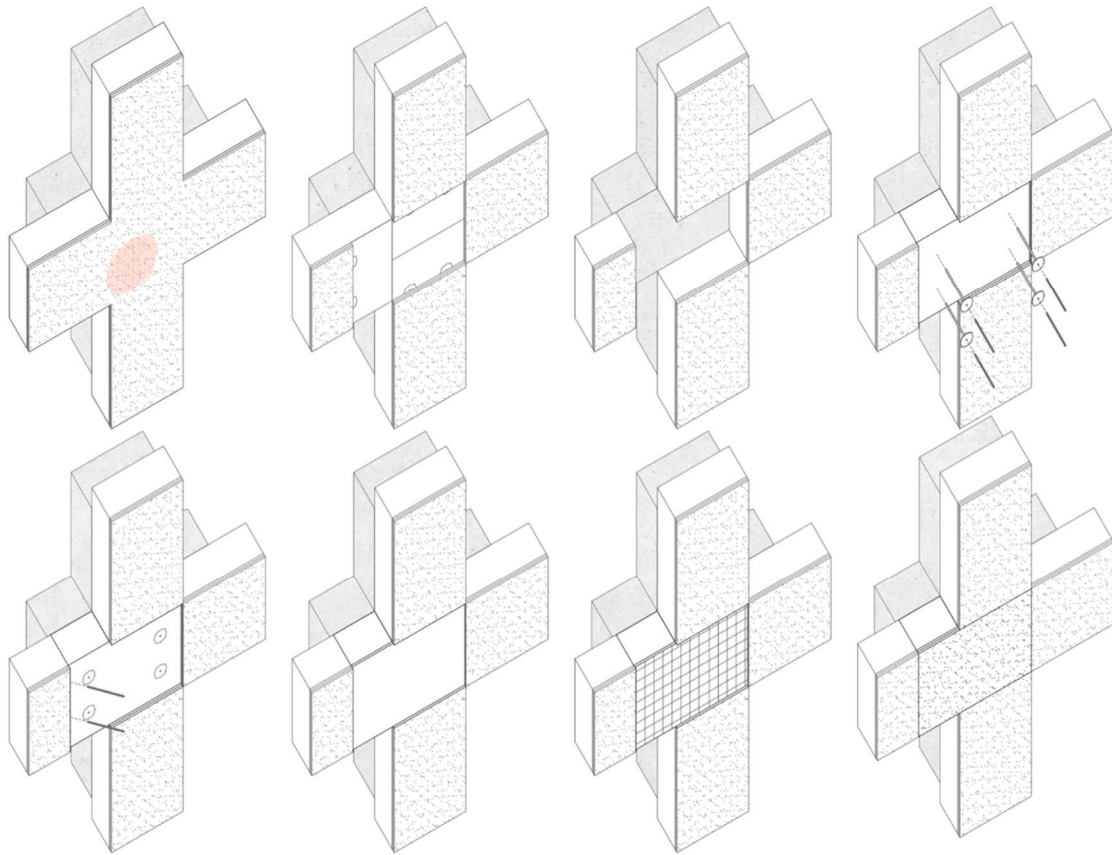
Op Figuur 61 is weergegeven dat de verankering van het schrijnwerk aan het binnenspouwblad voor moeilijkheden zal zorgen bij een vervanging. Zowel de pleister- als isolatielaag zal opengebrouwen moeten worden om het schrijnwerk langs buiten te vervangen. Aangezien de levensduur van deze pleisterlaag, 30 jaar, overeenkomt met deze van het schrijnwerk zal dit gelijktijdig vernieuwt kunnen worden. De vernieuwing van de pleisterlaag gebeurt veelal door het toevoegen van een bijkomende laag op de bestaande. Doordat er een bijkomende pleisterlaag geplaatst zal worden, gelijktijdig met de vervanging van het schrijnwerk, zal dit de voornaamste moeilijkheden bij de aansluiting met het vernieuwde raam oplossen.

### LOKALE SCHADE

Bij lokale schade, weergegeven op Figuur 62, wordt de pleister weggenomen in een rechthoekige zone, ongeveer 10cm groter dan het beschadigde gebied (IVP, 2016). Door de pleister in te slijpen en te verwijderen wordt de isolatielaag beschadigd. Vervolgens wordt de isolatielaag verder ingeslepen, om het beschadigde isolatiemateriaal eveneens weg te halen. Hiervoor moeten de isolatiepluggen en de verlijming op de draagmuur overwonnen worden. Eenmaal het beschadigde paneel verwijderd is kan een nieuw stuk EPS-isolatie geplaatst worden met lijm en isolatiepluggen. De isolatieplaten kunnen via de sluitpinnen, gebruikt in isolatiepluggen, onderling verbonden worden. Dit is een bijkomende stap die vooral in de praktijk veelal gebeurt om oneffenheden in de naden te reduceren. Na het plaatsen van de nieuwe isolatie, wordt de nieuwe pleisterlaag aangebracht. Een nadeel van de

continue pleisterlaag is dat deze bij herstelling onderbroken moet worden en de aansluiting met de omliggende pleister een kritisch punt vormt zowel op esthetisch als bouwtechnisch vlak.

*De component- en laagafhankelijkheid bij het ETICS-systeem is problematisch. Het systeem heeft door zijn verlijmde verbindingen en ononderbroken pleisterlaag, geen enkele affiniteit met deze aspecten van dynamisch bouwen.*

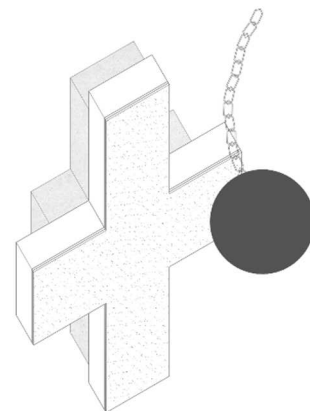


Figuur 62: ETICS-systeem, lokale schade

## SLOOP

De verlijming van de isolatie op de draagmuur en de bepleistering maakt het demonteren van het systeem zonder schade een onmogelijke opgave. Hergebruik op materiaal- en elementniveau is bijgevolg niet mogelijk. Hierdoor is demontage niet aan de orde en zal het systeem gesloopt worden. Dit is het grootste probleem van het ETICS-systeem binnen dynamisch bouwen.

*Aangezien sloop vraagt om een gespecialiseerde aannemer, ligt de expertise van dit systeem relatief hoog.*

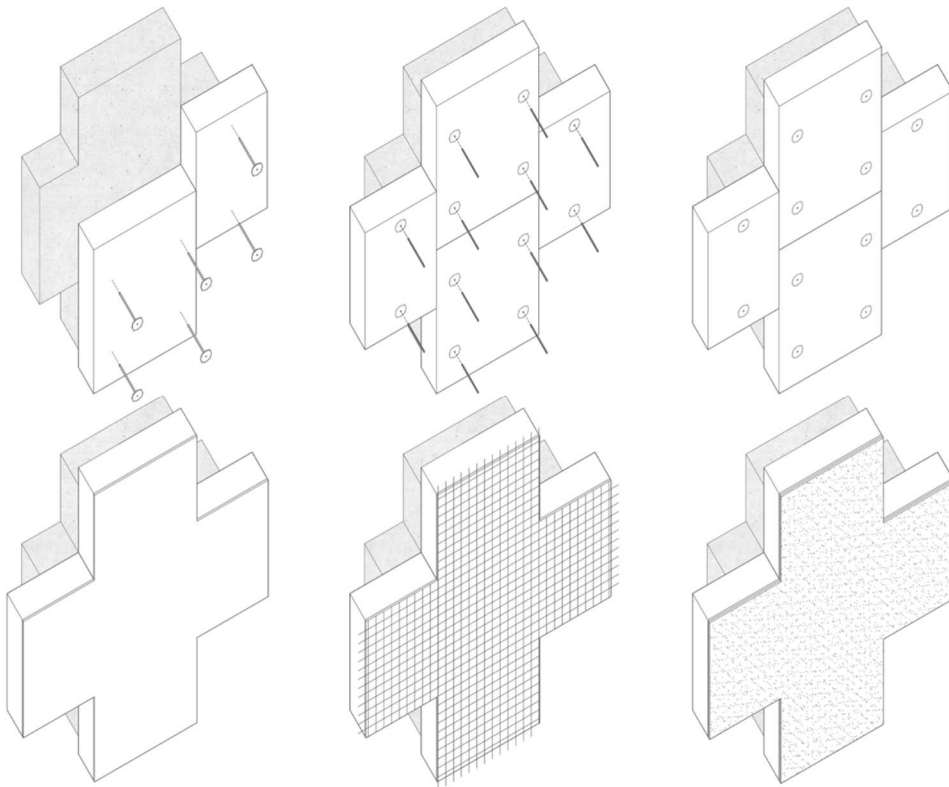


Figuur 63: ETICS-systeem, sloop

### 5.2.1.2 SCENARIO 2: VAN STERRE S4 NAAR ETRIMO

De montage van het ETICS-systeem op de Etrimo woontoren, Figuur 64, verloopt in dezelfde lijn als de montage op de Sterre S4. Aangezien er geen materialen hergebruikt kunnen worden, bestaat de opbouw hier uitsluitend uit nieuwe materialen.

*Er is geen enkel materiaal dat opnieuw ingezet kan worden, wat fundamenteel strijdig is met het principe van dynamisch bouwen.*



Figuur 64: ETICS-systeem, montage op de Etrimo

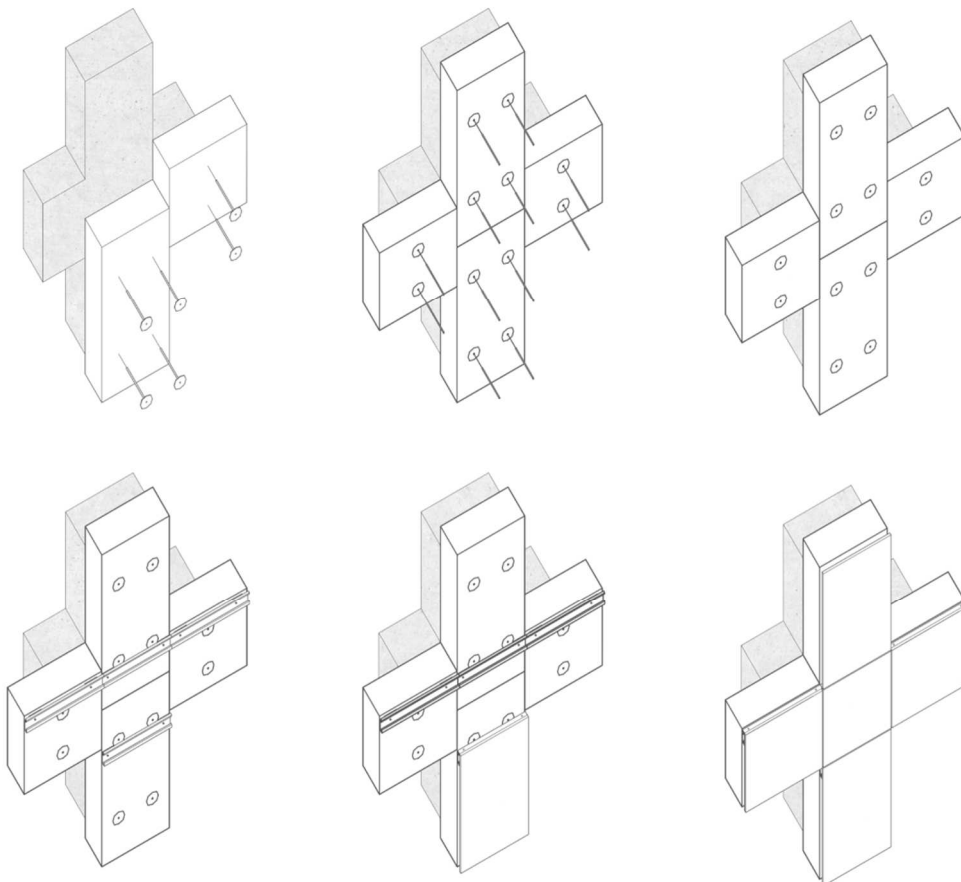
## 5.2.2 XPS-SYSTEEM

### 5.2.2.1 SCENARIO 1: 60 JAAR OP STERRE S4

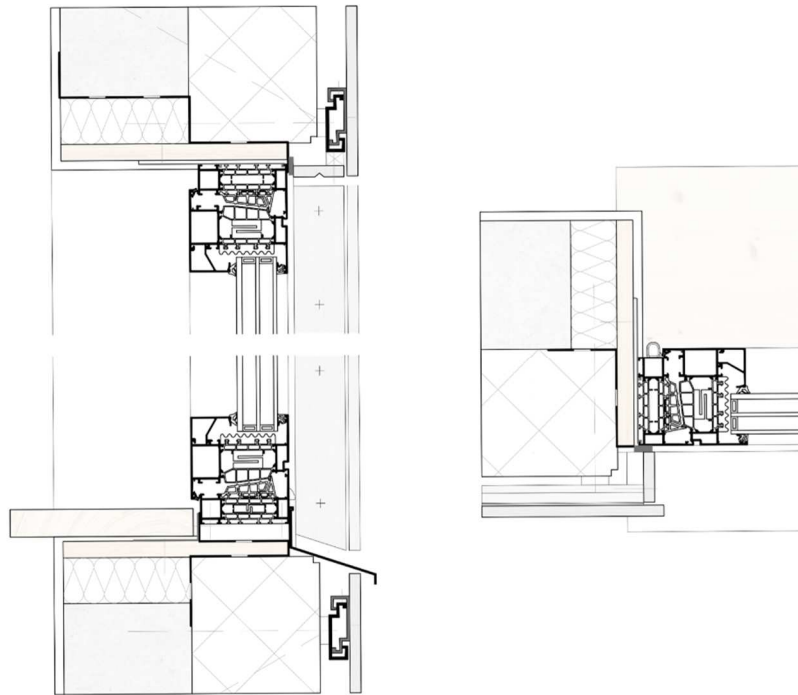
#### MONTAGE

De montage van het XPS-systeem op het S4 gebouw van de Sterre (Figuur 65) start met het verzagen en positioneren van de isolatieplaten op het binnenspouwblad, gevolgd door het boren van de gaten voor de isolatiepluggen. Vervolgens worden de isolatiepluggen en overeenkomstige sluitpin per plug, die de fixatie van het XPS-paneel verzekerd, geplaatst. De isolatieplaten worden recht op recht op elkaar aangesloten (zie hoofdstuk 4.2.2.1), wat resulteert in onafhankelijke componenten. Echter moet er voldoende aandacht besteed worden aan de aansluitingen van de isolatieplaten onderling. Vervolgens wordt de horizontale rail gepositioneerd, zodat de bevestigingspunten eveneens voorgeboord kunnen worden. De horizontale rail wordt telkens op lengte van de onderliggende isolatieplaat geslepen en geplaatst. Deze aluminium rail wordt uitgeregeld aan de hand van afstandhouders en bevestigd via schroeven. Ten slotte wordt de gevelbekleding opgehangen met haakjes aan de rail en uitgeregeld.

*Het monteren van het XPS-systeem is eenvoudig doordat de verbindingen makkelijk en toegankelijk zijn. De bevestiging van de aluminium rail vraagt echter voldoende nauwkeurigheid en bepaalt de expertise van dit systeem.*



Figuur 65: XPS-systeem, montage Sterre S4

Integratie van het schrijnwerk

Figuur 66: Detail raamaansluiting XPS-systeem

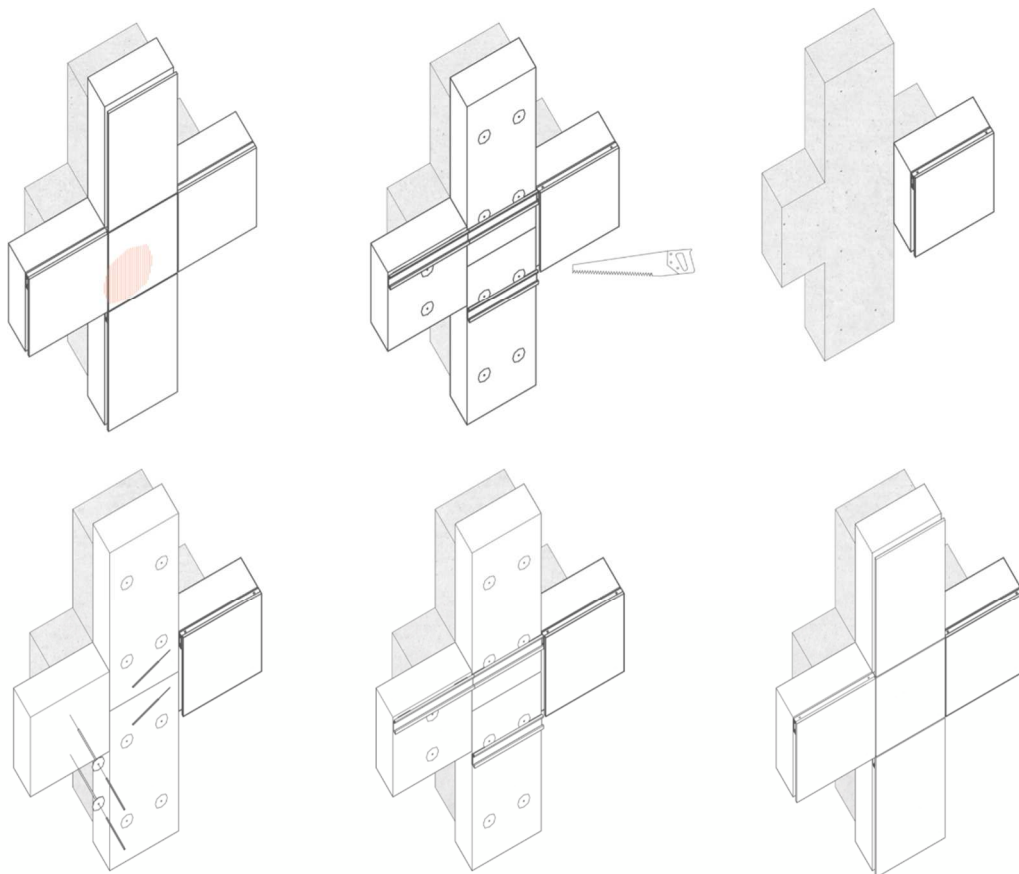
De XPS-isolatie zorgt via zijn waterbestendige eigenschap voor de eenvoudige aansluiting van het gevelsysteem op het schrijnwerk. Zoals weergegeven op Figuur 66 wordt eerst een houten randkader (in betonplex) gemonteerd. Deze kader wordt bevestigd aan houten balkjes, die alternerend geplaatst zijn met isolatie en in de kopsse kant van de draagstructuur verankerd worden. De waterkerende folie aan de bovenzijde zit reeds klaar terwijl die deze aan de onderzijde na plaatsing van het kader geïnstalleerd wordt. Het schrijnwerk kan vervolgens geplaatst worden in de randkader en wordt via doken en L-profielen verankerd. De folies worden via een zweiband waterdicht aangesloten op het schrijnwerk. Het gevelsysteem kan nu geïnstalleerd worden. De randkader, met een ruwere afwerking, wordt langs de binnenzijde bepleisterd en de vensterbank wordt ten slotte geplaatst via een omkeerbare verbinding.

Het schrijnwerk kan vervangen worden door de profileerde plaat (vensterbank buiten) en de zweelbanden te verwijderen. De pleisterlaag aan de randkader moet eveneens verwijderd worden zodat de aansluitingen van het schrijnwerk vrijkomen. Dit kan relatief eenvoudig wanneer er bij de bepleistering gebruik is gemaakt van een wapeningsnet. Vervolgens worden de doken en L-profielen losgeschroefd en wordt de opstaande folie in de hoeken open geplooid. Het schrijnwerk kan vervolgens vervangen worden en het nieuwe schrijnwerk sluit op eenzelfde manier aan. Voldoende aandacht moet hierbij besteed worden aan de opstand van de waterkerende folie aan de onderzijde. De randkader zelf kan eveneens relatief eenvoudig vervangen worden door, wanneer het schrijnwerk verwijderd is, ook de verankering van de kader in de draagmuur te lossen. De aansluiting van het kader, aan de houten balkjes alternerend met isolatie, geeft marge bij de demontage van deze kader. Dit zorgt er eveneens voor dat de thermische snede naar achter wordt getrokken, waardoor het schrijnwerk dieper in het gevelvlak geplaatst zou kunnen worden.

## LOKALE SCHADE

Zoals weergegeven op Figuur 67, zal om te beginnen het aangetaste deel van de gevelafwerking verwijderd worden. Vervolgens worden de horizontale rails van de beschadigde isolatieplaten van de draagmuur geschroefd. Doordat de maatvoering van de rails overeenstemt met de isolatieplaten kan de rail enkel in de aangetaste zone verwijderd worden. Door de onafhankelijke verbinding van de thermische schil onderling (recht op recht-aansluiting) is het geen probleem de beschadigde isolatieplaten ervan tussen te halen. Om deze isolatieplaten te demonteren, is het aangewezen de isolatiepluggen aan de kop af te snijden. Eenmaal de draagmuur vrij is gemaakt van resterende stukken isolatieplug kan een op maat gesneden, nieuwe XPS-plaat gepositioneerd en met isolatiepluggen bevestigd worden. Indien van toepassing kunnen bijkomende sluitpinnen gebruikt worden om eventuele oneffenheden in de naden tussen de isolatieplaten te reduceren. Vervolgens kan de horizontale rail bevestigd en kunnen de nieuwe gevelpanelen geplaatst worden.

*De ontwerpkeuzes in verband met de recht-op-recht aansluiting van de XPS-platen en de overeenstemmende maatvoering van de aluminium rails en isolatieplaten zorgen voor een onafhankelijke werking van de componenten. De demonteerbare verbindingen met pluggen zorgen echter voor beperkte afhankelijkheid tussen de lagen onderling.*

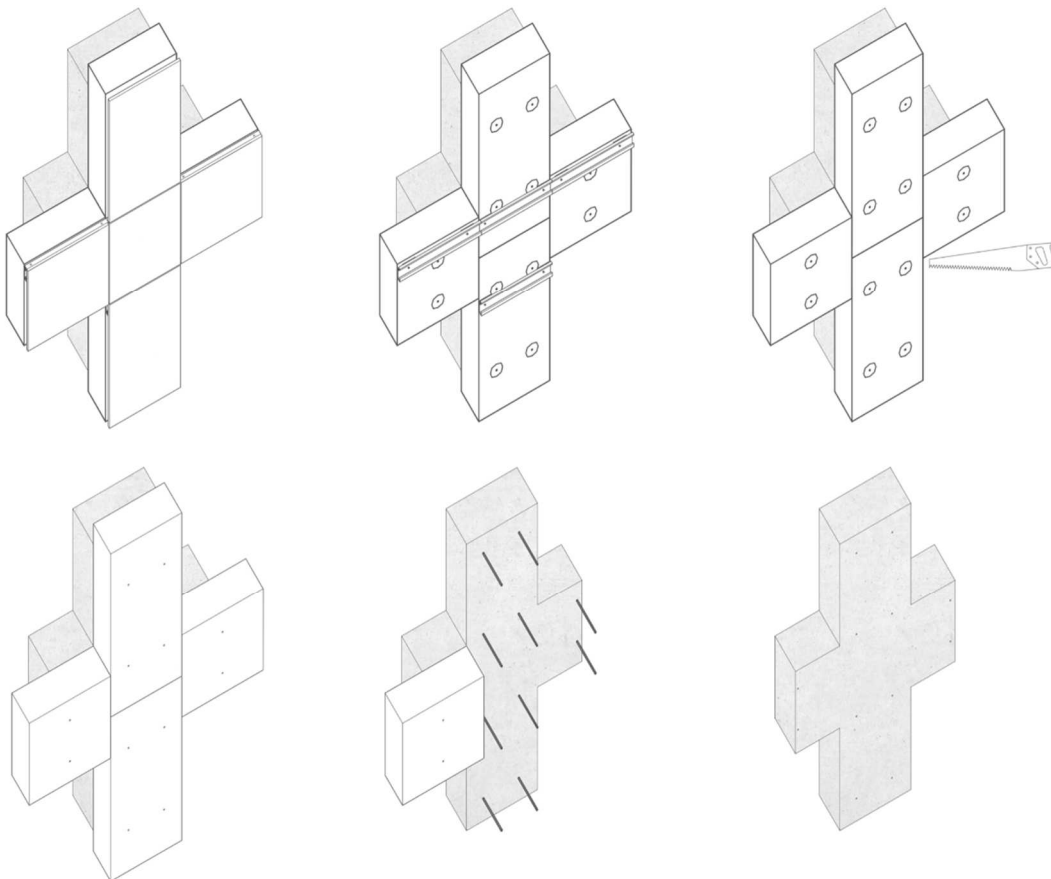


Figuur 67: XPS-systeem, lokale schade

## DEMONTAGE

Dit systeem kan in tegenstelling tot het ETICS-systeem wel gedemonteerd en herleid worden tot materiaalniveau. De demontage van het XPS-systeem, weergegeven op Figuur 68, start met de verwijdering van de gevelbekleding. Vervolgens worden de horizontale rails verwijderd. De isolatiepluggen worden afgezaagd zodat de XPS-isolatie gedemonteerd kan worden zonder bijkomende schade. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren met toegankelijk gereedschap zoals een ijzerzaag, kniptang of accu multitoel. De resterende helft van de isolatiepluggen, nog in de draagmuur bevestigd, wordt eveneens verwijderd. Aangezien deze beschadigd zijn kunnen ze niet meer opnieuw ingezet worden. Demonteerbare isolatiepluggen zouden een oplossing bieden om hergebruik te faciliteren, laagafhankelijkheid te reduceren en schade bij demontage te minimaliseren. In de draagmuur zijn nog pluggen aanwezig die de schroeven van de horizontale rails in de draagmuur verankerden. Deze kunnen echter niet uit de draagmuur gehaald worden en blijven bijgevoelg zitten.

*De ophanging van de gevelpanelen en de schroeven bij de horizontale rail hebben een toegankelijke uitvoering. Om de XPS-platen te demonteren, moeten de isolatiepluggen echter afgezaagd worden of moeten demonteerbare isolatiepluggen gebruikt worden. Over het algemeen heeft dit systeem relatief weinig expertise nodig bij montage en demontage.*



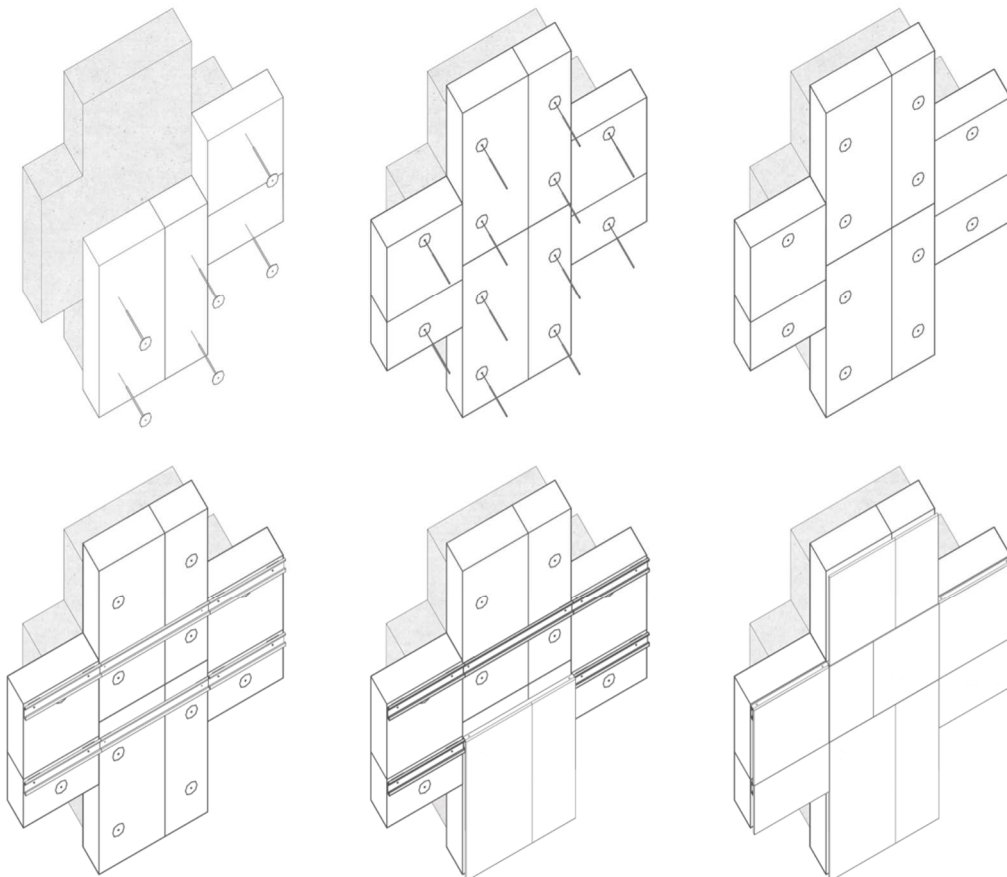
Figuur 68: XPS-systeem, demontage



### 5.2.2.2 SCENARIO 2: VAN STERRE S4 NAAR ETRIMO

Voldoende aandacht moet besteed worden bij het plaatsen van de XPS-platen, met vooraf bepaalde afmetingen, om hergebruik ervan te maximaliseren (Figuur 69). De rechte aansluiting van de isolatieplaten zorgen ervoor dat de plaatsing niet gebonden is aan vaste richtingen, wat het hergebruik ervan vereenvoudigt. De isolatieplaten worden vervolgens via (nieuwe) isolatiepluggen aan de draagmuur bevestigd. Bij het opnieuw plaatsen van de isolatie is het voordelig om de bestaande doorboringen in te zetten als ankerpunten voor de isolatiepluggen. De rails en afstandhouders worden bovenop de isolatieplaten bevestigd. De maat van de rail stemt wederom overeen met de maat van de isolatieplaten. Ten slotte wordt de gevelafwerking aan de rails opgehangen. De Rockpanels hebben afmetingen gebaseerd op de Sterre S4 wat zorgt voor een specifieke ritmering op de nieuwe Etrimo gevel.

*Een grote kwaliteit van dit systeem uit zich in de dynamische bevestiging van de gevelafwerking met aluminium rails en haakjes. De bijkomende platen isolatiemateriaal, die de overgang maken tussen de maatvoering van de Sterre S4 en de Etrimo, vormen de grootste moeilijkheid. Echter zijn alle materialen in dit systeem herbruikbaar en zorgen de bevestigingssystemen voor een grote flexibiliteit.*

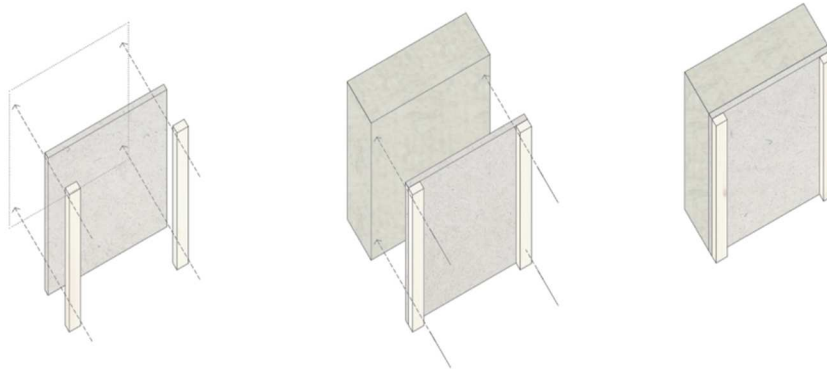


Figuur 69: XPS-systeem, montage Etrimo

## 5.2.3 PREFAB AFSTANDSSCHROEFSTEEEM

### 5.2.3.1 SCENARIO 1: 60 JAAR OP STERRE S4

#### FABRICATIE



Figuur 70: Prefab afstandsschroefsteeem, fabricage

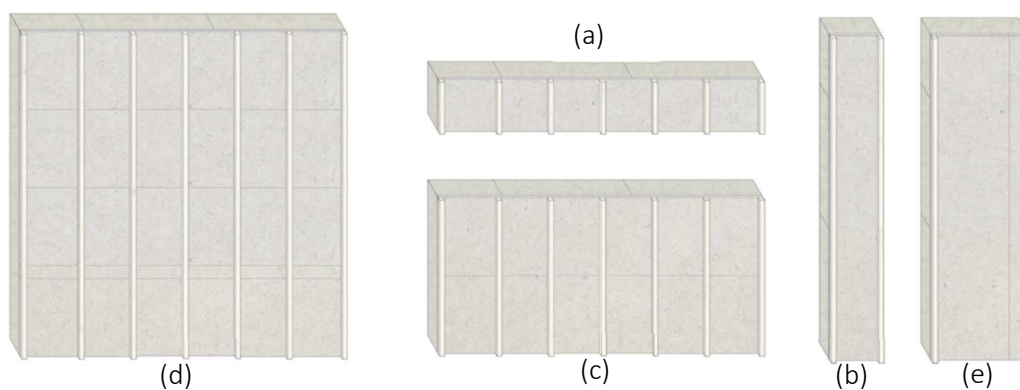
In tegenstelling tot de andere systemen wordt het prefab afstandsschroefsteeem geprefabriceerd (Figuur 70). Om te beginnen wordt, via de vezelplaten en verticale latten, de structuur van het paneel geconstrueerd. Dit gebeurt door de houten latten op de houtvezelplaten te bevestigen met schroeven (deze steken na bevestiging nog 12 cm uit). De hart-op-hart afstand van het lattenwerk (40cm) volgt uit de technische eigenschappen van de vezelcementplaat gevelafwerking (zie hoofdstuk 4.2.1.1). Ten slotte wordt de rotswolisolatie op de uitstekende schroeven geprikt en worden er afstandhouders geplaatst op de panelen om ervoor te zorgen dat deze op de site uitgelijnd kunnen worden.

De maatvoering van de prefab panelen speelt een belangrijke rol om de herbruikbaarheid van het systeem te garanderen. Zoals in hoofdstuk 1.2.1.2 werd beschreven, wordt de maatvoering voor open en gesloten façadedelen opgesplitst. De afmetingen van alle prefab panelen zijn gebaseerd op de maatvoering van de houtvezelplaten (250 x 60cm (Celit, 2021)). De panelen voor de open façadedelen zijn daarbovenop ook gebaseerd op de maatvoering van de gesloten stroken (40 cm breed) van de Sterre S4. Deze minimum afmetingen zorgen ervoor dat deze panelen gebruikt kunnen worden in open façadedelen met stroken van 40 cm of groter.

Er werd onderzoek gedaan naar types standaardpanelen die een maximale oppervlakte van de gevel (Sterre S4) in beslag namen (Bijlage 3). Aangezien prefabricatie pas vanaf een groot aantal voordelig is, werd een minimumaantal van 100 panelen vooropgesteld. Het resterende geveloppervlak wordt ingevuld met een in situ oplossing van het systeem. In Tabel 32 is de lijst weergegeven van de types paneel (Figuur 71) en hun frequentie.

	Paneel	Aantal	Afmetingen
a	Raster horizontaal	342	40 x 250 cm
b	Raster verticaal	552	250 x 40 cm
c	Dakrand	103	120 x 250 cm
d	Blinde gevel	112	250 x 250 cm
e	Rand (trap) verticaal	107	250 x 75 cm

Tabel 32: panelen prefab afstandsschroefstelsel

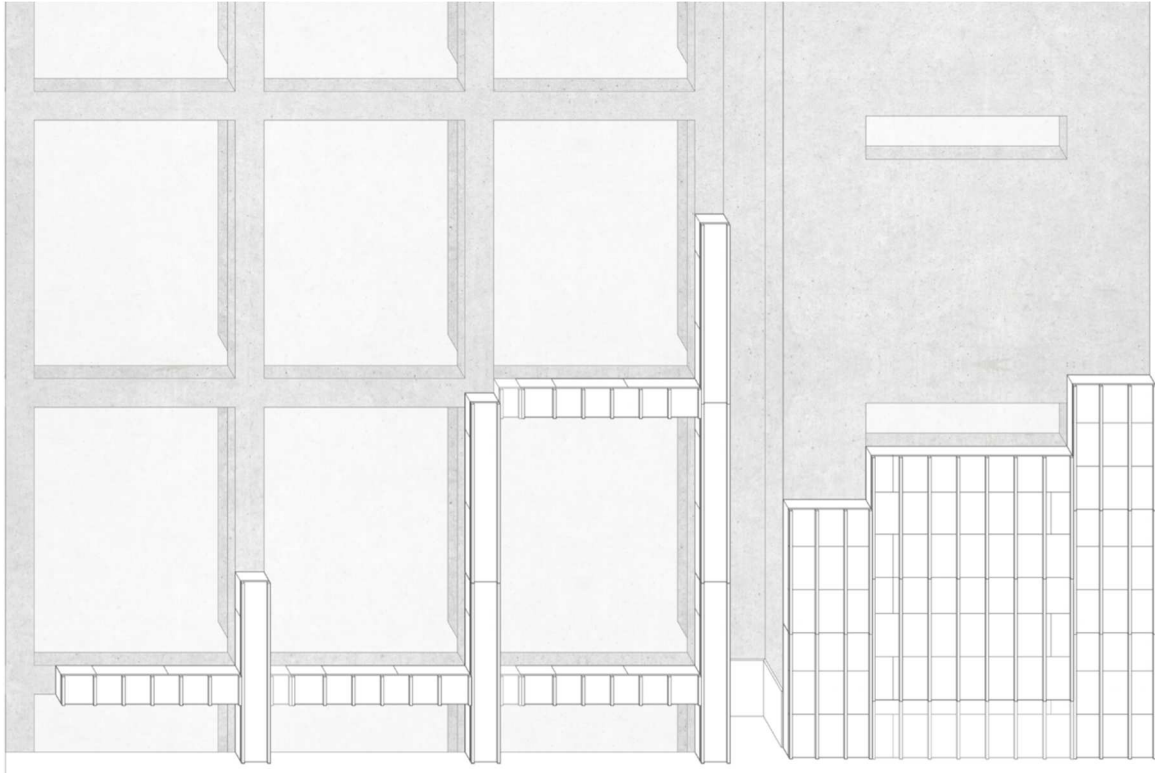


Figuur 71: panelen prefab afstandsschroefstelsel

Als reflectie op deze selectie panelen werd berekend hoeveel procent van het totale geveleppervlak geprefabriceerd kan worden (Figuur 72):

- Totale oppervlakte aan prefab panelen: 2103 m<sup>2</sup>
- Totale geveleppervlakte van de Sterre S4: 3465 m<sup>2</sup>
- 64% gevel is prefab, 36% in situ oplossingen

De horizontale en verticale panelen die het vaakst voorkomen hebben dezelfde afmetingen maar een verschillende oriëntatie. Indien het lattenwerk van de gevel zodanig is bevestigd dat de panelen zowel horizontaal als verticaal bevestigd kunnen worden, zou het aantal types prefab-panelen tot vier gereduceerd kunnen worden.

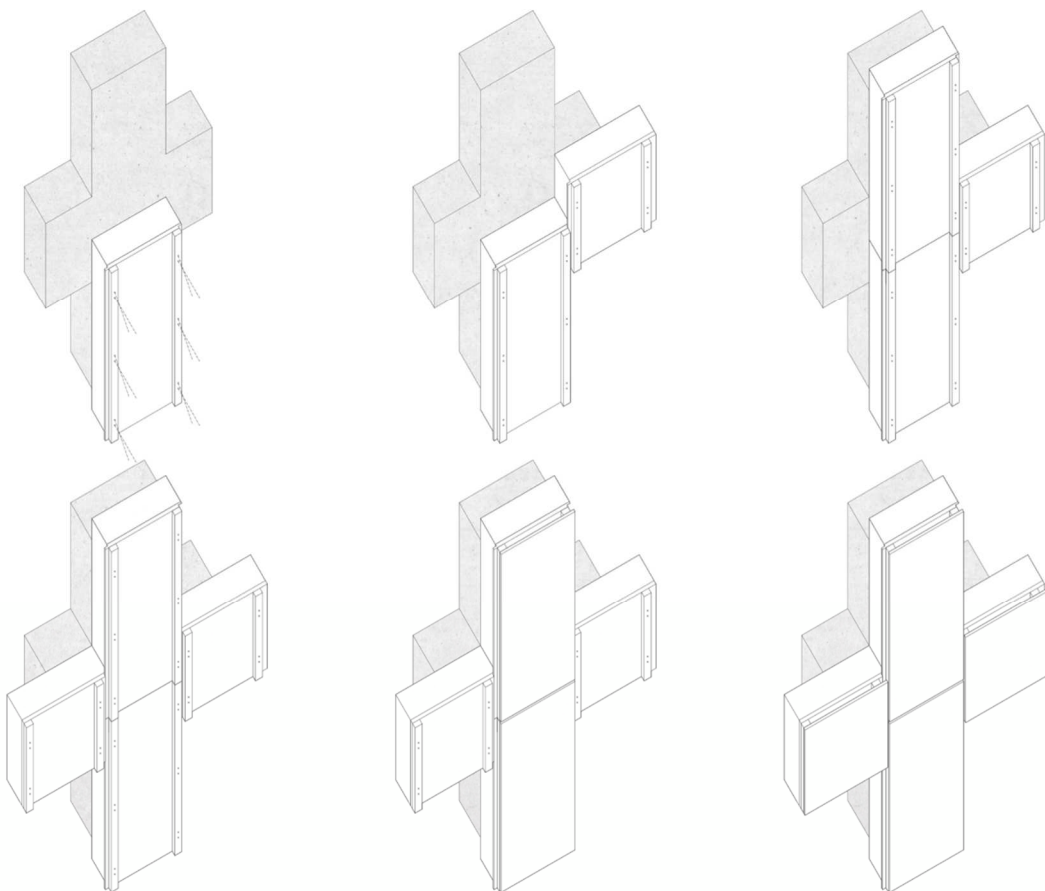


Figuur 72: Prefab afstandschroefstelsel, paneelverdeling Sterre S4

## MONTAGE

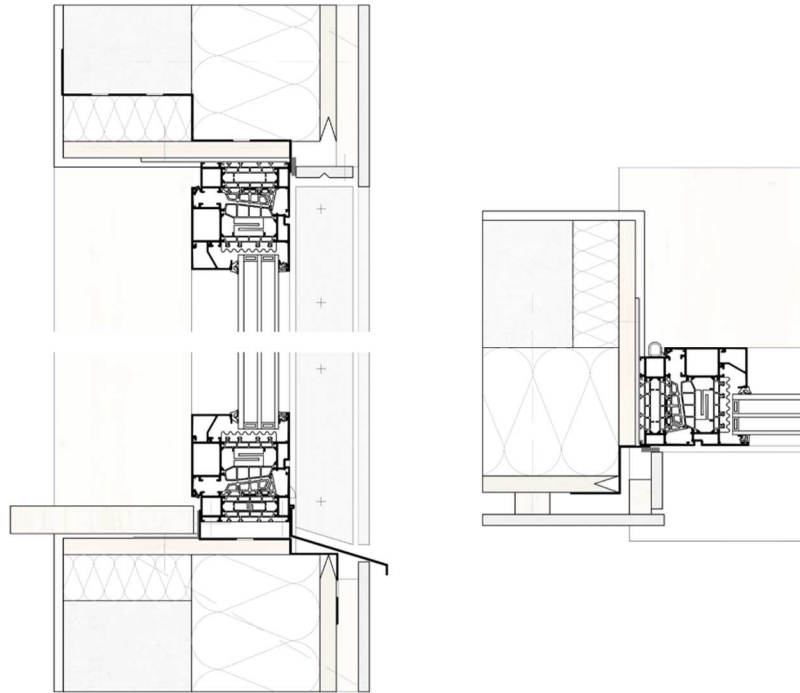
De eerste stap bij de montage van de prefab panelen op de Sterre S4 bestaat uit het positioneren van het paneel met behulp van een kraan (Figuur 73). De arbeider begeleidt het op te hangen paneel tot de houtvezelplaat, via de tand- en groefverbinding, aansluit op de houtvezelplaat van het vorige paneel. Dit type verbinding zorgt voor een vlotte uitlijning van de panelen onderling en verzekert de waterdichtheid van de gevel. Het paneel wordt vervolgens ontkoppeld van de kraan, uitgelijnd via de afstandshouders en gefixeerd met afstandsschroeven. Hiervoor worden telkens twee schroeven (één horizontaal en één diagonaal) geplaatst om de 60 cm, in elke verticale lat. De afstandshouders worden gerecupereerd en de plaatsing van een volgend paneel gaat van start. Aansluitend bij de montage van de prefab panelen vindt ook de plaatsing van het in situ deel plaats. Bij de in situ delen, die de brug maken tussen twee prefab panelen, kan de isolatie eerst geklemd worden. De houtvezelplaat wordt op maat gezaagd en de verticale latten worden hierop geschroefd. Dit wordt vervolgens op de draagmuur gefixeerd met afstandsschroeven. Voor grotere in situ panelen is een lokale prefabricatie aangewezen. Tenslotte wordt de gevelafwerking op het verticale lattenwerk van de panelen geschroefd. De voegen tussen de gevelafwerking worden bij voorkeur geschrant geplaatst ten opzichte van de voegen van de prefab panelen.

*De uitdagingen bij montage van dit gevelrenovatiesysteem beperken zich tot het aansluiten van de panelen onderling en het installeren van de afstandsschroeven. Via de houtvezelplaat wordt de waterdichting, stijfheid van het paneel en de aansluiting tussen de panelen onderling verzekerd. Door het aandeel prefabricatie kan de montage van de panelen vlot verlopen en ligt de expertise van dit systeem op de site bijgevolg laag.*



Figuur 73: Prefab afstandsschroefstelsel, montage Sterre S4

## Integratie van het schrijnwerk



Figuur 74: Prefab afstandsschroefstelsel, raamaansluiting detail

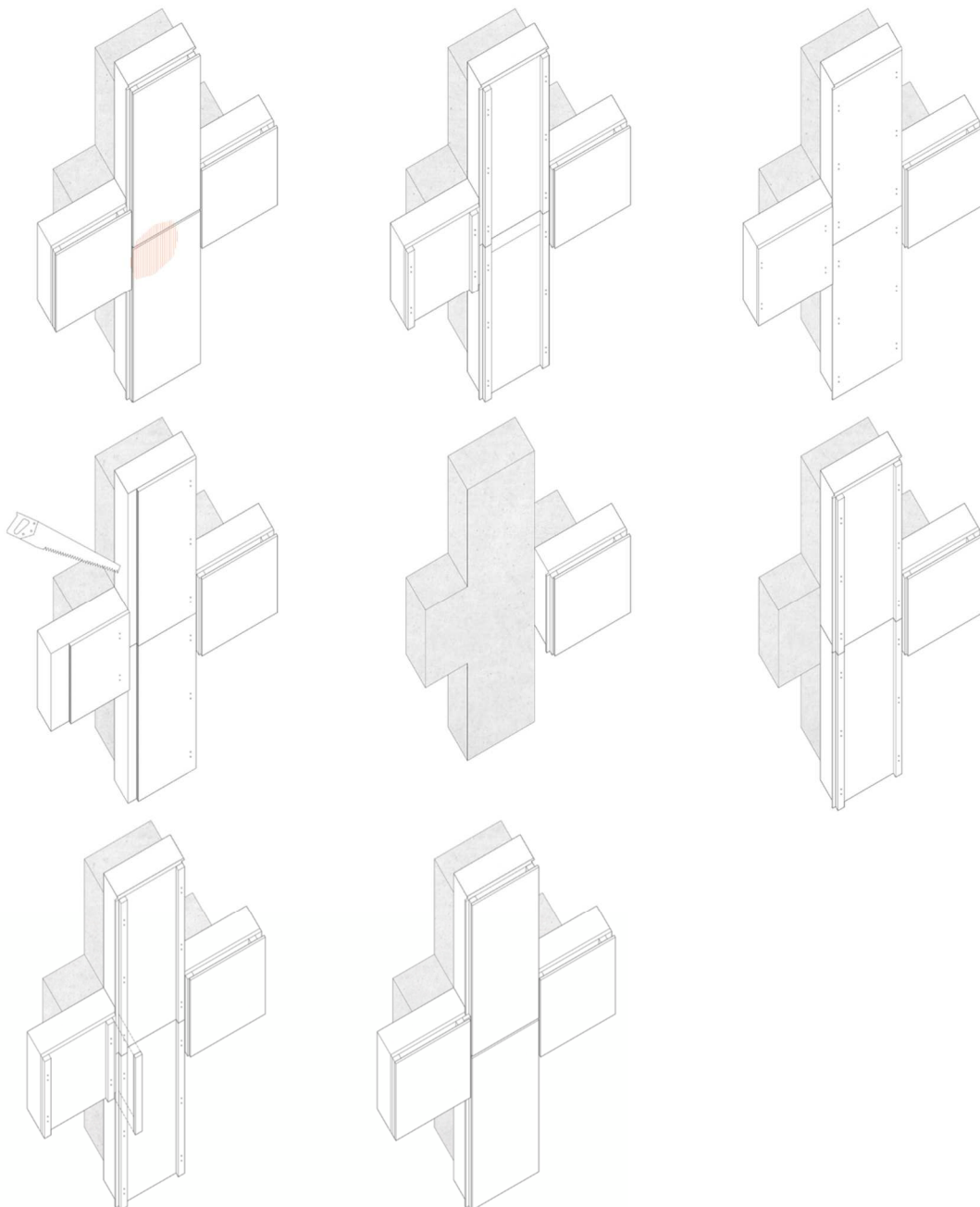
Net zoals bij het XPS-systeem wordt gebruik gemaakt van een randkader waarbinnen het schrijnwerk wordt geplaatst (Figuur 74). Het voornaamste verschil met het XPS-systeem zit in de aansluitingen tussen de waterkerende folies. De bovenzijde van deze raamaansluiting doet beroep op een folie om te voorkomen dat water in de hydrofobe laag rotswol terecht komt. De groef in de houtvezelplaat, bedoeld voor de tand- en groef aansluiting, vervult hier de functie van druiprand en voorkomt zo dat de aflopende druppels in isolatielaag terecht komen. Aan de onderkant van het randkader vindt de waterkerende folie aansluiting op de houtvezelplaat. Het lattenwerk van de gevel is zodanig gefixeerd dat het mogelijk is de folie hiertussen te schuiven zodat deze niet gelijmd of geniet moet worden. De vensterbank aan de buitenzijde (geprofileerde plaat) loopt ver door en verzorgt op die manier de waterdichting. De zijdelinkse aansluiting bestaat uit een folie die, net zoals de onderkant, vanaf het kader aansluiting zoekt met de houtvezelplaat. Om de folies te laten aansluiten op het schrijnwerk is telkens gebruik gemaakt van een zwelband of tochtstrip die de waterdichting van de aansluiting verzekert. In navolging van het XPS-systeem zijn hier zowel het schrijnwerk als de randkader vervangbaar zonder het gevelsysteem te moeten demonteren.

## LOKALE SCHADE

Aangezien het systeem gebruik maakt van prefab panelen, moeten diegenen die in de aangetaste zone liggen vervangen worden. Dit 'worst'-case scenario, zoals weergegeven op Figuur 75 resulteert in de vervanging van drie panelen. De aangetaste gevelafwerking wordt om te beginnen van de panelen verwijderd. Het verwijderen van enkele interne geprefabriceerde panelen is niet eenvoudig aangezien de houtvezelplaten onderling via tand- en groef verbonden zijn. Om die reden worden de panelen gedemonteerd tot materiaalniveau. Alle afstandsschroeven worden uit de verticale latten geschroefd en de latten worden verwijderd. Door de houtvezelplaat van de beschadigde panelen lokaal te verzagen kan deze ook uit de opbouw gehaald worden. Ten slotte wordt de rotswol verwijderd. De

installatie van de nieuwe panelen verloopt zoals eerder werd beschreven. Aangezien het stuk houtvezelplaat uitgesneden is, zal het niet mogelijk zijn hier een tand- en groef-aansluiting te creëren. De waterdichte aansluiting van deze platen moet volgens een andere logica gecreëerd worden. Het houtvezelplaatmateriaal faciliteert hiervoor verschillende oplossingen, wat de veelzijdigheid van dit materiaal toont. De verticale gevellatten zijn ongeveer 2 cm van de rand geplaatst waardoor de verticale aansluiting tussen de houtvezelplaten gemaakt kan worden met een afdekstrook. Eenmaal de panelen zijn geplaatst, worden vezelcementplaten gemonteerd.

*De lagen onderling zijn omkeerbaar bevestigd met toegankelijke verbindingen, wat resulteert in relatief onafhankelijke lagen. Op vlak van componentafhankelijkheid vormt de tand- en groefverbinding tussen de houtvezelplaten echter een grote hindernis.*

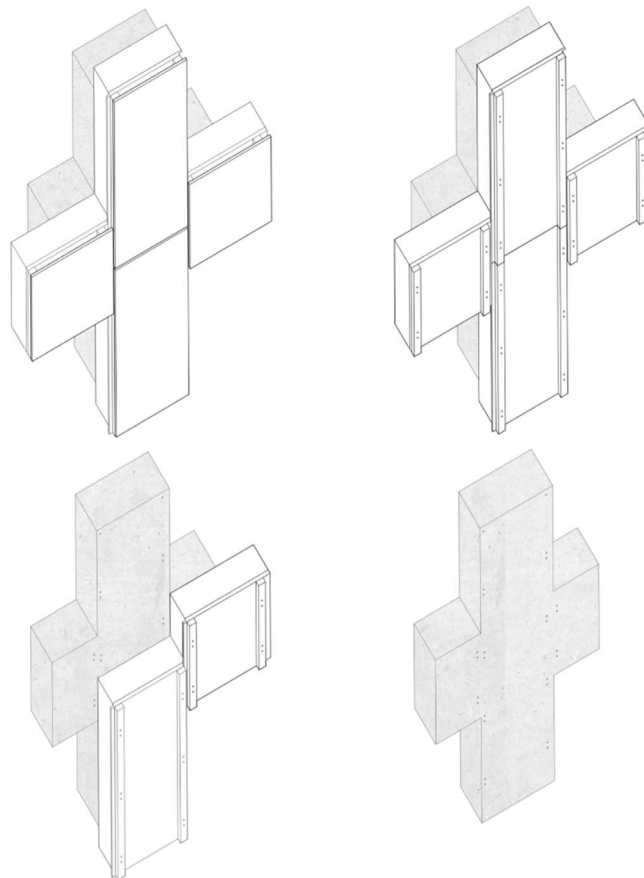


Figuur 75: Prefab afstandsschroefstelsel, lokale vervanging

## DEMONTAGE

De demontage van dit systeem, weergegeven op Figuur 76, start met het verwijderen van de gevelbekleding. Vervolgens kunnen de afstandsschroeven verwijderd en de panelen van de gevel gehaald worden. De prefab panelen zorgen voor een snelle demontage op elementniveau. De demontage van de in situ delen verloopt daarentegen minder snel. De hoge componentafhankelijkheid belemmert echter simultane demontage van de prefab panelen. Zo goed als alle materialen die hier gebruikt zijn, worden gedemonteerd zonder beschadiging. In de draagmuur zijn enkel nog pluggen aanwezig van de afstandsschroeven, deze kunnen echter niet uit de draagmuur gehaald worden en blijven bijgevolg zitten.

*De expertise voor demontage ligt relatief laag door het grote aandeel prefab panelen die eenvoudig gedemonteerd kunnen worden.*

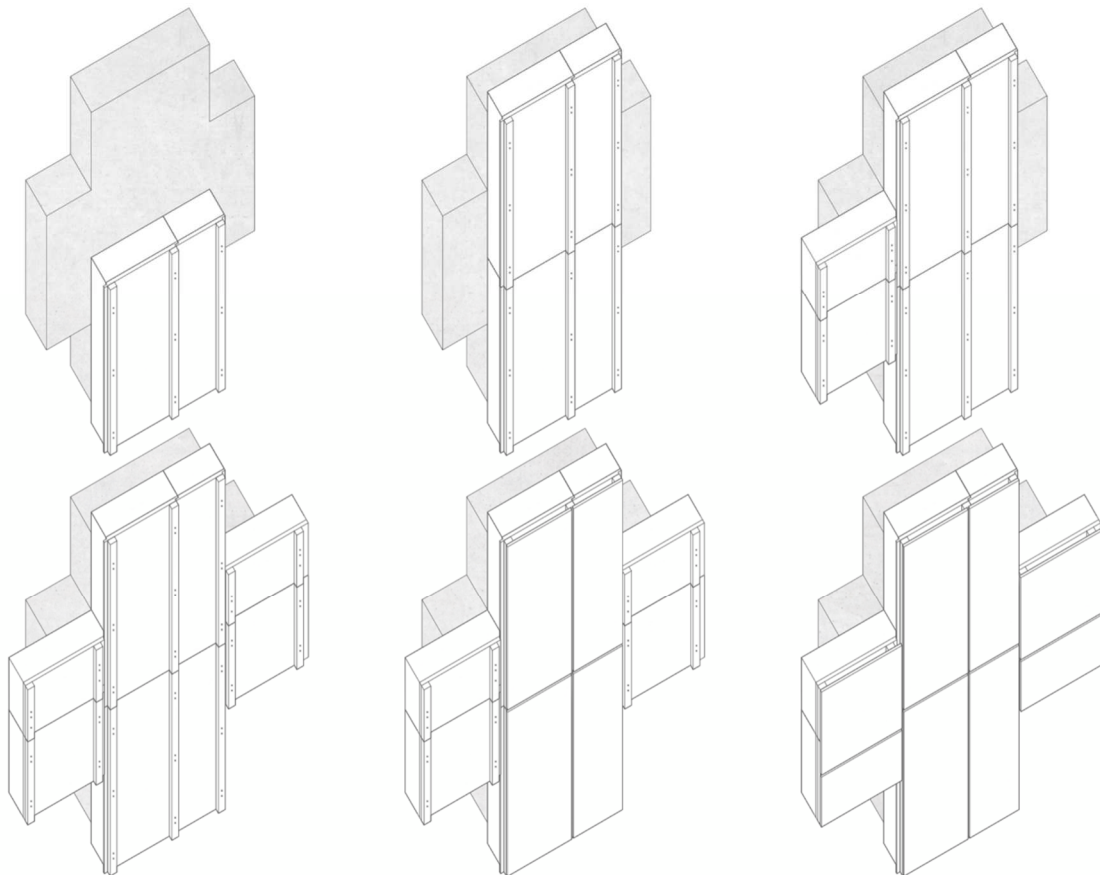


Figuur 76: Prefab afstandsschroefstelsel, demontage



### 5.2.3.2 SCENARIO 2: VAN STERRE S4 NAAR ETRIMO

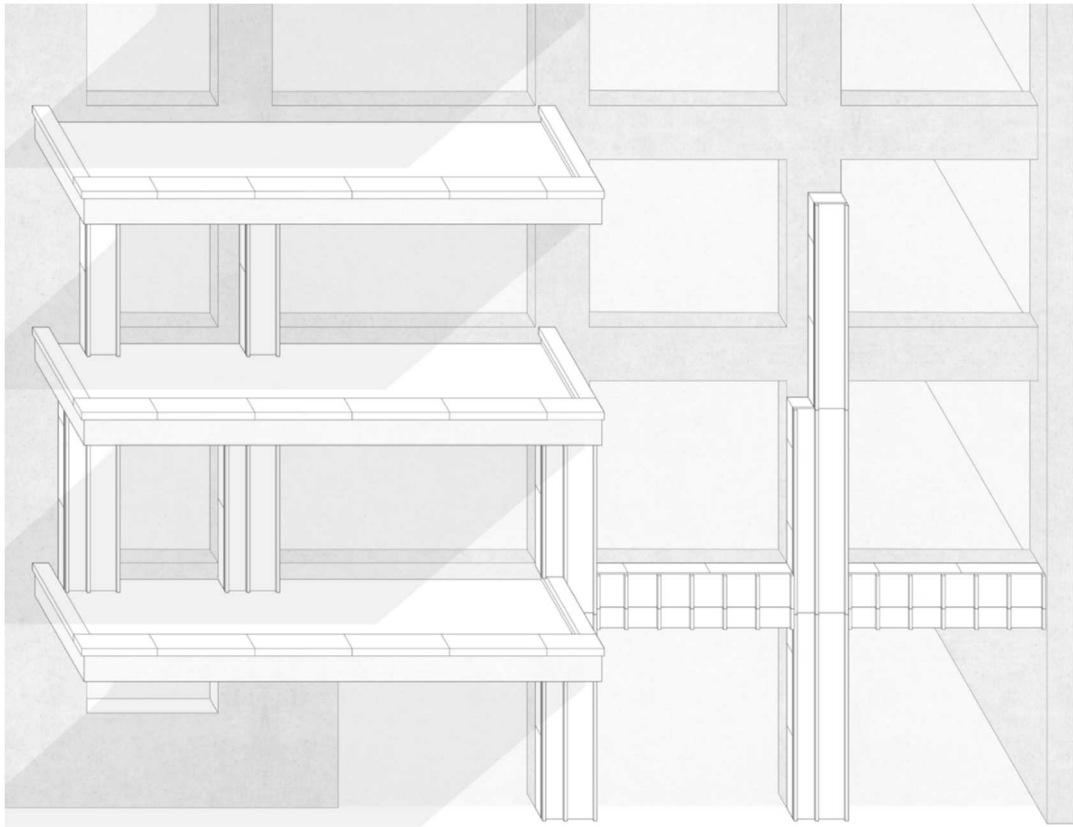
De gevelpanelen die gedemonteerd werden op de Sterre S4 worden hier hergebruikt op de Etrimo woontoren. Dit gevelsysteem kan zowel op elementniveau, in prefab paneelvorm, als materiaalniveau hergebruikt worden op de Etrimo. De maat van de geprefabriceerde elementen volstaan niet om alle delen van de Etrimo gevel te bedekken. De prefab panelen bedekken 60% van de gevel, de overige delen worden ingevuld met in situ oplossingen.



Figuur 77: Prefab afstandsschroefstelsel, montage Etrimo

Op Figuur 77 is weergegeven hoe de prefab panelen aangevuld worden met een in situ oplossing om de gevel te vervolledigen. Deze in situ aanvulling bestaat uit een op maat gezaagde houtvezelplaat waar een gevellat op wordt geschroefd. Via de verticale latten kunnen reststukken houtvezelplaat verbonden worden tot een volwaardig paneel. Vervolgens prikt men de rotswol op de schroeven en kan het paneel geplaatst worden. Net zoals bij de prefab panelen sluiten de houtvezelplaten op elkaar aan en wordt het geheel gefixeerd na uitlijning via afstandsschroeven. Met deze combinatie van in situ en prefab wordt de volledige gevel opgebouwd (Figuur 78). Ten slotte wordt de hergebruikte gevelbekleding geplaatst, deze kreeg zijn afmetingen aan de hand van de Sterre S4. De frequentie van de verticale latten draagt bij aan een variabele gevelritmering van de vezelcementplaten.

*Dit systeem bestaat uit materialen die een hoog potentieel voor hergebruik hebben. De combinatie van een prefab paneel met een in situ aanvulling zorgt voor een grote aanpasbaarheid. Daarbovenop zorgen prefab systemen voor hergebruik op materiaal- en elementniveau.*



Figuur 78: Prefab afstandschroefstelsel, paneelverdeling Etrimo

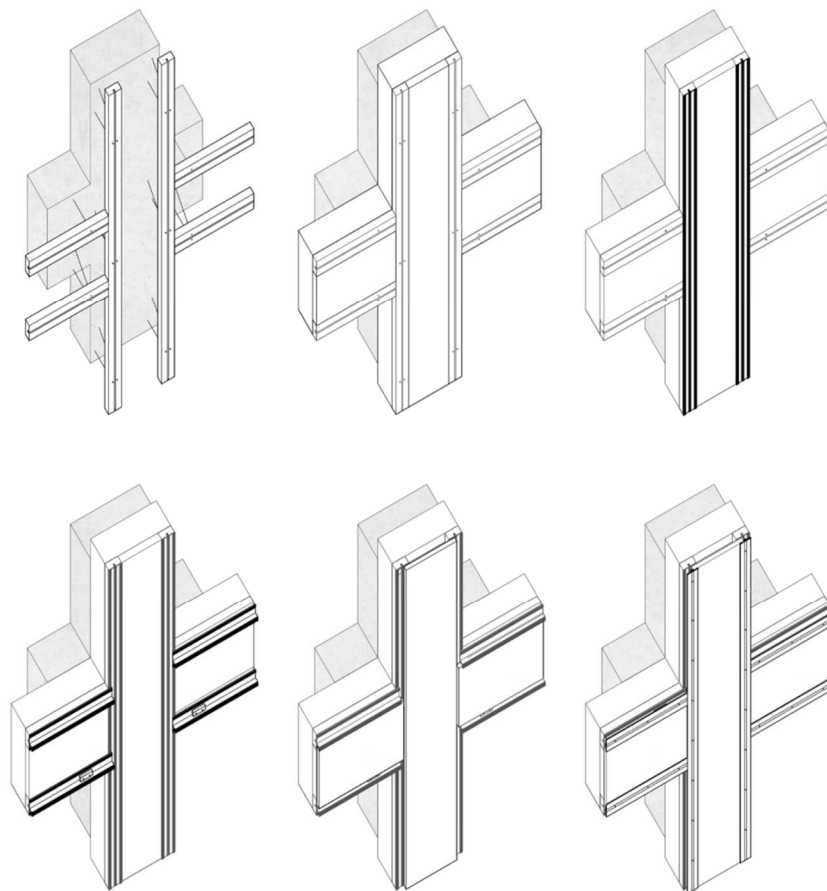
## 5.2.4 GORDIJNGEVELSYSTEEM

### 5.2.4.1 SCENARIO 1: 60 JAAR OP STERRE S4

#### MONTAGE

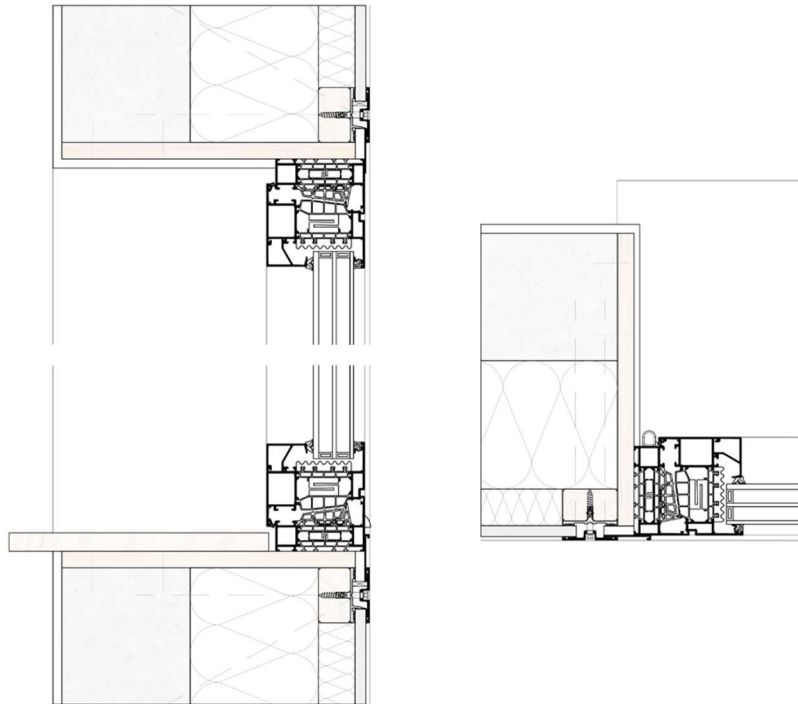
De montage van het gordijngesysteem, weergegeven in Figuur 79, start met het uitlijnen en bevestigen van een horizontaal en verticaal lattenwerk. Dit houten lattenwerk is bevestigd aan de draagstructuur met behulp van afstandsschroeven. Vervolgens wordt tussen deze rastering zachte rotswolisolatie geklemd. Om een uniforme thermische schil te bekomen zal het gebruik van randisolatie tussen het lattenwerk aangewezen zijn. Een volgende stap is de plaatsing van de verticale rubbers in de uitsparing van het lattenwerk. Vervolgens kunnen de horizontale rubbers in overlap met de verticale geïnstalleerd worden door middel van een uitsparing. De rubbers worden met behulp van vulkanisatie lucht- en waterdicht op elkaar aangesloten. Vervolgens worden de glassteunen geplaatst en kan de gevelafwerking hierop correct gepositioneerd worden. Om de gevelafwerking te bevestigen wordt ten slotte de klemlijst, op het lattenwerk geschroefd.

*Het gordijngesysteem doet beroep op rubbers om zijn lucht- en waterdichtheid te bekomen. Dit inklemmingsprincipe, afkomstig uit de vliesgevelbouw, vergt in de Belgische context meer know-how dan de klassiekere waterdichtingsprincipes. De andere geschroefde en geklemdde verbindingen (rotswol) hebben echter een beperkt expertise.*



Figuur 79: Gordijngesysteem, montage Sterre S4

## Integratie van het schrijnwerk



Figuur 80: Gordijngevelsysteem, raamaansluiting detail

Aangezien dit gevelsysteem gebruik maakt van gordijngevelverbindingen kunnen type-oplossingen voor aansluitingen overgenomen worden. In dit systeem is het integreren van schrijnwerk weinig verschillend van gevelpanelen. De moeilijkheid is voornamelijk dat het eigengewicht van schrijnwerk veel groter is dan dat van de gevelafwerking. Dit kan opgelost worden door het lattenwerk, met een zwaardere verankering aan de draagstructuur te bevestigen. Hier (Figuur 80) wordt echter geopteerd voor een houten randkader, die in de draagmuur verankerd wordt en op die manier de belastingen overdraagt. De lucht- en waterdichtingsaansluiting met het schrijnwerk wordt zoals bij de gevelpanelen gerealiseerd door de inklemming. Het profiel van het raam zelf is zodanig vormgegeven dat deze aansluiting uitgevoerd kan worden. Indien mogelijk neemt de inklemming alle verdere krachten op. In het geval dat deze niet volstaat, kan geopteerd worden om het schrijnwerk bijkomend te bevestigen in het randkader zelf.

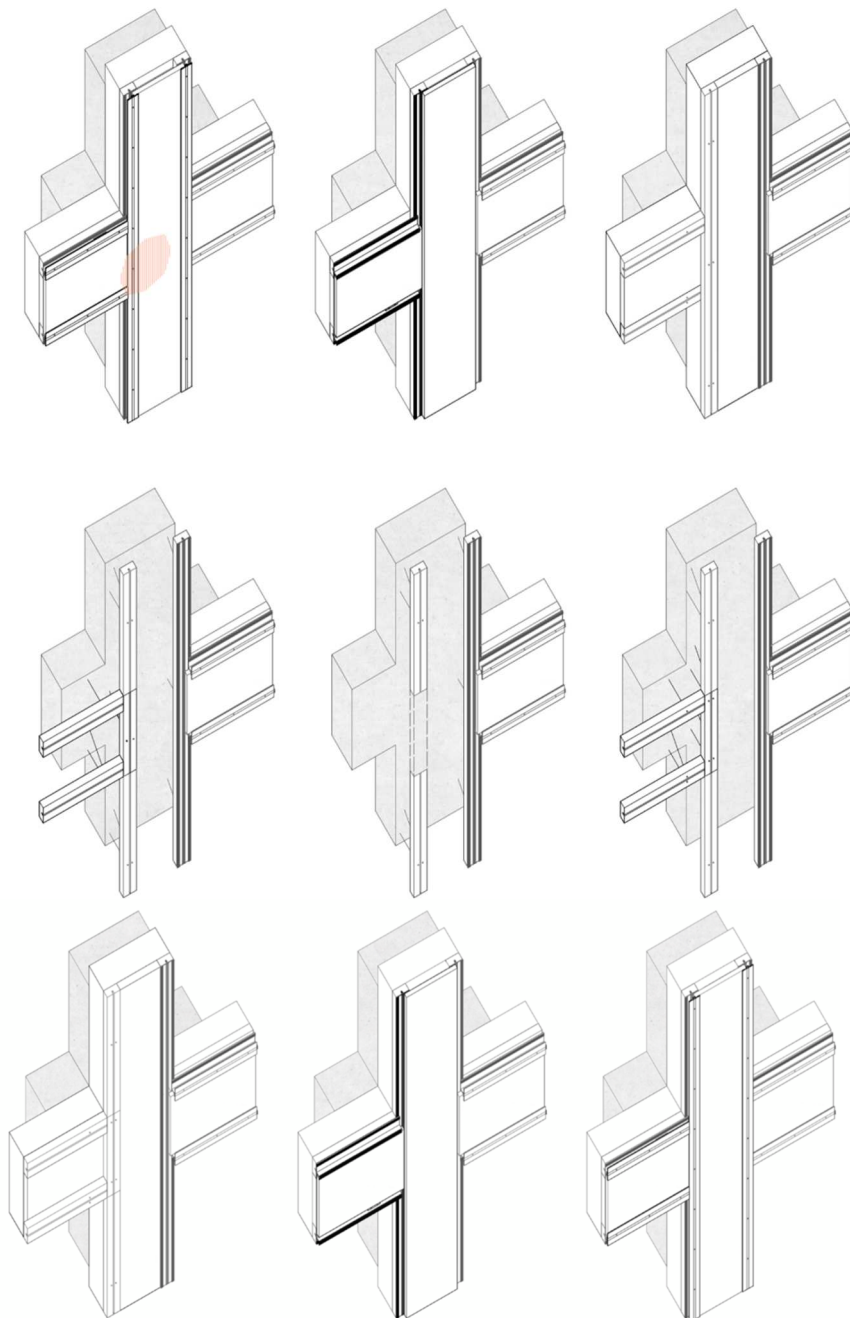
In vergelijking met de voorgaande systemen, is de vervanging van het schrijnwerk bij dit systeem uitzonderlijk eenvoudig. Het raam wordt vervangen door (de bevestigingen aan het randkader los te schroeven en) de klemlijsten te verwijderen. Indien nodig kan vervolgens ook het kader verwijderd worden. Ten slotte wordt het nieuwe raam geïnstalleerd. In tegenstelling tot het XPS- en prefab afstandsschroefstelsel, moet de installatie en verwijdering telkens langs buiten uitgevoerd worden.

### LOKALE SCHADE

Wanneer de gevelafwerking lokaal beschadigd is, wordt best zo snel mogelijk ingegrepen aangezien deze rechtstreeks instaat voor de waterdichtheid. Zoals weergegeven op Figuur 81, worden de klemlijsten van de overeenkomstige aangetaste panelen (inclusief rubbers en glassteunen) losgeschroefd en verwijderd. Vervolgens wordt de isolatie in de aangetaste zone van tussen de afstandsschroeven en het houten lattenwerk gehaald. De aangetaste delen van het lattenwerk

worden lokaal ingezaagd en verwijderd. Eenmaal vrijgemaakt kan de beschadigde zone terug worden opgebouwd. De horizontale en verticale latten worden vervolledigd door invulstukken gefixeerd via afstandsschroeven. Vervolgens worden de isolatie, rubbers, glassteunen en gevelpanelen geplaatst. Het geheel wordt ten slotte afgewerkt met een klemlijst en kan de verwachte technische eigenschappen opnieuw garanderen.

*Het systeem bestaat uit een raster (afstandsschroeven, lattenwerk en klemlijst) waarin onafhankelijke componenten geklemd worden. De klem- en schroefverbindingen die hier voorkomen zorgen voor onbeschadigde materialen. Beide aspecten zorgen voor een minimale laag- en componentafhankelijkheid.*

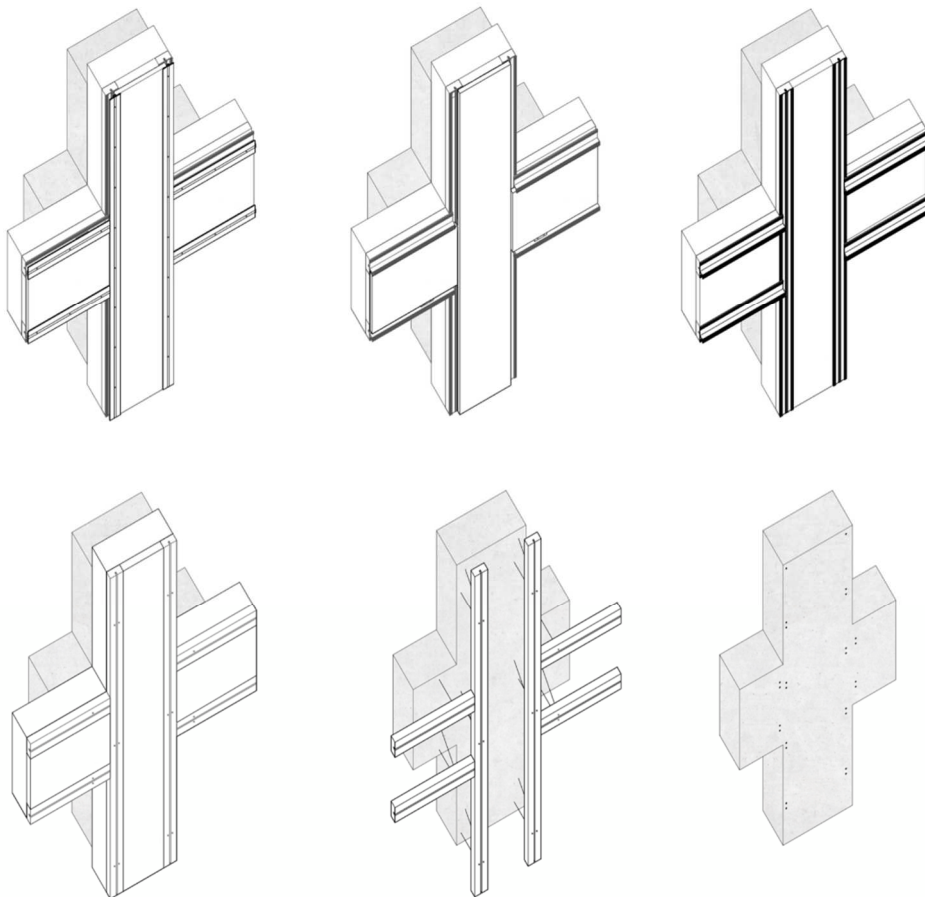


Figuur 81: Gordijngevelsysteem, lokale schade

## DEMONTAGE

Als de klemlijsten losgeschroefd worden kan de demontage bijzonder snel verlopen aangezien alle achterliggende materialen via inklemming bevestigd zijn (Figuur 82). De gevelpanelen, glassteunen en isolatie worden eenvoudig weggehaald. De vulkanisatie van de rubbers onderling zorgt bij demontage echter voor beschadigingen. Er wordt vanuit gegaan dat deze rubbers hierdoor niet hergebruikt kunnen worden. Demonteerbare rubbers of rubbers zonder vulkanisatie zouden bijgevolg een interessante optimalisatie vormen. Vervolgens wordt het houten lattenwerk verwijderd door de afstandsschroeven te demonteren.

*Demontage verloopt bijzonder eenvoudig door het veelvuldig gebruik van inklemmingen. Zoals eerder beschreven bij montage, zorgen deze inklemmingen echter voor een relatief hoog benodigd expertise. De inklemmingen en geschroefde verbindingen in dit systeem creëren opportuniteiten op vlak van hergebruik.*



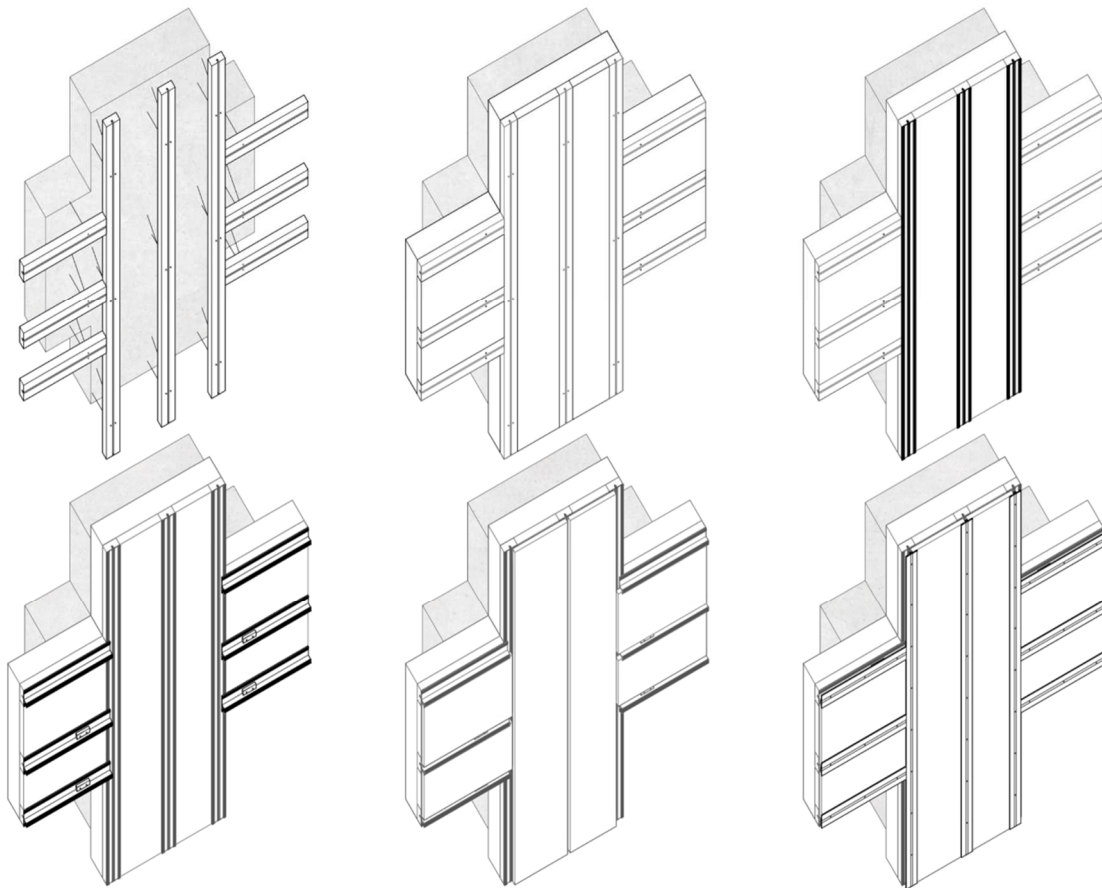
Figuur 82: Gordijngevelsysteem, demontage

### 5.2.4.2 SCENARIO 2: VAN STERRE S4 NAAR ETRIMO

#### MONTAGE

De montage op de Etrimo gevel doorloopt dezelfde stappen als deze op de Sterre S4. Het lattenwerk wordt aangevuld om de gesloten stroken van de Etrimo te bekleden (Figuur 83). De rubbers kunnen niet hergebruikt worden, dus deze worden volledig nieuw geplaatst. Op die manier blijft de waterdichte aansluiting gegarandeerd. De andere materialen kunnen wel hergebruikt worden. In tegenstelling tot het XPS-systeem, heeft de ritmering van de gevelafwerking minder marge aangezien deze volledig afhankelijk is van het gevelraster.

*Alle materialen, behalve de rubbers kunnen op de Etrimo woontoren hergebruikt worden. Het raster van dit systeem (afstandsschroeven, lattenwerk en klemlijst) kan eenvoudig aangepast worden aan de maatvoering van de Etrimo.*



Figuur 83: Gordijngesysteem, montage Etrimo

## 5.3 CONCLUSIE

### ETICS

De expertise van het ETICS-systeem is relatief hoog door het vakmanschap nodig bij de plaatsing van een pleisterlaag. Daarbovenop vraagt sloop om een gespecialiseerde aannemer. Ook is de component- en laagafhankelijkheid problematisch door de verlijmde verbindingen en de ononderbroken pleisterlaag. Dit zorgt er eveneens voor dat geen enkel materiaal gedemonteerd kan worden zonder beschadiging en bijgevolg is de flexibiliteit voor hergebruik onbestaande.

### XPS

De eenvoudige en snelle verbindingen in het XPS-systeem zorgen voor een lage expertise bij (de)montage. Bij montage wordt de expertise voornamelijk bepaald door de bevestiging van de aluminium rail, bij demontage door de isolatiepluggen. Deze isolatiepluggen verhinderen demontage op een klassieke manier en moeten afgezaagd worden om hergebruik van XPS mogelijk te maken. Ook zorgen de isolatiepluggen voor een verhoogde afhankelijkheid tussen de lagen onderling. Hiervoor zou een optimalisatie, bestaande uit demonteerbare isolatiepluggen, een oplossing bieden. De rechte aansluitingen van de XPS-platen en de overeenkomstige maten van de aluminium rails bepalen een onafhankelijke werking van de componenten. De rechte aansluitingen van de isolatieplaten maken het daarbovenop mogelijk deze in verschillende richtingen te (her)gebruiken. De dynamische gevelafwerking en het robuuste materiaalkarakter bieden veel kansen op vlak van hergebruik.

### PREFAB AFSTANDSSCHROEF

Prefabricatie verhoogt de toegankelijkheid van gevelrenovatiesystemen en zorgt voor een beperkte expertise nodig bij (de)montage. De moeilijkheid bij prefab panelen reduceert zich echter tot de aansluiting van de panelen onderling. Deze voegaansluiting definieert het (on)afhankelijke karakter van de componenten: een tand en groef-aansluiting zorgt ervoor dat de panelen een hoge componentafhankelijkheid bevatten. Een optimalisatie bij dit systeem zou bestaan uit onafhankelijke en tegelijk waterdichte verbindingen tussen de houtvezelplaten onderling. De demonteerbare verbindingen, voornamelijk geschroefd, binnen dit prefab paneel zorgen voor een beperkte laagafhankelijkheid. De maatvoering van de prefab panelen speelt een belangrijke rol om de herbruikbaarheid van het systeem te garanderen. Het prefab paneel, dat gebaseerd werd op de Sterre S4, kan eenvoudig aangevuld worden met in situ oplossingen om te voldoen aan de maatvoering van de Etrimo woonblok. Een combinatie van prefab panelen en in situ oplossingen resulteert bijgevolg in een grote flexibiliteit voor hergebruik. Een optimalisatie kan erin bestaan prefab panelen te ontwikkelen die geen voorgedefinieerde oriëntatie bevatten: de panelen zouden dan zowel horizontaal als verticaal geplaatst kunnen worden. Prefab panelen kunnen zowel op materiaal- als elementniveau hergebruikt worden.

### GORDIJNGEVELSYSTEEM

Het systeem bestaat uit een raster (bestaande uit afstandsschroeven, lattenwerk en klemlijst) waarin onafhankelijke componenten geklemd worden. Het gebruik van deze klemverbindingen zorgt niet alleen voor een lage component- en laagafhankelijkheid, maar resulteert het ook in minimale beschadiging bij demontage. Ook het potentieel voor hergebruik ligt hierdoor bijzonder hoog: alle materialen behalve de rubbers kunnen na demontage hergebruikt worden. De aanname, dat deze rubbers niet hergebruikt kunnen worden door vulkanisatie is eerder voorzichtig. Herbruikbare



rubbers of rubbers zonder vulkanisatie zouden hiervoor een optimalisatie bieden. Het inklemmingsprincipe, afkomstig uit de vliesgevelbouw, zorgt echter voor een verhoogde expertise. Een optimalisatie bestaande uit een prefab klemlijst en lattenwerk met rubbers zou de expertise kunnen verbeteren. Aangezien het schrijnwerk volgens de logica van het systeem (inklemming) geïntegreerd kan worden, is de installatie en vervanging hiervan uitzonderlijk eenvoudig. De focus in dit hoofdstuk lag uitsluitend op raamaansluitingen, waardoor de voordelen van dit systeem niet volledig tot uiting kwamen. In deze masterproef werd echter niet in rekening gebracht wat het aandeel kan zijn van gemakkelijke, circulaire aansluiting. De circulariteitsbeoordelingsmethode spitst zich voornamelijk toe op opbouwen in 2D en brengt circulariteit van aansluitingen op dit moment niet in rekening.

## 6 SCENARIO'S: LEVENSCYCLUSANALYSE

Binnen de concrete randvoorwaarden van twee fictieve scenario's worden de gevelrenovatiesystemen verder onderzocht op vlak van circulariteit. Aan de hand van een levenscyclusanalyse van de scenario's worden de parameters van de circulariteitsbeoordelingsmethode milieukost, recyclage en verwachte levensduur in dit hoofdstuk verder onderzocht.

### 6.1 ONDERZOEKSMETHODE

#### 6.1.1 SIMAPRO

De eerder gebruikte software voor levenscyclusanalyse, TOTEM, is een gebruiksvriendelijke tool om op een snelle manier de milieu-impact van gebouwelementen of gebouwen te bepalen. Om de levenscyclusanalyse van de systemen uit te voeren doorheen de scenario's heeft de vereenvoudigde methode van TOTEM, waarin veel keuzes reeds gemaakt zijn, echter te veel beperkingen. Zo bestaan niet alle gebruikte materialen in TOTEM en is het moeilijk om uitgebreide analyses per module te maken. In tegenstelling tot TOTEM kan in SimaPro de data voor de levenscyclusanalyse en de impactmethode geselecteerd worden. SimaPro laat ook toe om data van iedere module en ieder deelproces te bestuderen en indien nodig aan te passen. Op die manier kunnen gedetailleerde analyses uitgevoerd worden. De milieukosten voor de levenscyclusmodules A, B en C zullen met behulp van SimaPro berekend en samengeteld worden tot een scenario. Er wordt per module specifiek vastgelegd welke aspecten berekend en verwaarloosd worden in dit onderzoek. Dit onderzoek zal de aannames binnen de MMG-methode, zoals gebruikt in TOTEM (beschreven in hoofdstuk 1.1.3), eveneens toepassen en de verschillen hiermee worden beschreven.

#### DOEL EN REIKWIJDTE

##### Module A

De milieukost van module A wordt bepaald door de productie van de benodigde materialen (A1-A3), het transport naar de site en montage van het systeem (A4-A5). Het transport naar de site gebeurt, gebaseerd op het document 'Environmental profile of building elements' (Allacker & Debacker, 2020), met een Lorry 16-32 ton. Deze zorgt voor een milieukost van 3,98 euro per ton materiaal.

De montage van het systeem brengt daarbovenop ook een bijkomende milieukost van 5% teweeg wegens materiaalverlies (Allacker, Debacker, & Delem, 2011). Dit aandeel bijkomende milieukost wordt zowel bij in situ als prefab systemen ingerekend. Enerzijds veroorzaken prefabsystemen minder materiaalverlies bij montage, aangezien de panelen in betere omstandigheden samengesteld worden. Anderzijds zullen de snijverliezen bij prefab panelen echter groter zijn, omdat de panelen een vaste maatvoering hebben. Hergebruikte materialen veroorzaken geen milieukost voor productie, wel voor transport en montage. Geprefabriceerde systemen hebben bij hergebruik op elementniveau eveneens geen milieukost voor montage.

## Module B

In Module B worden de milieukosten voor vervangingen (B4) bepaald op basis van de technische levensduur van een materiaal. De milieukost voor vervanging bestaat uit de milieukost voor het nieuwe materiaal en voor de einde levensbehandeling van het verwijderde materiaal. De levensduren van de gebruikte materialen zijn gebaseerd op het 'Rapport – Technische levensduur van gebouwcomponenten' (OVAM, 2018), maar werden na herevaluatie aangepast indien de voorgestelde waardes tekort schoten (Bijlage 1). Echter zullende deze vervangingen bekeken worden vanuit een praktisch standpunt en kan het zijn dat een materiaal langer blijft zitten dan zijn technische levensduur beschrijft. In de opbouw van een systeem bevindt zich bijvoorbeeld een houtvezelplaat met een technische levensduur van 50 jaar. Deze plaat zou in theorie vervangen moeten worden na 50 jaar, maar aangezien het onderzochte scenario 60 jaar lang is, zal dit in de praktijk hoogstwaarschijnlijk niet gebeuren. In dit geval is er sprake van een 'uitsteltermijn' (Allacker & Debacker, 2020), aangezien het materiaal langer blijft zitten dan zijn technische levensduur voorschrijft. Als basisregel wordt in dit onderzoek vooropgesteld dat deze 'uitsteltermijn' van een materiaal bestaat uit maximaal 25% van zijn technische levensduur. Om de invloed van de levensduren op de resultaten van het onderzoek te analyseren zal hierrond een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden.

De milieukosten voor onderhoud (B2), herstelling (B3) en opknapbeurt (B5) worden in dit onderzoek verwaarloosd. De milieukost voor operationele energie (B6) wordt niet meegenomen, omdat voor alle systeem een functionele eenheid is vastgelegd van een vierkante meter met een U-waarde van 0,23 W/m<sup>2</sup>K. Bijgevolg zal de operationele energie voor de systemen gelijk zijn en wordt deze niet meegenomen in de analyse.

## Module C

Module C start met het bepalen van de milieukosten voor demontage of sloop (C1). De milieukosten voor demontage bestaan enkel uit materiaalverlies van 5% en de einde levensbehandeling van de materialen die hergebruikt kunnen worden. De milieukosten voor sloop zijn 0.00138 euro per kilogram. Demontage van prefab systemen resulteert niet in deze 5% materiaalverlies aangezien deze niet tot op materiaalniveau gedemonteerd moeten worden.

De materialen die bij demontage of sloop hun technische levensduur bereiken of beschadigd zijn en bijgevolg niet hergebruikt kunnen worden, krijgen een einde levensbehandeling toegekend. De keuze tussen recyclage, verbranding of storting is gebaseerd op 'Environmental profile of building elements' (Allacker & Debacker, 2020). Van deze drie einde levensbehandeling is recyclage de meest circulaire einde levensduur behandeling, aangezien de materialen in een (laagwaardigere) kringloop blijven. Daarom wordt er voor ieder materiaal onderzocht wat het recyclagepercentage is. Daarovenop wordt eveneens geanalyseerd hoeveel gerecycleerde inhoud de materialen bevatten. Deze begrippen werden eerder besproken in hoofdstuk 1.1.2.2. Het recyclagepercentage (RR) wordt bepaald volgens het document 'Environmental profile of building elements' (Allacker & Debacker, 2020) en de gerecycleerde inhoud (RC) kan vaak gevonden worden in technische fiches.

Bij iedere einde levensbehandeling wordt de milieukost voor transport naar de einde levensbehandeling (C2) en de milieukost voor storting of verbranding (C4) bepaald. De milieukosten voor sorteren (C3) worden in dit onderzoek niet meegenomen. De kosten voor transport worden bepaald door de afstand naar de einde levensbehandeling en zijn respectievelijk 30, 80 en 130 km voor recyclage, verbranding en storting. Dit transport gebeurt eveneens een 'Lorry 16-32 ton'

(Allacker & Debacker, 2020). In dit onderzoek wordt, zoals in TOTEM, de 'Cut-off'-allocatiemethode gebruikt, waarbij de winsten en de lasten van recyclage en hergebruik buiten de grenzen van de beschouwde levenscyclus vallen. Zo zal er bovenop de milieukost voor transport enkel een milieukost voor verbranding of storting bepaald worden. Dit is een impliciet voordeel voor recyclage aangezien deze geen milieukosten voor einde leven meegerekend krijgt. De mogelijke energierecuperatie bij verbranding wordt niet meegenomen wat een negatieve benadering is.

Materialen die hun technische levensduur nog niet bereikt hebben, worden onderzocht op vlak van hergebruik. In dit onderzoek wordt het potentieel voor hergebruik beoordeeld aan de hand van verbindingstype en resterende technische levensduur. Zo wordt per materiaal beoordeeld wat het potentieel voor hergebruik is en in welke toepassingen het opnieuw kan worden ingezet. De einde levenskosten van herbruikbare materialen worden uitgedrukt in een percentage van resterende levensduur. Dit wil zeggen dat materialen die bijvoorbeeld 60 jaar gebruikt worden en een technische levensduur hebben van 75 jaar, de einde levenskost van 80% meegerekend krijgen. Om de invloed van deze berekeningsmethode van einde levenskosten te onderzoeken, zal hiervoor een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd worden.

Module D komt niet aan bod in dit onderzoek, aangezien de aandacht voornamelijk gaat naar hergebruik of aanpassing tijdens de levensduur, module A tot C. Dit onderzoek is een kwalitatieve waardering van hergebruik en recyclage omdat ervan uit wordt gegaan dat deze systemen aan het einde van hun leven leiden tot zuivere materiaalstromen.

#### LEVENSCYCLUSINVENTARISATIE (LCI)

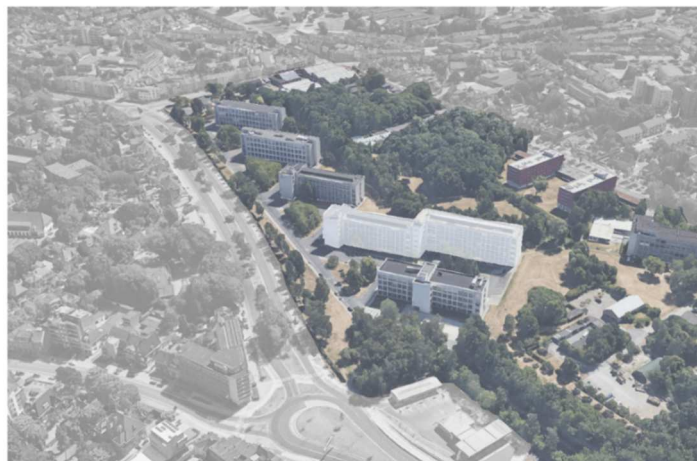
In SimaPro worden gegevens uit de Zwitserse Ecoinvent-database gebruikt, deze zijn niet aangepast aan de Belgische context zoals bij TOTEM het geval was.

De Levenscyclus-impactanalyse (LCAI) en de interpretatie van de resultaten gebeurt zoals beschreven staat in hoofdstuk 1.1.3.

---

#### 6.1.2 SCENARIO 1: 60 JAAR OP STERRE S4

Het eerste scenario werd eerder besproken in hoofdstuk 5.1 en bestaat erin dat de systemen 60 jaar op de Sterre S4 aanwezig blijven. In het eerste scenario zullen de milieukosten voor module A (productie, transport en montage) op 1 jaar, module B (productie, transport en montage bij



Figuur 84: Luchtbeeld Sterre

vervanging) over een tijdspanne van 1 tot 60 jaar en module C (demontage, transport en einde leven) op 60 jaar bepaald worden. Op basis van de resterende technische levensduur wordt in module C bepaald wat er verder met de materialen kan gebeuren. Als hergebruik nog van toepassing is, wordt beschreven voor welke toepassingen dit mogelijk zou zijn. Voor iedere module wordt de milieukost van elk gevelrenovatiesysteem bepaald. De modules worden vervolgens samengeteld om de totale milieukost van dit eerste scenario te begroten. De milieukosten van de verschillende systemen worden geanalyseerd en met elkaar vergeleken.

---

### 6.1.3 SCENARIO 2: VAN STERRE S4 NAAR ETRIMO

Het tweede scenario staat beschreven in hoofdstuk 5.1 en begint eveneens op de Sterre S4. Na 30 jaar wordt het systeem daar weggehaald en wordt het op de Etrimo woontoren geplaatst voor de resterende 30 jaar. Deel 1 (Sterre S4) bestaat uit module A op 1 jaar en module C op 30 jaar. Deel 2 (Etrimo) bestaat uit module A' op 30 jaar en module C' op 60 jaar. Module B en B' respectievelijk voor deel 1 en deel 2 worden niet geanalyseerd aangezien er geen vervanging op zal treden in deze periode van 30 jaar. Opnieuw worden de milieukosten van de verschillen modules samengeteld tot de totale milieukost van het scenario. Deze totale milieukost wordt per gevelrenovatiesysteem geanalyseerd en vergeleken.



Figuur 85: Luchtbeeld Etrimo

## 6.2 RESULTATEN

## 6.2.1 SCENARIO 1: 60 JAAR OP STERRE S4

## 6.2.1.1 ETICS-SYSTEEM (REFERENTIE)

ETICS - Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4		
Totale milieukost scenario = 11,17 €/m <sup>2</sup>		
Module A: Productie en montage (1 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)
Lijm	1,22	>60
Isolatiepluggen PE	0,019	60
EPS	3,31	63
Grondpleister	0,35	30
Wapening	0,33	30
Afwerkingspleister	0,10	30
Totale milieukost productie en montage = 5,67 €/m <sup>2</sup>		
Module B: Vervanging (1-60 jaar)		
Vervanging materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wanneer?
Nieuwe grondpleister	0,35	30 jaar
Nieuwe wapening	0,33	30 jaar
Nieuwe afwerkingspleister	0,10	30 jaar
Totale milieukost vervanging = 0,86 €/m <sup>2</sup>		
Module C: Einde leven (60 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
Sloop	0,025	-
Lijm	0,21	Verbranding
Isolatiepluggen PE	0,014	Verbranding
EPS	2,20	Verbranding
Grondpleister	1,50	Verbranding
Wapening pleister	0,045	Verbranding
Afwerkingspleister	0,64	Verbranding
Totale milieukost einde leven = 4,64 €/m <sup>2</sup>		

Tabel 33: ETICS in scenario 1

Het ETICS-systeem wordt geplaatst op de Sterre S4, de milieukosten voor productie en montage worden grotendeels door de EPS en lijm bepaald. De pleisterlaag aan de buitenzijde heeft een technische levensduur van 30 jaar, de achterliggende isolatielaag een van 63 jaar. Dit komt overeen met het circulaire principe 'gelaagdheid volgens levensduur'. Aangezien het systeem 60 jaar aanwezig blijft op de Sterre S4 zal deze pleisterlaag één keer vernieuwd moeten worden. Doordat het zeer moeilijk is om de pleisterlaag van de EPS-isolatie te halen zonder deze te beschadigen, is het eenvoudiger om bovenop de bestaande pleisterlaag een nieuwe toe te voegen. Hierdoor zal er een milieukost voor een nieuwe pleisterlaag ingerekend worden.

Na 60 jaar wordt het systeem van de Sterre S4 gehaald. Het is echter niet mogelijk om de materialen te demonteren zonder ze te beschadigen, dus zal de gevelopbouw volledig gesloopt worden (zoals besproken in hoofdstuk 5.2.1.1). Voor deze sloop wordt bijgevolg een milieukost ingerekend. Aangezien alle materialen na sloop niet meer hergebruikt kunnen worden, wordt de milieukost voor einde levensbehandeling van de volledige opbouw bepaald. Alle materialen in deze opbouw worden verbrand en voornamelijk de EPS en pleister hebben een groot aandeel in de milieukost voor einde leven. De pleisterlagen en lijm werden als restcategorie bij verbranding ingedeeld, wat waarschijnlijk een negatieve overschatting is, maar tegelijk het nadeel van niet scheidbare materialen in rekening brengt. Het recyclagepercentage van EPS en pleister is beide 0 %, de gerecycleerde inhoud voor EPS en pleister respectievelijk 10 (Epsindustry, 2021) en 0 % (idm, 2021). Hoewel zowel EPS (Betopor isolatie, 2021) en pleister (idm, 2021) in zuivere vorm potentieel hebben voor recyclage, kan dit momenteel niet gebeuren door vervuiling van de materiaalstromen.

*Bij dit systeem zijn de totale milieukosten voor productie en montage bijna even groot als deze voor de einde levensbehandeling. Dit scenario resulteert in een beperkte milieukost van 11,17 euro per vierkante meter voor het ETICS-systeem, zoals aangegeven in Tabel 33.*

## 6.2.1.2 XPS-SYSTEEM

XPS - Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4		
Totale milieukost scenario = 18,10 €/m <sup>2</sup>		
Module A: Productie en montage (1 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)
XPS-isolatie	6,14	63
Isolatiepluggen PE	0,12	60
Schroeven inox (Isolatie)	0,24	100
Plug PE (schroeven)	0,0076	60
Aluminium rail	4,79	75
Rockpanel gevelafwerking	2,54	50
Aluminium haakje (Rockpanel)	1,34	75
Schroeven inox (Rockpanel)	0,09	100
Afstandsblokje PE	0,043	60
Totale milieukost productie en montage = 16,13 €/m <sup>2</sup>		
Module B: Vervanging (1-60 jaar)		
Module C: Einde leven (60 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
Demontage	0,0017	-
XPS-isolatie	1,81	Verbranding
Isolatiepluggen PE	0,083	Verbranding
Schroeven inox (Isolatie)	3,81*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Plug PE (schroeven)	0,0057	Verbranding
Aluminium rail	7,14*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
Rockpanel gevelafwerking	0,048	Storting
Aluminium haakje (Rockpanel)	2,00*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
Schroeven inox (Rockpanel)	1,43*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Afstandsblokje PE	0,019	Hergebruik
Totale milieukost einde leven = 1,97 €/m <sup>2</sup>		

Tabel 34: XPS in scenario 1

De milieukosten voor productie en montage van het XPS-systeem op de Sterre S4 zijn grotendeels te wijten aan de XPS-isolatie en de aluminium rail. Daarbovenop heeft de Rockpanel gevelafwerking een relatief grote impact. Deze Rockpanel heeft een technische levensduur van 50 jaar, maar wordt niet vervangen aangezien dit scenario 60 jaar duurt. Deze Rockpanel heeft bijgevolg een uitsteltermijn van 10 jaar, wat 20 % is van zijn totale levensduur.

Na 60 jaar wordt het systeem gedemonteerd. Deze demontage gaat gepaard met een materiaalverlies van 5 % en de bijhorende milieukosten voor einde leven. De XPS-isolatie heeft een resterende technische levensduur van 3 jaar, de Rockpanel bereikt zijn technische levensduur, de isolatiepluggen worden beschadigd bij demontage en de PE-pluggen blijven in de muur zitten. Deze diverse redenen zorgen ervoor dat deze materialen niet meer hergebruikt kunnen worden, resulterend in een relatief hoge milieukost voor einde levensbehandeling. De aluminium en inox materialen hebben een resterende levensduur en potentieel voor hergebruik binnen dezelfde toepassing. Aangezien geventileerde gevelsystemen in Vlaanderen veelal worden toegepast, is de kans groot dat deze aluminium rails een volgende toepassing vinden.



Aluminium heeft een gerecycleerde inhoud van 45 % (European aluminium, 2016) en wordt voor 95% gerecycleerd na gebruik. XPS heeft een gerecycleerde inhoud van 37 % (Soprema, 2021) maar wordt na gebruik niet gerecycleerd. Rockpanel ten slotte heeft een gerecycleerde inhoud van 25 % (Joostdevree, 2010), maar wordt momenteel niet gerecycleerd. Hoewel XPS (VitaRecycles, 2021) en Rockpanel (Joostdevree, 2010) volgens de producenten 100 % recycleerbaar zijn, worden deze momenteel niet gerecycleerd.

*De milieukost van dit scenario is voornamelijk te wijten aan de milieukosten voor productie en montage, maar ook de milieukosten voor einde leven zijn relatief hoog. Dit scenario resulteert in een omvangrijke milieukost van 18,10 euro per vierkante meter, zoals aangegeven in Tabel 34.*

## 6.2.1.3 PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM

Prefab afstandsschroefstelsel - Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4		
Totale milieukost scenario = 8,64 €/m <sup>2</sup>		
Module A: Productie en montage (1 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)
Rotswol isolatie	1,75	75
Lattenwerk vurenhout	0,12	75
Vezelplaat	1,14	50
Vezelcement gevelafwerking	4,31	60
Afstandsschroeven	0,093	100
Plug PE (afstandsschroeven)	0,0076	60
Afstandshouders verzinkt staal	0,44	100
Schroeven (lattenwerk)	0,067	100
Schroeven (gevelafwerking)	0,0178	100
Totale milieukost productie en montage = 8,46 €/m <sup>2</sup>		
Module B: Vervanging (1-60 jaar)		
Module C: Einde leven (60 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
Demontage niet-prefab	0,0025	(37%)
Rotswol isolatie	0,028	Hergebruik
Lattenwerk vurenhout	0,013	Hergebruik
Vezelplaat	0,074	Verbranding
Vezelcement gevelafwerking	0,062	Storting
Afstandsschroeven	7,44*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Plug PE (afstandsschroeven)	0,0057	Verbranding
Afstandshouders verzinkt staal	3,57*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
Schroeven (lattenwerk)	5,36*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Schroeven (gevelafwerking)	1,43*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Totale milieukost einde leven = 0,18 €/m <sup>2</sup>		

Tabel 35: Prefab afstandsschroefstelsel in scenario 1

De gevel van de Sterre S4 bestaat voor 64 % uit het prefab afstandsschroefstelsel en voor 36 % uit een in situ variant op dit systeem. Dit resulteert in een milieukost voor productie en montage van 8,46 euro per vierkante meter die grotendeels te wijten is aan de vezelcement gevelafwerking. De vezelplaat heeft een technische levensduur van 50 jaar en zou in theorie vervangen moeten worden. Deze bevindt zich echter centraal in de opbouw, waardoor ze in de praktijk hoogstwaarschijnlijk niet vervangen zal worden binnen de 60 jaar. Dit resulteert in een uitsteltermijn van 20 % voor deze houtvezelplaat.

Na 60 jaar wordt het systeem gedemonteerd. De prefab panelen worden van de gevel gehaald zonder bijkomende milieukost, terwijl het verwijderen van de in situ oplossing zorgt voor een materiaalverlies van 5 % en bijhorende milieukosten voor einde leven. Bij demontage bereikt de houtvezelplaat en de vezelcement gevelafwerking zijn levensduur, waardoor deze niet hergebruikt kunnen worden. De PE-pluggen van de schroeven worden niet uit de muur gehaald. Enkel voor deze materialen worden de totale milieukosten voor einde levensbehandeling bepaald, resulterend in een beperkte milieukost. Verschillende materialen hebben hun technische levensduur na 60 jaar nog niet bereikt: de rotswol

en het lattenwerk hebben nog een resterende levensduur van 15 jaar. De rotswol zou eventueel hergebruikt kunnen worden in akoestische toepassingen (vb. binnenwanden) of voor (b)randafwerking (vb. deuren). Het lattenwerk heeft potentieel voor hergebruik bijvoorbeeld in elektrospouwen voor binnenwanden. Ook de schroeven en afstandhouders hebben, gebaseerd op hun resterende levensduur, potentieel voor hergebruik.

Rotswol heeft een gerecycleerde inhoud van 37 % (Interreg Europe, 2021), maar wordt zelf niet gerecycleerd. Houtvezelplaten bezitten 15 % (Marlite, 2021) gerecycleerde inhoud en hebben een recyclagepercentage van 5 %. De gerecycleerde inhoud van houten lattenwerk is 0 % en 75 % wordt achteraf gerecycleerd. Vezelcementplaten hebben ten slotte geen gerecycleerde inhoud en worden niet gerecycleerd na gebruik. Hoewel rotswol volgens de producent 100 % recycleerbaar is (Rockwool, 2021), worden momenteel enkel het lattenwerk en de houtvezelplaten in geringe mate gerecycleerd.

*De milieukost van het prefab afstandsschroefstelsel in dit scenario is bijna uitsluitend te wijten aan de milieukosten voor productie en montage. Dit resulteert in een totale milieukost van slechts 8,64 euro per vierkante meter, zoals aangegeven in Tabel 35.*

## 6.2.1.4 GORDIJNGEVELSYSTEEM

Gordijngewel - Scenario 1: 60 jaar op Sterre S4		
Totale milieukost scenario = 13,62 €/m <sup>2</sup>		
Module A: Productie en montage (1 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)
<i>Rotswol</i>	1,75	75
<i>Lattenwerk vurenhout</i>	0,38	75
<i>Afstandsschroeven</i>	0,093	100
<i>Rockpanel gevelafwerking</i>	2,54	50
<i>Klemprofiel aluminium</i>	6,12	75
<i>Rubbers</i>	1,36	>60
<i>Schroeven inox (klemprofiel)</i>	0,11	100
<i>PE Plug (Afstandsschroeven)</i>	0,01	60
<i>Glassteunen PE</i>	0,015	60
Totale milieukost productie en montage = 13,08 €/m <sup>2</sup>		
Module B: Vervanging (1-60 jaar)		
Module C: Einde leven (60 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt er mee?
<i>Demontage</i>	0,0048	-
<i>Rotswol</i>	0,028	Hergebruik
<i>Lattenwerk vurenhout</i>	0,039	Hergebruik
<i>Afstandsschroeven</i>	7,45*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
<i>Rockpanel gevelafwerking</i>	0,048	Storting
<i>Klemprofiel aluminium</i>	9,11*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
<i>Rubbers</i>	0,41	Verbranding
<i>Schroeven inox (klemprofiel)</i>	1,79*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
<i>PE Plug (Afstandsschroeven)</i>	0,0071	Verbranding
<i>Glassteunen PE</i>	0,0066	Hergebruik
Totale milieukost einde leven = 0,52 €/m <sup>2</sup>		

Tabel 36: Gordijngesysteem in scenario 1

Het gordijngesysteem wordt op de Sterre S4 geplaatst. Dit resulteert in een milieukost voor productie en montage die grotendeels te wijten is aan het aluminium klemprofiel en de Rockpanel gevelafwerking. Zoals eerder besproken bij het XPS-systeem (6.2.1.2) zou de Rockpanel op basis van zijn technische levensduur vervangen moeten worden na 50 jaar, maar zal dit in de praktijk nagenoeg niet gebeuren.

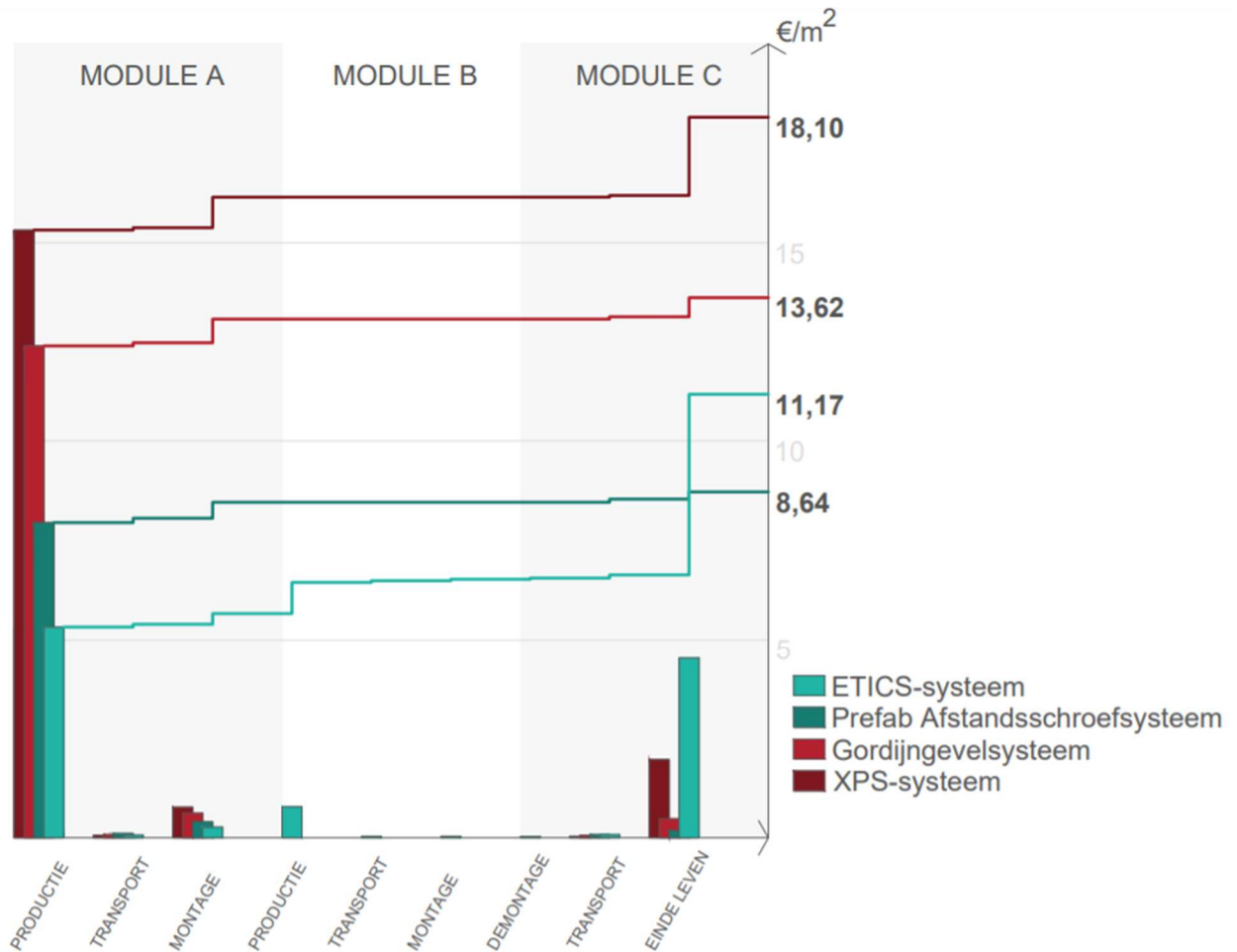
Na 60 jaar wordt het systeem gedemonteerd en worden de milieukosten voor einde leven van de materialen bepaald. De PE-pluggen en de Rockpanel kunnen niet verder hergebruikt worden. De rubbers die in dit systeem gebruikt worden, hebben weinig potentieel voor hergebruik aangezien deze ge vulkaniseerd werden. Aangezien de rotswol, het aluminium profiel, het lattenwerk, de (afstands)schroeven en de glassteunen hun technische levensduur nog niet bereiken, hebben deze materialen daarentegen wel potentieel voor hergebruik.

Rubbers hebben een gerecycleerde inhoud van 25 % (Craipeau, 2019) en het recyclagepercentage is 10 %. Rotswol heeft een recyclagepercentage van 0 % en een gerecycleerde inhoud van 37 % (Interreg

Europe, 2021). Houten lattenwerk heeft een gerecycleerde inhoud van 0 en recyclagepercentage van 75 %. Rockpanel heeft een recyclagepercentage van 0 % en gerecycleerde inhoud van 25 % (Joostdevree, 2010). Aluminium ten slotte heeft een gerecycleerde inhoud van 45 % (European aluminium, 2016) en recyclagepercentage van 95 %. Hoewel rotswol en Rockpanel 100 % recycleerbaar zijn (Rockwool, 2021) (Joostdevree, 2010) worden deze momenteel niet gerecycleerd. Ook de rubbers hebben potentieel voor meer recyclage, deze zijn 85 % recycleerbaar (Emis, 2021), maar worden slechts voor 10 % gerecycleerd.

*De milieukost van het gordijngesysteem in dit scenario is grotendeels te wijten aan de milieukosten voor productie en montage. Dit resulteert in een totale milieukost van 13,62 euro per vierkante meter zoals aangegeven in Tabel 36.*

6.2.1.5 VERGELIJKING SYSTEMEN SCENARIO 1



Figuur 86: Milieukost van systemen doorheen scenario 1

Op Figuur 86 worden de milieukosten van de onderzochte systemen in het volledige scenario met elkaar vergeleken. Het ETICS-systeem heeft bij productie de laagste milieukost, het XPS-systeem de hoogste. De ETICS is het enige systeem dat een milieukost heeft in module B wat een gevolg is van de pleisterlaag die vervangen moet worden na 30 jaar. De einde levenskosten zijn bij de drie circulaire systemen gering, enkel de ETICS heeft hier een groot aandeel. Hierdoor is de totale milieukost na het volledige scenario bij de ETICS niet meer de laagste, maar stijgt deze zodanig dat het prefab afstandsschroefstelsysteem een lagere totale milieukost heeft. De milieukosten voor productie bij de ETICS zijn 51% van de totale milieukosten aan het einde van dit scenario. Het prefab afstandsschroefstelsysteem heeft een relatief lage milieukost voor productie en stijgt amper naar het einde van het scenario toe. De productie bij dit systeem zorgt voor 98 % van de totale milieukost van dit scenario. Ook het gordijngevelsysteem heeft een beperkte stijging in vergelijking met het ETICS-systeem. De productie van het gordijngevelsysteem heeft een aandeel van 89 % in de totale milieukost van dit scenario. Het XPS-systeem heeft de hoogste milieukosten voor productie en de tweede grootste voor einde levensbehandeling, resulterend in de grootste totale milieukost. De milieukost van het XPS-systeem voor productie is 89 % van de totale milieukost van dit scenario.

Wanneer materialen niet meer herbruikbaar zijn, is recyclage een mogelijkheid om materialen in de kringloop te houden. Voor de verschillende systemen worden de gerecycleerde inhoud en het

recyclagepercentage van de gebruikte materialen met elkaar vergeleken in Tabel 37. In het ETICS-systeem bevat enkel de EPS in geringe mate gerecycleerde inhoud. Bij de andere systemen wordt de meerderheid aan materialen gerecycleerd en/of bevat gerecycleerde inhoud. Vooral bij het gordijngesysteem valt op dat alle materialen gerecycleerde inhoud bevatten, gerecycleerd worden of beide.

	<i>ETICS-systeem</i>	<i>XPS-systeem</i>	<i>Prefab afstandsschroef- systeem</i>	<i>Gordijnges- systeem</i>
<i>Gerecycleerde inhoud (RC)</i>	EPS (10%) Pleister	XPS (37%) Aluminium (45%) Rockpanel (25%)	Rotswol (37%), Houtvezel (15%) Naaldhout Vezelcementplaat	Rotswol (37%) Naaldhout Rubbers (25%) Rockpanel (25%) Aluminium (45%)
<i>Recyclage- percentage (RR)</i>	EPS Pleister	XPS Aluminium (95%) Rockpanel	Rotswol Houtvezel (5%) Naaldhout (75%) Vezelcementplaat	Rotswol Naaldhout (75%) Rubbers (10%) Rockpanel Aluminium (95%)

Tabel 37: Gerecycleerde inhoud (RC) en recyclagepercentage (RR) per gevelrenovatiesysteem

## 6.2.2 SCENARIO 2: VAN STERRE S4 NAAR ETRIMO

## 6.2.2.1 ETICS-SYSTEEM (REFERENTIE)

ETICS - Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo		
Totale milieukost scenario = 20,62 €/m <sup>2</sup>		
Module A: Productie en montage (1 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)
Lijm	1,22	>60
Isolatiepluggen PE	0,019	60
EPS	3,31	63
Grondpleister	0,35	30
Wapening	0,33	30
Afwerkingspleister	0,10	30
Totale milieukost productie en montage = 5,67 €/m <sup>2</sup>		
Module B: Vervanging (1-30 jaar)		
Module C: Einde leven (30 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
Sloop	0,025	-
Lijm	0,21	Verbranding
Isolatiepluggen PE	0,014	Verbranding
EPS	2,20	Verbranding
Grondpleister	1,50	Verbranding
Wapening pleister	0,045	Verbranding
Afwerkingspleister	0,64	Verbranding
Totale milieukost einde leven = 4,64 €/m <sup>2</sup>		
Totale milieukost Sterre = 10,31 €/m <sup>2</sup>		
Etrimo		
Module A': Productie en montage (31 jaar)		
Totale milieukost productie en montage = 5,67 €/m <sup>2</sup>		
Module B': Vervanging en onderhoud (31-60 jaar)		
Module C': Einde leven (60 jaar)		
Totale milieukost einde leven = 4,64 €/m <sup>2</sup>		
Totale milieukost Etrimo = 10,31 €/m <sup>2</sup>		

Tabel 38: ETICS in scenario 2

Het ETICS-systeem wordt in dit tweede scenario op de Sterre geplaatst, maar na 30 jaar gedemonteerd. De milieukosten voor productie en montage op de Sterre zijn 27 % van de totale milieukosten van dit scenario. Aangezien demontage zonder schade aan de materialen bij een ETICS-systeem niet mogelijk is, wordt het systeem gesloopt. De einde levenskosten hebben een relatief grote invloed op de totale milieukost.

De materialen binnen het ETICS-systeem hebben totaal geen potentieel voor hergebruik en bijgevolg moet het gevelsysteem volledig opnieuw geplaatst worden op de Etrimo woontoren. Dit resulteert in twee keer de milieukost van productie en einde levensbehandeling met een resultaat van 20,62 euro per functionele eenheid. De milieukost voor hergebruik in dit scenario (bestaande uit module C en A') is bij het ETICS-systeem 10,32 euro per vierkante meter of 50 % van de totale milieukost in dit scenario.



Dit scenario is bovendien voordelig voor het ETICS-systeem aangezien de pleisterlaag een technische levensduur heeft van 30 jaar. Deze 30 jaar valt hier toevallig samen met de demontage van het systeem waardoor de bijkomende milieukosten van een nieuwe pleisterlaag hier niet van toepassing zijn.

*Bij dit systeem zijn de totale milieukosten voor de Sterre S4 even groot als deze voor de Etrimo. Dit scenario resulteert in een aanzienlijke milieukost van 20,62 euro per vierkante meter, zoals aangegeven in Tabel 38.*

## 6.2.2.2 XPS-SYSTEEM

XPS - Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo				
Totale milieukost scenario = 19,23 €/m <sup>2</sup>				
Module A: Productie en montage (1 jaar)				
	Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)	
Sterre S4	XPS-isolatie	6,14	63	
	Isolatiepluggen PE	0,12	60	
	Schroeven inox (Isolatie)	0,24	100	
	Plug PE (schroeven)	0,0076	60	
	Aluminium rail	4,79	75	
	Rockpanel gevelafwerking	2,54	50	
	Aluminium haakje (Rockpanel)	1,34	75	
	Schroeven inox (Rockpanel)	0,09	100	
	Afstandsblokje PE	0,043	60	
	Totale milieukost productie en montage = 16,13 €/m <sup>2</sup>			
	Module B: Vervanging (1-30 jaar)			
	Module C: Einde leven (30 jaar)			
		Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
		Demontage	0,094	-
	Isolatiepluggen PE	0,083	Verbranding	
	Plug PE (schroeven)	0,0057	Verbranding	
Totale milieukost einde leven = 0,19 €/m <sup>2</sup>				
Totale milieukost Sterre = 16,32 €/m <sup>2</sup>				
Etrimo	Module A': Productie en montage (31 jaar)			
		Materialen	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Aandeel gevel Etrimo (%)
		Hergebruikt (totale opbouw)	0,82	100
		Nieuw Isolatiepluggen PE	0,12	100
		Nieuw plug PE	0,0081	100
	Totale milieukost productie en montage = 0,94 €/m <sup>2</sup>			
	Module B': Vervanging en onderhoud (31-60 jaar)			
	Module C': Einde leven (60 jaar)			
		Materialen	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
		Demontage	0,0017	-
		XPS-isolatie	1,81	Verbranding
		Isolatiepluggen PE	0,083	Verbranding
		Schroeven inox (Isolatie)	3,81*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
		Plug PE (schroeven)	0,0057	Verbranding
		Aluminium rail	7,14*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
		Rockpanel gevelafwerking	0,048	Storting
		Aluminium haakje (Rockpanel)	1,99*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
		Schroeven inox (Rockpanel)	1,43*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
		Afstandsblokje PE	0,019	Hergebruik
Totale milieukost einde leven = 1,97 €/m <sup>2</sup>				
Totale milieukost Etrimo = 2,91 €/m <sup>2</sup>				

Tabel 39: XPS in scenario 2

De milieukost van de productie en montage van het XPS-systeem op de Sterre S4 is 16,13 euro per vierkante meter, wat gelijk is aan 84 % van de totale milieukost van dit scenario. De demontage van het systeem op de Sterre S4 zorgt zoals eerder besproken voor het verlies van de PE-pluggen en de isolatiepluggen. Hierdoor worden in module C de einde levenskosten voor deze materialen ingerekend, wat resulteert in een beperkte milieukost.

Vervolgens worden de herbruikbare materialen op de Etrimo woontoren geplaatst en moeten alleen de milieukosten voor hergebruik en nieuwe isolatie- en PE-pluggen ingerekend worden. Ook module A' resulteert hierdoor in een zeer beperkte milieukost. De milieukosten voor hergebruik van het XPS-systeem (module C en A' tezamen) zijn 1,12 euro per vierkante meter, wat in dit scenario gelijk is aan 6 % van de totale milieukost.

*De milieukosten in dit scenario worden vooral gecreëerd door productie en einde levensbehandeling, de milieukost voor hergebruik is beperkt. Dit scenario resulteert in een totale milieukost van 19,23 euro per vierkante meter zoals weergegeven in Tabel 39.*

## 6.2.2.3 PREFAB AFSTANDSSCHROEFSYSTEEM

Prefab afstandsschroefstelsel - Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo		
Totale milieukost scenario = 8,93 €/m <sup>2</sup>		
Module A: Productie en montage (1 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)
Rotswol isolatie	1,75	75
Lattenwerk vurenhout	0,12	75
Vezelplaat	1,14	50
Vezelcement gevelafwerking	4,31	60
Afstandsschroeven	0,093	100
Plug PE (afstandsschroeven)	0,0076	60
Afstandshouders verzinkt staal	0,44	100
Schroeven (lattenwerk)	0,067	100
Schroeven (gevelafwerking)	0,0178	100
Totale milieukost productie en montage = 8,46 €/m <sup>2</sup>		
Module B: Vervanging (1-30 jaar)		
Module C: Einde leven (30 jaar)		
Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
Demontage niet-prefab	0,0094	(37%)
Plug PE (Afstandsschroeven)	0,0057	Verbranding
Totale milieukost einde leven = 0,0091 €/m <sup>2</sup>		
Totale milieukost Sterre = 8,47 €/m <sup>2</sup>		
Module A': Productie en montage (31 jaar)		
Materialen	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Aandeel gevel Etrimo (%)
Hergebruikt prefab panelen	0,11	60
Hergebruikt (totale opbouw)	0,51	40
Nieuw plug PE	0,0081	100
Totale milieukost productie en montage = 0,28 €/m <sup>2</sup>		
Module B': Vervanging en onderhoud (31-60 jaar)		
Module C': Einde leven (60 jaar)		
Materialen	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
Demontage niet-prefab	0,0025	(40%)
Rotswol isolatie	0,028	Hergebruik
Lattenwerk vurenhout	0,013	Hergebruik
Vezelplaat	0,074	Verbranding
Vezelcement gevelafwerking	0,062	Storting
Afstandsschroeven	7,44*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Plug PE (afstandsschroeven)	0,0057	Verbranding
Afstandshouders verzinkt staal	3,57*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
Schroeven (lattenwerk)	5,36*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Schroeven (gevelafwerking)	1,43*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
Totale milieukost einde leven = 0,18 €/m <sup>2</sup>		
Totale milieukost Etrimo = 0,46 €/m <sup>2</sup>		

Tabel 40: Prefab afstandsschroefstelsel in scenario 2

De gevel van de Sterre S4 bestaat bij het prefab afstandsschroefstelsel uit 64 % prefab panelen en 36 % in situ oplossingen. De productie en montage van het stelsel op de Sterre S4 resulteert in een milieukost van 8,93 euro per vierkante meter of 95 % van de totale milieukost in dit scenario. Het afstandsschroefstelsel wordt op de Sterre S4 geplaatst voor 30 jaar, gedemonteerd en opnieuw gemonteerd op de Etrimo woontoren. Alle materialen, behalve de PE-pluggen kunnen niet gedemonteerd en bijgevolg niet hergebruikt worden.

De Etrimo gevel bestaat uit 60 % prefab panelen en 40 % in situ aanvullingen. Het hergebruiken van prefab panelen zorgt voor een kleinere milieukost dan in situ uitvoeringen. Prefab panelen kunnen namelijk op elementniveau hergebruikt worden, aangezien er minder milieukost is door materiaalverliezen bij (de)montage. Dit resulteert in een beperkte milieukost voor hergebruik binnen dit scenario (bestaande uit module C en A') van 0,30 euro per functionele eenheid, wat gelijk is aan slechts 3 % van de totale milieukost van dit scenario.

*De milieukost van het prefab afstandsschroefstelsel in dit scenario is bijna uitsluitend te wijten aan de milieukosten voor productie en montage. De milieukost voor hergebruik van dit stelsel is bijzonder laag. Dit resulteert in een minimale milieukost van 8,93 euro per vierkante meter, zoals aangegeven in Tabel 35.*

#### Gevoeligheidsanalyse in situ vs. prefab

Zoals eerder beschreven bestaat het prefab afstandsschroefstelsel uit een hybride oplossing, een combinatie van prefab panelen en in situ aanvullingen. Om na te gaan wat de invloed is van prefabricatie bij dit stelsel, wordt de milieukost bepaald voor een volledige in situ uitvoering. De bijkomende milieukosten voor een volledige in situ uitvoering ten opzichte van de hybride oplossing zijn:

- De milieukosten voor demontage (module C) zijn 0,006 euro per functionele eenheid groter bij een volledig in situ-systeem.
- De milieukosten voor hergebruik (module A') zijn 0,518 euro per functionele eenheid groter bij een volledig in situ-systeem.
- De milieukosten voor demontage (module C') zijn opnieuw 0,006 euro per functionele eenheid groter bij een volledig in situ-systeem.

Dit resulteert in een bijkomende en totale milieukost voor de in situ uitvoering van respectievelijk 0,53 en 9,46 euro per functionele eenheid. Het (deels) prefab karakter van het prefab afstandsschroefstelsel zorgt bijgevolg voor een voordeel van 6 % in de milieukost van dit scenario.

## 6.2.2.4 GORDIJNGEVELSYSTEEM

Gordijngesysteem - Scenario 2: Van Sterre S4 naar Etrimo				
Totale milieukost scenario = 16,11 €/m <sup>2</sup>				
Module A: Productie en montage (1 jaar)				
	Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Levensduur (jaar)	
Sterre S4	Rotswol	1,75	75	
	Lattenwerk vuren hout	0,38	75	
	Afstandsschroeven	0,093	100	
	Rockpanel gevelafwerking	2,54	50	
	Klemprofiel aluminium	6,12	75	
	Rubbers	1,36	>60	
	Schroeven inox (klemprofiel)	0,11	100	
	PE Plug (Afstandsschroeven)	0,01	60	
	Glassteunen PE	0,015	60	
	Totale milieukost productie en montage = 13,08 €/m <sup>2</sup>			
	Module B: Vervanging (1-30 jaar)			
Module C: Einde leven (20 jaar)				
	Materiaal	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?	
	Demontage	0,0072	-	
	Rubbers	0,41	Verbranding	
	Plug PE (Afstandsschroeven)	0,0071	Verbranding	
Totale milieukost einde leven = 0,42 €/m <sup>2</sup>				
Totale milieukost Sterre = 13,50 €/m <sup>2</sup>				
Etrimo	Module A': Productie en montage (31 jaar)			
		Materialen	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Aandeel gevel Etrimo (%)
		Hergebruikt (totale opbouw)	0,63	100
		Nieuw rubbers	1,43	100
		Nieuw plug PE	0,01	100
	Totale milieukost productie en montage = 2,07 €/m <sup>2</sup>			
	Module B': Vervanging en onderhoud (31-60 jaar)			
	Module C': Einde leven (60 jaar)			
		Materialen	Milieukost (€/m <sup>2</sup> )	Wat gebeurt ermee?
		Demontage	0,0048	-
		Rotswol	0,028	Hergebruik
		Lattenwerk vuren hout	0,039	Hergebruik
		Afstandsschroeven	7,45*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
		Rockpanel gevelafwerking	0,048	Storting
		Klemprofiel aluminium	9,11*10 <sup>-4</sup>	Hergebruik
		Rubbers	0,41	Verbranding
		Schroeven inox (klemprofiel)	1,79*10 <sup>-5</sup>	Hergebruik
	PE Plug (Afstandsschroeven)	0,0071	Verbranding	
	Glassteunen PE	0,0066	Hergebruik	
Totale milieukost einde leven = 0,54 €/m <sup>2</sup>				
Totale milieukost Etrimo = 2,61 €/m <sup>2</sup>				

Tabel 41: Gordijngesysteem in scenario 2

Het gordijngesysteem wordt eveneens op de Sterre geplaatst voor 30 jaar, wat resulteert in een milieukost van 13,08 euro per functionele eenheid of 81 % van de totale milieukost van dit scenario. Vervolgens wordt het systeem gedemonteerd en op de Etrimo woontoren geplaatst. Hierbij kunnen de rubbers en de PE-pluggen niet hergebruikt worden na de demontage en zorgen deze voor het grootste aandeel in modules C en A'. De milieukost voor hergebruik binnen dit scenario (module C en A' tezamen) bestaat uit 2,5 euro per functionele eenheid of 16 % van de totale milieukosten en wordt voornamelijk door de rubbers bepaald.

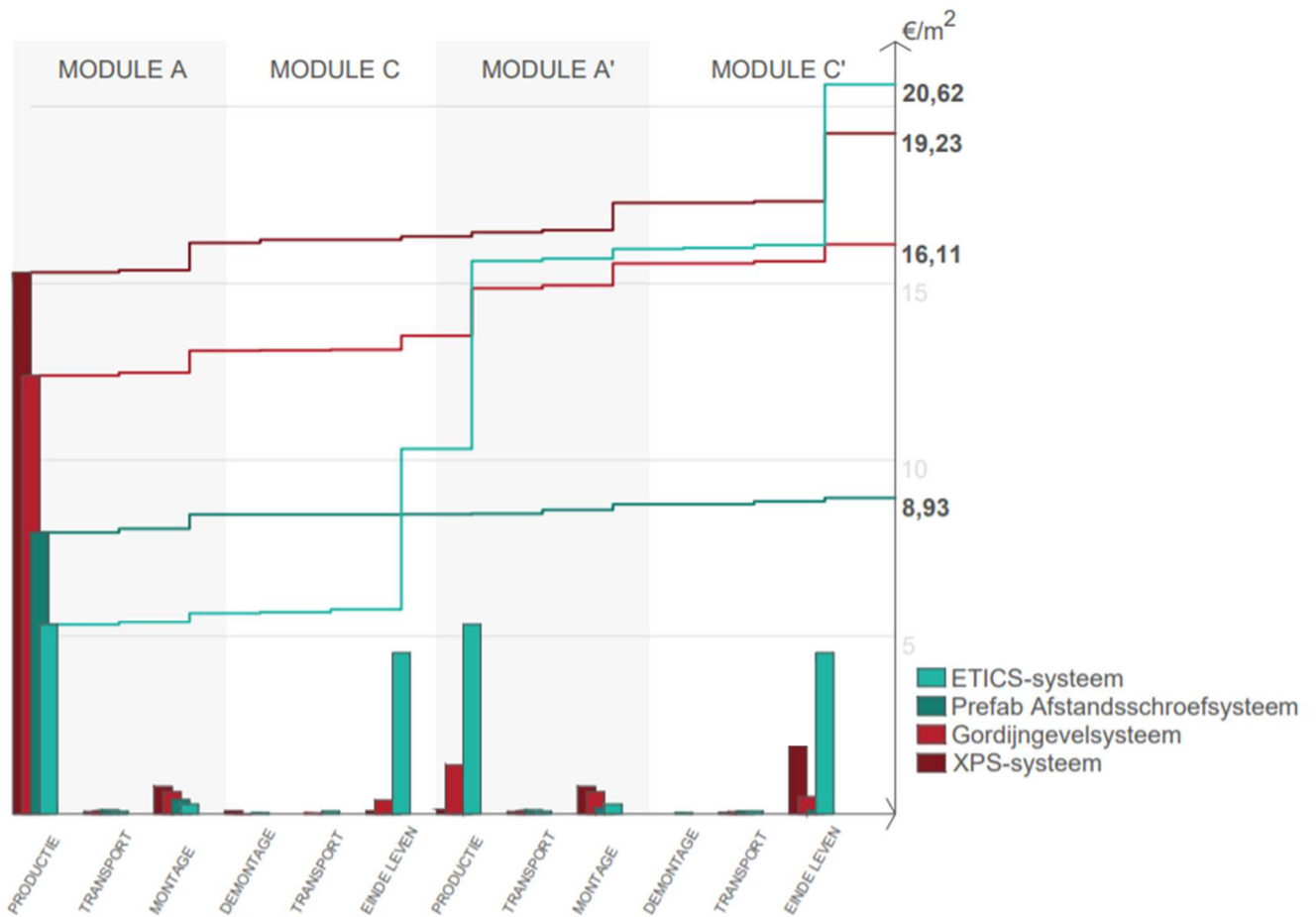
*De milieukost van het gordijngesysteem in dit scenario is grotendeels te wijten aan de milieukosten voor productie en montage. Ook de milieukosten voor hergebruik zijn (door het niet herbruikbare karakter van de rubbers) relatief hoog. Dit resulteert in een totale milieukost van 16,11 euro per vierkante meter zoals aangegeven in Tabel 41.*

#### Gevoeligheidsanalyse rubbers

In deze masterproef wordt aangenomen dat rubbers niet hergebruikt kunnen worden, wat een negatieve benadering kan zijn van de realiteit. Om na te gaan wat de invloed is van deze aanname, wordt deze situatie vergeleken met theoretisch volledig herbruikbare rubbers.

Indien de rubbers hergebruikt kunnen worden reduceert de milieukost bij hergebruik van 2,5 naar 0,7 euro per functionele eenheid of van 16 % tot 4 % van de totale milieukosten. De totale milieukost bij herbruikbare rubbers daalt van 16,11 naar 14,31 euro per functionele eenheid, wat een reductie is van 12 %. Deze rubbers hebben bijgevolg een grote invloed op de milieukosten. Herbruikbare rubbers zouden de milieukost in dit scenario beduidend kunnen reduceren.

6.2.2.5 VERGELIJKING SYSTEMEN SCENARIO 2



Figuur 87: Milieukost van systemen doorheen scenario 2

Op Figuur 87 is het verloop van de milieukost van elk systeem in het tweede scenario weergegeven. Zoals bij het eerste scenario het geval was, is de milieukost van module A in dit scenario eveneens de kleinste bij het ETICS-systeem en grootste bij het XPS-systeem. Doordat het systeem hier hergebruikt wordt na 30 jaar, wat bij de ETICS onmogelijk is, verdubbelt de milieukost doorheen de tijd en is zijn totale milieukost het grootste. De milieukost van de ETICS voor module A is 27 % van de totale milieukost. Het prefab afstandsschroefstelsel heeft door efficiënt materiaalgebruik, een relatief kleine milieukost bij productie en einde levensbehandeling. Als gevolg van een volledig demonteerbare en herbruikbare opbouw, resulteert dit systeem in een minimale bijkomende milieukost in de loop van het scenario. De milieukost van module A is bijgevolg 95 % van de totale milieukost. Tussen het extreme gedrag van de ETICS- en het prefab afstandsschroefstelsel bevinden zich het XPS- en gordijngevelsysteem. Beiden hebben een aanzienlijke milieukost voor productie, respectievelijk 84 % en 81 % van de totale milieukost en lopen beperkt op naar het einde van het scenario toe.

Dit scenario toont duidelijk de voordelen van circulair bouwen op vlak van milieukost. Circulaire systemen investeren over het algemeen meer in demonteerbare verbindingen en robuuste materialen wat zorgt voor een hogere milieukost bij productie, maar resulteren daardoor in beperkte milieukosten in de loop van dit scenario.

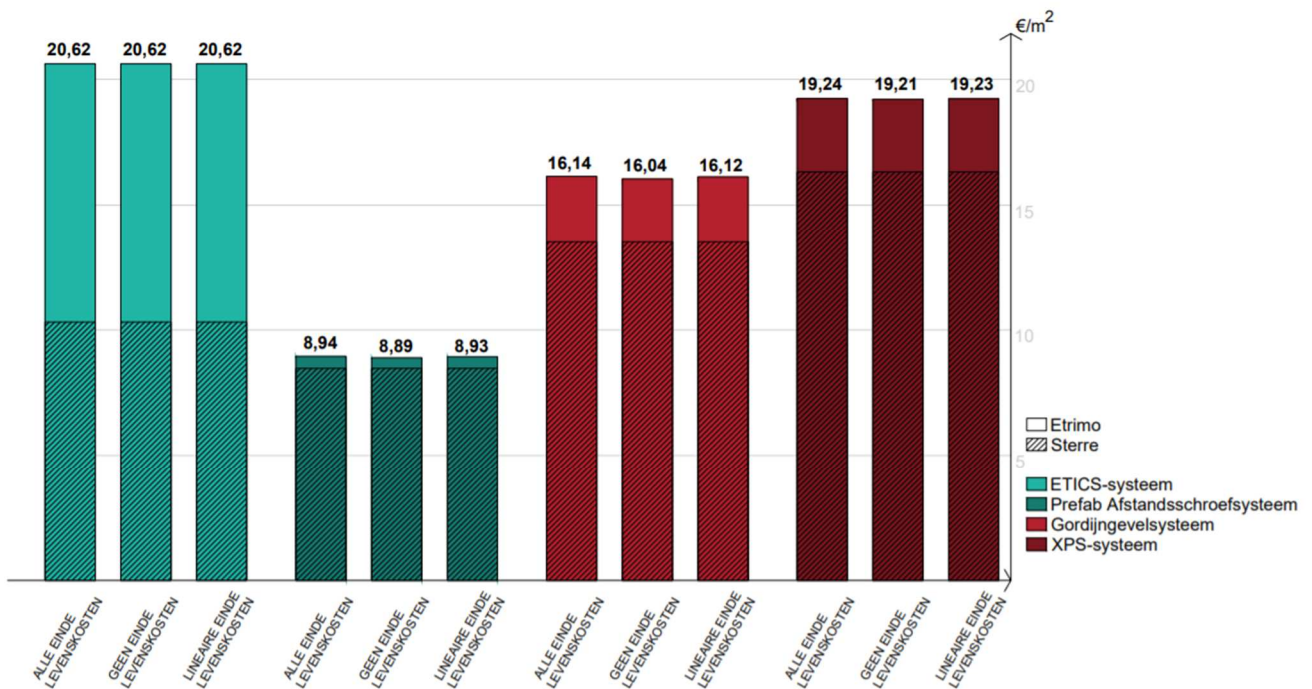


## 6.2.2.6 GEVOELIGHEIDSANALYSES

## HERGEBRUIK

Wanneer een materiaal, na zijn gebruiksduur van 60 jaar in het scenario, zijn technische levensduur nog niet bereikt heeft, kan deze hergebruikt worden. De milieukosten voor einde levensbehandeling van de materialen die hergebruikt kunnen worden, werden in dit onderzoek procentueel via het aandeel gebruikte tegenover verwachte levensduur ingerekend. Om na te gaan hoeveel invloed deze beslissing heeft op de resultaten van het onderzoek werd hiervoor een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Drie opties werden onderzocht en met elkaar vergeleken (van links naar rechts): (1) de einde levenskosten van herbruikbare materialen worden volledig meegerekend in deze levenscyclus, (2) de einde levenskosten van herbruikbare materialen worden niet meegerekend en (3) het aandeel gebruikte technische levensduur wordt procentueel meegerekend in de milieukosten voor einde leven (de toegepaste methode). Zoals weergegeven op Figuur 88 zorgt dit voor kleine verschillen en heeft deze beslissing geen impact op de resultaten.

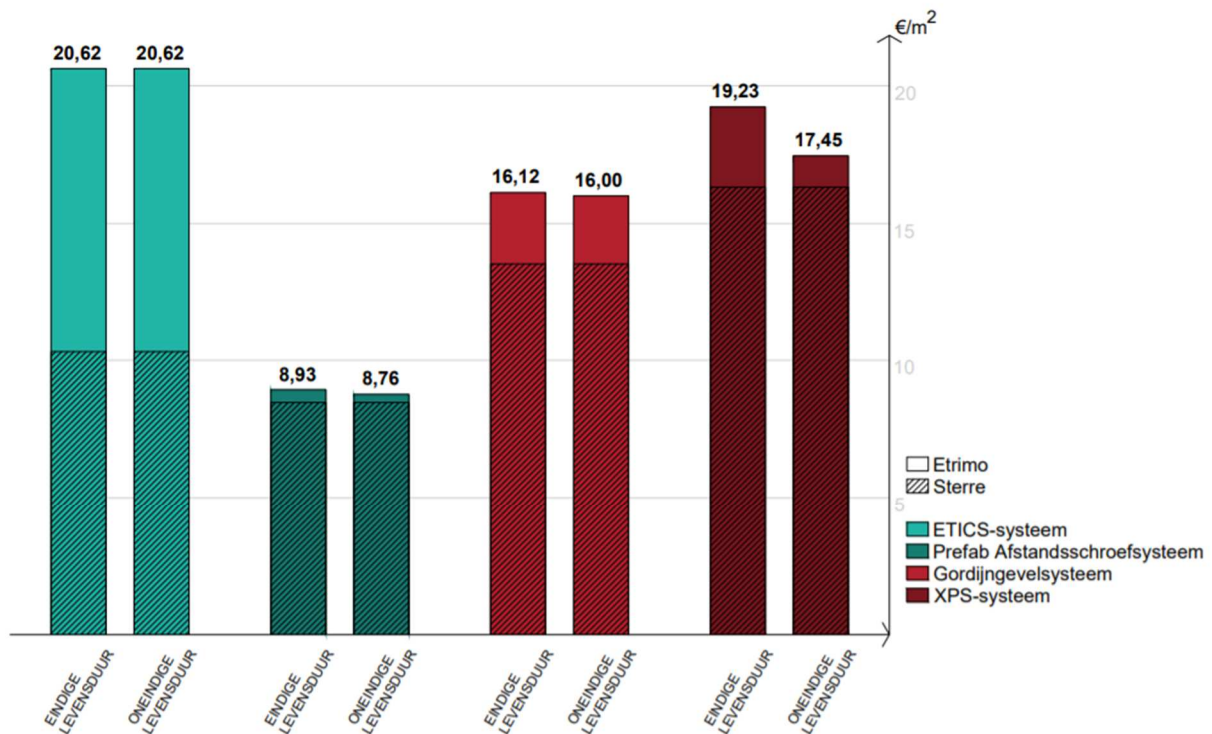


Figuur 88: Gevoeligheidsanalyse einde levenskosten bij herbruikbare materialen

## LEVENSDUREN

Een tweede gevoeligheidsanalyse onderzocht de invloed van levensduren op de totale milieukost van dit scenario. In dit onderzoek werd al vaak aangehaald dat de levensduren een impact hebben op de theoretische bepalingen van hergebruik van materialen, maar dat deze moeilijk vast te leggen zijn. In Figuur 89 wordt onderzocht wat de invloed is van deze levensduren op de resultaten van het tweede scenario. Er werden twee situaties vergeleken: (1) de materialen hebben een eindige, bepaalde technische levensduur en (2) de materialen hebben een oneindige en onbepaalde levensduur. Bij deze tweede optie kregen enkel materialen die beschadigd worden of praktische niet herbruikbaar zijn na demontage een einde levensduurkosten toegekend.

De twee situaties zorgen voor licht verschillende, maar vergelijkbare resultaten aangezien de technische levensduur in alle systemen een vergelijkbare invloed heeft. Vooral bij het XPS-systeem is het verschil beduidend, omdat de meeste materialen in dit systeem een levensduur hebben van ongeveer 60 jaar. Er kan geconcludeerd worden dat de technische levensduur voornamelijk invloed heeft op absolute en minder op relatieve resultaten zoals deze in dit onderzoek.



Figuur 89: Gevoeligheidsanalyse invloed levensduren

## 6.3 CONCLUSIE

### ETICS

Het ETICS-systeem heeft op vlak van technische levensduur een correcte opbouw: de levensduren van de materialen lopen op van buiten naar binnen toe. Ook hebben alle materialen een technische levensduur minimaal gelijk aan 60 jaar (de duur van de scenario's), behalve het pleisterwerk. Deze heeft een relatief korte levensduur van 30 jaar, waardoor een vervanging noodzakelijk is. De milieukost voor productie in beide scenario's is minimaal, maar verdubbelt of verviervoudigt in de loop van respectievelijk scenario 1 en 2. Dit is te wijten aan de ontbrekende mogelijkheid van hergebruik en hoge milieukosten voor einde leven als gevolg van vervuilde materiaalstromen. De milieukost na het eerste scenario is 11,17 euro per vierkante meter en na het tweede 20,62. De milieukosten van scenario 1 is, door de vernieuwing van de pleister, net groter dan de helft van scenario 2. De EPS-platen en het pleisterwerk op zich hebben potentieel voor recyclage, maar door de gelijmde bevestiging is het moeilijk zuivere afvalstromen te creëren.

### XPS

Het XPS-systeem bestaat volledig uit materialen met een technische levensduur groter dan 60 jaar, behalve de Rockpanel gevelafwerking die een levensduur heeft van 50 jaar. De milieukost van dit systeem in het eerste scenario resulteert in 18,10 euro per vierkante meter. Dit systeem heeft vergeleken met de andere systemen de hoogste milieukost voor scenario 1 en productiefase in beide scenario's. Dit is voornamelijk te wijten aan het gebruik van aluminium en XPS. Ook de einde levensbehandeling van deze materialen zorgen voor een relatief grote milieukost. Hergebruik van dit systeem zorgt echter voor een beperkte milieukost: enkel de isolatie- en PE-pluggen kunnen niet hergebruikt worden, beide materialen zorgen voor een kleine bijkomende milieukost. De milieukosten voor hergebruik van het XPS-systeem in het tweede scenario zijn gelijk aan 6 % van de totale milieukost. Hierdoor resulteert het tweede scenario in een milieukost van 19,23 euro per vierkante meter, op de ETICS na de hoogste milieukost bij scenario 2. Zowel aluminium, Rockpanel als EPS bezitten deels een gerecycleerde inhoud. Aluminium kan na (her)gebruik, wanneer de technische levensduur bereikt is, in grote mate gerecycleerd worden. Ook Rockpanel en XPS hebben potentieel voor recyclage, maar dit komt momenteel nauwelijks voor.

### PREFAB AFSTANDSSCHROEF

Het prefab afstandsschroefstelsel bestaat uit materialen met een lange technische levensduur zoals rotswol en hout. Alleen de houtvezelplaat die zich onder het lattenwerk bevindt heeft een beperktere levensduur van 50 jaar. De milieukosten van het eerste scenario zijn 8,64 euro per vierkante meter, wat vergeleken met de andere systemen de laagste totale milieukost is van scenario 1. De milieukost voor productie is relatief laag en ook de bijkomende kosten in de loop van de scenario's blijven beperkt. Dit is te wijten aan het gebruik van materialen die een lange technische levensduur en een beperkte milieukost voor einde leven bezitten. De milieukosten voor hergebruik binnen scenario 2 bestaan uit 3 % van de totale milieukost. In dit systeem kunnen enkel de PE-pluggen in de draagmuur niet hergebruikt worden, wat een minimale milieukost veroorzaakt. Daarbovenop zorgen prefab panelen voor verminderde milieukosten bij hergebruik door eenvoudigere (de)montage. Een gevoeligheidsanalyse toonde aan dat het prefab karakter van dit systeem in het tweede scenario zorgt voor een besparing in milieukost van 6 %. Zo resulteert het tweede scenario in een minimale

milieukost van 8,93 euro per vierkante meter, nauwelijks hoger dan deze van het eerste scenario en opnieuw de laagste van alle systemen. In beide scenario's behaalde dit systeem de kleinste milieukost en toonde zo dat circulaire systemen ook met een minimale milieukost gerealiseerd kunnen worden. Het houten lattenwerk en de houtvezelplaten worden momenteel deels gerecycleerd en rotswol en de houtvezelplaten bevatten gerecycleerde inhoud.

### GORDIJNGEVELSYSTEEM

Een groot aandeel materialen in het gordijngesysteem bezit een lange technische levensduur: rotswol, houten latten werk en aluminium hebben een levensduur langer dan 60 jaar. Enkel de Rockpanel gevelafwerking heeft een kortere technische levensduur (50 jaar). De milieukost voor productie is relatief hoog en neemt beperkt toe in de loop van het eerste scenario. De hoge milieukost voor productiefase is onder andere te wijten aan het gebruik van aluminium klemlijsten: een houten klemlijst zou deze milieukosten kunnen reduceren. De totale milieukost van dit scenario is 13,62 euro per vierkante meter, wat de tweede hoogste is vergeleken met de andere systemen. In dit systeem kunnen, bovenop de PE-pluggen, ook de rubbers niet hergebruikt worden. Deze hebben een relatief hoge milieukost voor productie en einde levensbehandeling. Hierdoor heeft dit systeem de grootste milieukosten voor hergebruik binnen de circulaire systemen: 16 % van de totale milieukosten (van scenario 2), bijna uitsluitend bepaald door de rubbers. Herbruikbare rubbers zouden hier een optimalisatie vormen en kunnen de milieukost voor hergebruik in het tweede scenario 12 % reduceren. De milieukosten van het tweede scenario resulteren in 16,11 euro per vierkante meter, de op één na beste. Het houten lattenwerk, de rubbers en aluminium worden momenteel deels gerecycleerd. De Rockpanel, rotswol, rubbers en aluminium bevatten gerecycleerde inhoud. Alle materialen in dit systeem bieden bijgevolg opportuniteiten bij recycling.

In hoofdstuk 2 werden, op basis van literatuur en potentieel voor circulariteit, vier gevel(renovatie)systemen geselecteerd en vervolgens geanalyseerd aan de hand van milieukost. Zo werd geopteerd voor een ETICS, gesloten en open houtskeletpaneel, sandwichpaneel en gordijngevelsysteem. De milieukosten voor de gevelrenovatiesystemen werden bepaald en vergeleken aan de hand van een levenscyclusanalyse in TOTEM. Het ETICS-systeem bevat onder andere door een beperkt aantal materiaallagen de laagste milieukost. De houtskeletsystemen volgen op de voet waarbij de open variant net beter scoort dan de gesloten. Het sandwichpaneel en de gordijngevel zitten in een geheel andere categorie met een aanzienlijk hogere milieukost. Uit deze analyse werd duidelijk dat een milieukosten alleen niet volstaan om circulariteit van gevelrenovatiesystemen te beoordelen.

Vervolgens werden de geanalyseerde systemen in hoofdstuk 3 beoordeeld op vlak van circulariteit via de bestaande methode: 'Circulaire beoordelingsmethode voor gevelsystemen' (Van Gulk, Leenknecht, & Debusseré, 2020). Deze methode werd in het kader van deze masterproef op punt gesteld: een parameter expertise (die onder andere de haalbaarheid van de systemen in rekening brengt) werd toegevoegd en de berekeningswijze aangepast. Uit de circulariteitsbeoordeling werd duidelijk dat het open houtskeletpaneel het meest circulaire systeem is, met op een tweede plaats de gordijngevel, gevolgd door het gesloten houtskeletpaneel. Het sandwichpaneel komt op de voorlaatste plaats en het ETICS-systeem behaalt, ondanks de minimale milieukost, de hoogste score. Gebaseerd op deze resultaten werd onderzocht wat de voornaamste sterktes en zwaktes zijn van deze systemen. Hieruit werden enkele circulaire principes zoals efficiënt materiaalgebruik, omkeerbare verbindingen, hoog 'plug and play' gehalte etc. herkend.

Deze principes, gecombineerd en aangevuld met nieuwe ideeën, werden in hoofdstuk 4 vertaald in eigen, circulaire gevelrenovatiesystemen. Dit ontwerpend onderzoek werd opgedeeld in drie categorieën: varianten op houtskeletbouw, ETICS en vliesgevels. De varianten op houtskeletbouw stellen een zoektocht voor naar een minimum aan materiaal en een efficiënt materiaalgebruik. Dit resulteert in het prefab en in situ afstandsschroefstelsel, beiden gebruiken afstandsschroeven en respectievelijk een houtvezelplaat of regenscherm als waterbarrière. De tweede categorie, varianten op ETICS, stelt eveneens een zoektocht naar efficiënt materiaalgebruik voor maar realiseert dit met harde isolatieplaten gefixeerd met isolatiepluggen. Dit resulteert in het XPS-systeem, waar de XPS-isolatie ook zorgt voor de waterbarrière, en het noppenplaatstelsel, waar de gevelafwerking bestaat uit waterdichtingsfolies die in een noppenplaat geklemd worden. De laatste categorie, varianten op vliesgevels, streeft naar eenvoudig demonteerbare, lucht- en waterdichte verbindingen en resulteert in drie systemen. Het elementgevelverbinding- en semi-structurele verlijmingssysteem passen deze verbindingmethode toe bij geprefabriceerde houtskeletpanelen. Het gordijngevelsysteem daarentegen klemt enkel de gevelafwerking in en streeft zo naar een minimum aan materialen. In dit ontwerpend onderzoek werd echter geen rekening gehouden met kostenanalyses. Bijkomend onderzoek dat circulaire systemen analyseert en de kostprijs mee in rekening brengt zou een volgende stap kunnen vormen. Ook werden deze systemen ontwikkeld voor de specifieke randvoorwaarden bij (middel)hoogbouw: een gelijkaardige oefening kan opgesteld worden om gevelrenovatiesystemen voor industriële of kleinere (residentiele) gebouwen te ontwikkelen.

Uit iedere categorie werd één gevelrenovatiesysteem geselecteerd om verder te onderzoeken op vlak van circulariteit. Zo werden het XPS-, prefab afstandsschroef-, gordijngewel- en het ETICS-systeem (als referentie) vergeleken. Binnen de concrete randvoorwaarden van twee vooropgestelde, fictieve scenario's werden de gevelrenovatiesystemen kwalitatief getoetst aan de parameters uit de eerder toegepaste circulariteitsbeoordelingsmethode. In het eerste scenario wordt het systeem op de Sterre S4 geplaatst voor 60 jaar, in het tweede scenario wordt het na 30 jaar verplaatst naar de Etrimo woontoren. In hoofdstuk 5 lag de focus op een praktische uitwerking van de systemen en kwamen de parameters expertise, componentafhankelijkheid, laagafhankelijkheid en flexibiliteit voor hergebruik aan bod. In hoofdstuk 6 werd een levenscyclusanalyse van de scenario's via SimaPro uitgevoerd. Op die manier kwam de aandacht op de materiaaleigenschappen en de circulariteitsparameters; milieukost, recyclage en verwachte levensduur.

De expertise kwam voornamelijk aan bod bij (de)montage. Door het gebruik van een pleisterlaag is deze relatief hoog bij het ETICS-systeem. Bij de gordijngewel zorgt het inklemmingsprincipe ook voor een hoog benodigde expertise. Voor het XPS- en prefab afstandsschroefstelsel ligt de expertise relatief laag en wordt deze bepaald door respectievelijk de aluminium rail en voegen tussen de prefab panelen onderling. Ook werd duidelijk dat prefabricatie een reductie van de benodigde expertise teweeg kan brengen.

Door een lokaal schadegeval praktisch uit te werken, werden vervolgens de component- en laagafhankelijkheid van de systemen onderzocht. Op vlak van componentafhankelijkheid doen er zich voornamelijk problemen voor bij de ETICS, waar de pleisterlaag ononderbroken uitgevoerd is. Bij het prefab afstandsschroefstelsel, zorgt de tand en groef-aansluiting van de houtvezelplaten voor afhankelijke, maar demonteerbare componenten. Het XPS- en gordijngewelsysteem bestaan uit onafhankelijke componenten. Uit deze analyse werd duidelijk dat de componentafhankelijkheid veelal bepaald wordt door de aansluitingen in de waterdichtingslaag.

Het ETICS-systeem heeft een grote laagafhankelijkheid doordat de verschillende lagen onderling en op de draagstructuur verlijmd zijn. Het prefab afstandsschroef- en gordijngewelsysteem bestaan volledig uit demonteerbare verbindingen via schroeven en inklemmingen, wat zorgt voor onafhankelijke lagen. Het XPS-systeem bevindt zich tussen deze twee extremen in, met een beperkte afhankelijkheid van de lagen onderling door het gebruik van isolatiepluggen. De laagafhankelijkheid wordt bepaald door het type verbindingen tussen de verschillende lagen.

De flexibiliteit voor hergebruik kwam aan bod door de systemen van de Sterre S4 op de Etrimo woontoren toe te passen. Bij het ETICS-systeem is er geen sprake van hergebruik aangezien demontage zonder beschadiging niet mogelijk is. Bij het XPS-systeem kunnen de isolatiepluggen niet hergebruikt worden, omdat deze bij demontage eveneens beschadigd worden. Een optimalisatie bestaande uit demonteerbare isolatiepluggen zou hier het hergebruikpotentieel en de laagafhankelijkheid ten goede komen. De inklemmingsverbinding van het gordijngewelsysteem verzekert demontage met minimale beschadiging. Enkel de rubbers (gebruikt bij de inklemming) kunnen niet hergebruikt kunnen worden. Een gevoeligheidsanalyse toonde aan dat een optimalisatie bestaande uit herbruikbare rubbers kan zorgen voor een aanzienlijke reductie van de milieukost. Bij het prefab afstandsschroefstelsel kunnen zo goed als alle materialen hergebruikt worden. De combinatie van prefab panelen met een vaste maatvoering en in situ aanvullingen maakt het mogelijk om het prefab afstandsschroefstelsel toe te passen op een ander gebouw. Aangezien de flexibiliteit voor hergebruik wordt onderzocht aan de hand van één verplaatsing van het systeem kan dit een

vertekend beeld geven. Dit zou een aanleiding kunnen zijn voor verder onderzoek met meerdere casestudies, verplaatsing etc.

Voor het eerste scenario (60 jaar op de Sterre S4) was de totale milieukost het hoogste bij het XPS-systeem en het laagste bij het prefab afstandsschroefstelsel. Hoewel het ETICS-systeem de laagste milieukost heeft voor productie, werd deze groter dan die van het prefab afstandsschroefstelsel in de loop van het scenario. Dit komt voornamelijk door de hoge milieukosten voor einde levensbehandeling als gevolg van vervuilde materiaalstromen. Het ETICS-systeem behaalt zelfs de hoogste milieukost in het tweede scenario (30 jaar op Sterre S4 en 30 jaar op Etrimo), aangezien hergebruik hier niet mogelijk is, in tegenstelling tot de andere systemen. De milieukost voor het prefab afstandsschroefstelsel is in dit scenario bijzonder laag en stijgt amper na de productiefase. Een gevoeligheidsanalyse toonde aan dat het prefab karakter zorgt voor een besparing van 6 % op de totale milieukost voor dit scenario. In beide scenario's behaalde het prefab afstandsschroefstelsel de kleinste milieukost en toonde zo dat ook circulaire systemen met een minimale milieukost gerealiseerd kunnen worden. Het XPS- en gordijngelvelsysteem hebben in het tweede scenario een aanzienlijke milieukost voor productie en lopen beperkt op naar het einde van het scenario toe. Circulaire systemen investeren over het algemeen meer in milieukosten bij de productiefase, maar resulteren daardoor in beperkte milieukosten in de loop van het (her)gebruik.

In dit onderzoek werd vanuit gegaan dat materialen die demonteerbaar verbonden zijn en voldoende resterende levensduur hebben herbruikbaar kunnen zijn. Echter is deze aanname zeer beperkend en zijn er meerdere factoren die hier een belangrijke rol in spelen. Bovendien is het bepalen van de technische levensduur van materialen niet eenvoudig. Bronnen geven verschillende waarden die algemeen bepaald werden en vaak niet overeenstemmen met praktijkervaringen. Hier zou gedetailleerd onderzoek dat de technische levensduren van materialen in specifieke omstandigheden (blootstelling, toepassing etc.) analyseert een bijdrage leveren. Met behulp van een gevoeligheidsanalyse werd de invloed van de levensduren op de resultaten van het tweede scenario onderzocht. Hieruit bleek dat deze een invloed hebben op de absolute milieukost maar aangezien verschillende materialen in meerdere systemen gebruikt worden heeft het echter geen invloed op de rangschikking van de systemen onderling.

Recyclage is een laatste manier om materialen (deels) in de kringloop te houden. Het ETICS-systeem heeft beperkte mogelijkheden tot recyclage doordat de materiaalstromen moeilijk te scheiden zijn. In het prefab afstandsschroef- en gordijngelvelsysteem worden momenteel voornamelijk materialen gebruikt die (deels) gerecycleerd worden. Veel materialen zoals rotswol, Rockpanel, rubbers en XPS zijn volgens de producenten echter volledig of grotendeels recycleerbaar, maar worden momenteel niet gerecycleerd.

Door de parameters uit de circulariteitsbeoordeling binnen de randvoorwaarden van een concreet scenario kwalitatief te onderzoeken, wordt kritisch gereflecteerd op de initiële circulariteitsbeoordelingsmethode. De waarde van de toegevoegde parameter expertise en aanpassingen in berekeningswijze werd duidelijk in de scenario's. De expertise parameter brengt namelijk in rekening dat haalbare systemen een belangrijke rol spelen in het verwezenlijken van hergebruik. Echter kan de opvatting van de parameter componentafhankelijkheid in vraag gesteld worden, een hoge componentafhankelijkheid bleek voornamelijk beperkend bij een lokaal schadegeval. Demonteerbare verbindingen tussen componenten zijn essentieel om hergebruik mogelijk te maken en vormen een opportuniteit bij een lokale vervanging. Deze vervangingen faciliteren is echter geen noodzakelijke voorwaarde om circulariteit te verzekeren.

In deze masterproef wordt circulariteit bij gevelrenovatiesystemen herdefinieerd als het maximaliseren van (toekomstig) hergebruik van bouwmaterialen. Hiervoor is het van essentieel belang robuuste materialen met een maximale levensduur, demonteerbaar met minimale beschadiging, efficiënt in te zetten. Dit resulteert veelal in gevelsystemen die tijdens productiefase in deze aspecten investeren en deze investering terugwinnen bij hergebruik. Er wordt gestreefd naar een optimum tussen een minimale impact op het milieu en een maximaal hergebruikpotentieel.



## BIJLAGE 1: TECHNISCHE LEVENSDUREN VAN MATERIALEN

In onderstaande tabel zijn de levensduren terug te vinden van materialen die doorheen het onderzoek aan bod kwamen. Deze zijn gebaseerd op verscheidene bronnen (TOTEM, 2021; OVAM, 2018; NIBE, 2021) en aangevuld door kritische reflectie en praktijkervaring.

<i>Materiaal</i>	<i>Levensduur (jaar)</i>
<i>XPS-isolatie</i>	63
<i>Rotswol isolatie</i>	75
<i>PUR-isolatie</i>	63
<i>Cellulose isolatie (ingeblazen)</i>	30
<i>FJI-liggers</i>	71
<i>Aluminium structuur</i>	75
<i>Aluminium klemprofiel</i>	75
<i>Houten lattenwerk (naaldhout – behandeld)</i>	75
<i>Waterdichte houtvezelplaat</i>	50
<i>‘Vapourblock’ luchtdichte spaanplaat</i>	50
<i>Regenscherm ‘Delta Fassada’</i>	40
<i>Noppenplaat PS</i>	60
<i>Rockpanel gevelafwerking</i>	50
<i>Equitone gevelafwerking (vezelcement)</i>	60
<i>‘Dekton’ gevelafwerking (keramisch)</i>	70
<i>Grondpleister</i>	30
<i>Wapening (pleister)</i>	30
<i>Afwerkingspleister</i>	30
<i>Isolatiepluggen PE</i>	60
<i>Plug PE</i>	60
<i>Afstandsblokje PE</i>	60
<i>Glassteunen PE</i>	60
<i>Schroeven (verzinkt staal)</i>	100
<i>Schroeven (inox)</i>	100
<i>Afstandsschroeven (verzinkt staal)</i>	100
<i>Rubbers</i>	>60
<i>Lijm</i>	>60

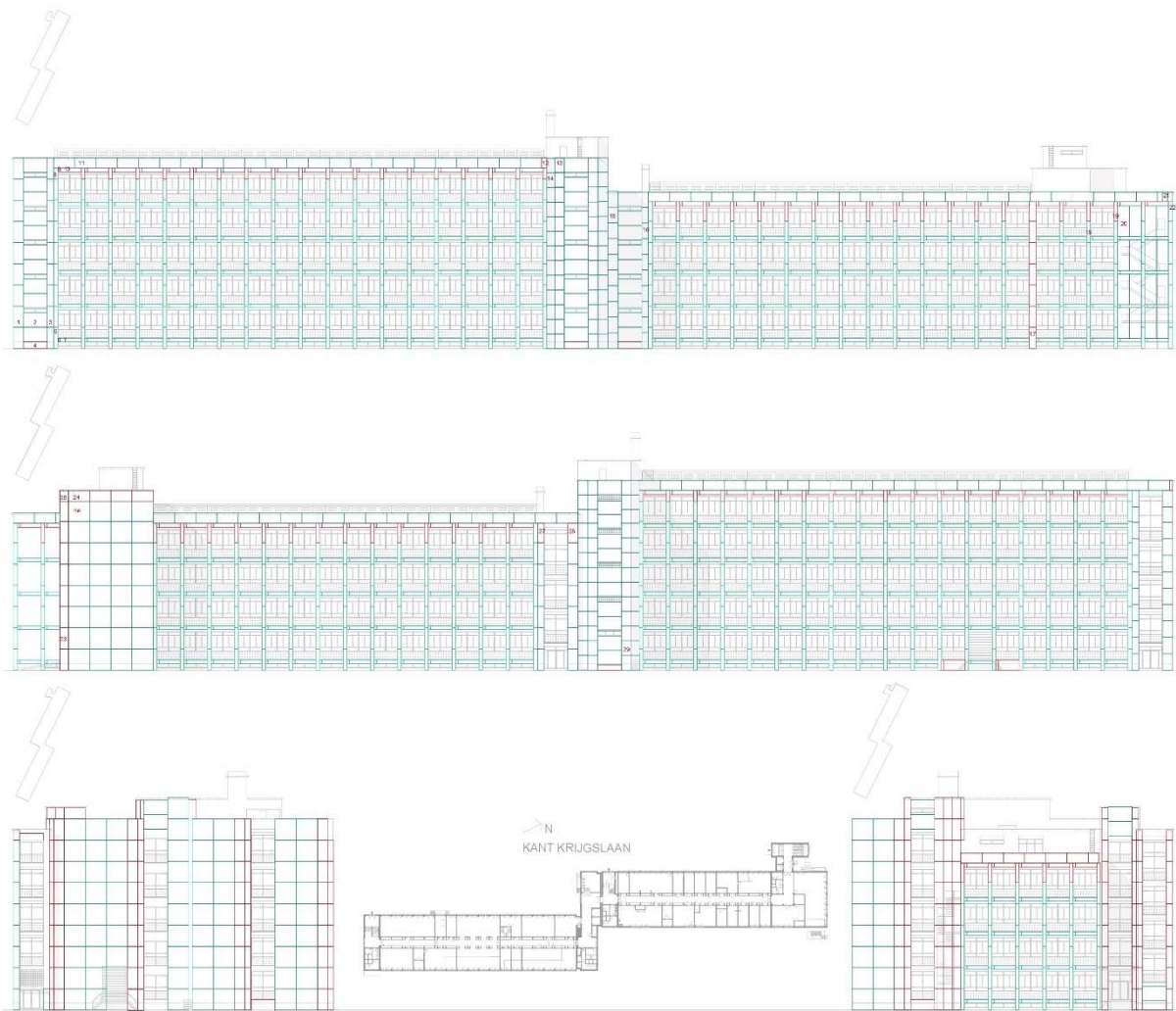
## BIJLAGE 2: OVERZICHT MATERIALEN IN SIMAPRO

<i>Materiaal</i>	<i>Materiaal SimaPro</i>
<i>XPS</i>	Polystyrene, extruded {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>EPS</i>	Polystyrene foam slab {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Rotswol</i>	Stone wool {GLO}  market for stone wool   Cut-off, S
<i>Rockpanel</i>	Stone wool, packed {GLO}  market for stone wool, packed   Cut-off, S
<i>Vezelcementplaat</i>	Fibre cement facing tile {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Lattenwerk vurenhout</i>	Sawnwood, lath, softwood, dried ( $u=10\%$ ), planed {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Houtvezelplaat</i>	Fibreboard, soft, without adhesives {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Schroeven inox</i>	Steel, unalloyed {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Schroeven verzinkt staal</i>	Steel, chromium steel 18/8 {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Aluminium</i>	Aluminium, wrought alloy {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Rubbers</i>	Synthetic rubber {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>PE</i>	Polyethylene, low density, granulate {GLO}  market for   Cut off, S
<i>Regenscherm</i>	Fibre, polyester {GLO}  market for fibre, polyester   Cut-off, S
<i>Lijm isolatieplaten</i>	Adhesive mortar {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Grondpleister</i>	Base plaster {GLO}  market for   Cut-off, S
<i>Wapening pleister</i>	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}  production
<i>Afwerkingspleister</i>	Cover plaster, mineral {GLO}  market for   Cut-off, S

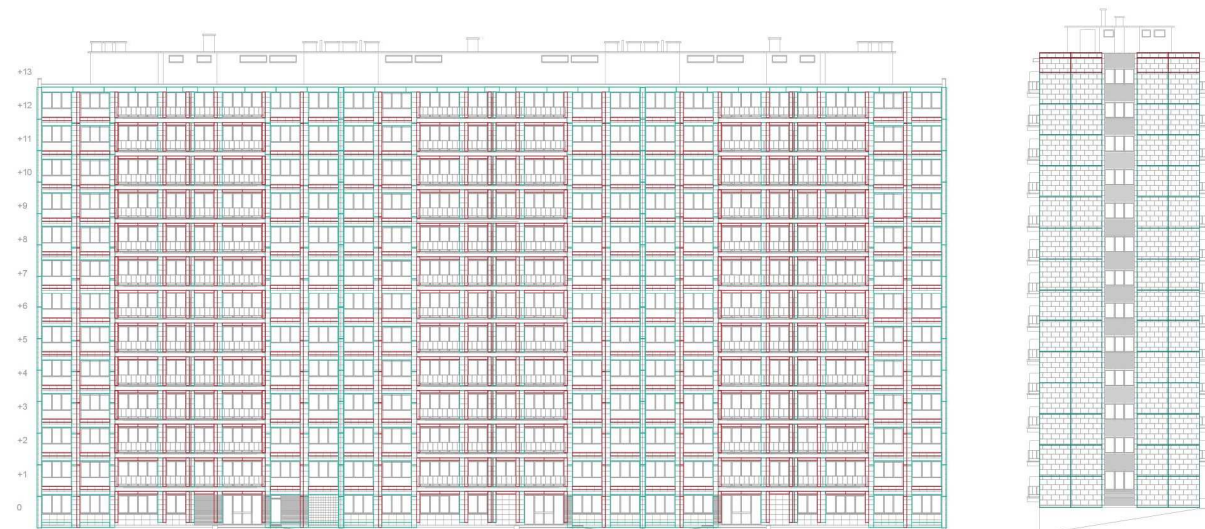
### BIJLAGE 3: OVERZICHT EINDE LEVENSBEHANDELING MATERIALEN IN SIMAPRO

<i>Materiaal</i>	<i>Eindelevensduurbehandeling Simapro</i>
<i>XPS</i>	Waste polystyrene {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
<i>EPS</i>	Waste expanded polystyrene (Row) treatment of municipal incineration
<i>Rotswol</i>	Waste mineral wool for final disposal (Row) treatment of, inert landfill
<i>Rockpanel</i>	Waste mineral wool {RoW}  treatment of, collection for final disposal
<i>Gevelcementplaat</i>	Inert waste for final disposal (CH), inert material landfill
<i>Lattenwerk vurenhout</i>	Waste building wood, untreated (Row), treatment of municipal incineration
<i>FJI-liggers - Vurenhout</i>	Waste building wood, untreated (Row), treatment of municipal incineration
<i>FJI-liggers - OSB</i>	Waste wood, untreated {RoW}  treatment of, untreated, municipal incineration
<i>Gebitumineerde vezelplaat</i>	Waste wood, untreated {RoW}  treatment of, untreated, municipal incineration
<i>Luchtdichte spaanplaat</i>	Waste wood, untreated {RoW}  treatment of, untreated, municipal incineration
<i>Rubbers</i>	Municipal solid waste {BE}  treatment of, incineration   Cut-off, S
<i>PE</i>	Waste polyethylene {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, S
<i>Lijm isolatieplaten</i>	Municipal solid waste {BE}  treatment of, incineration   Cut-off, S
<i>Grondpleister</i>	Municipal solid waste {BE}  treatment of, incineration   Cut-off, S
<i>Wapening pleister</i>	Municipal solid waste {BE}  treatment of, incineration   Cut-off, S
<i>Afwerkingspleister</i>	Municipal solid waste {BE}  treatment of, incineration   Cut-off, S

### BIJLAGE 3: PANEELVERDELING PREFABPANELEN STERRE- EN ETRIMOGEVELS



Figuur 90: Prefab afstandsschroefstelsel, paneelverdeling gevel Sterre



Achtergevel

Zijgevel rechts



Figuur 91: Prefab afstandsschroefstelsel, paneelverdeling gevel Etrimo

- Accurate Insulation.* (2018). Opgehaald van <https://www.accurateinsulation.com/blog/how-much-does-cellulose-insulation-settle/#:~:text=Cellulose%20insulation%20can%20settle%20by,and%20the%20insulation%20beneath%20it>.
- AGION.* (2021). Opgehaald van <https://www.agion.be/richtwaarden>
- Albaconcepts.* (2019). *Een meetmethode voor losmaakbaarheid.* Eindhoven: Alba Concepts.
- Allacker, K., & Debacker, W.* (2020). *Environmental profile of building elements.* OVAM.
- Allacker, K., Debacker, W., & Delem, L.* (2011). *Bepalingsmethode van milieugerelateerde materiaalprestatie van gebouwen.* OVAM. Opgehaald van [file:///C:/Users/katri/Downloads/ovor120530\\_Bepalingsmethode-MMG\\_status-november-2011.pdf](file:///C:/Users/katri/Downloads/ovor120530_Bepalingsmethode-MMG_status-november-2011.pdf)
- BAMB.* (2021). Opgehaald van *Circular Retrofit Lab*: <https://www.bamb2020.eu/topics/pilot-cases-in-bamb/retrofit-lab/>
- Betopor isolatie.* (2021). Opgehaald van <https://www.betopor.com/nl/eps-recyclage>
- Brand, S.* (1994). *How buildings learn: what happens after they're built.* Penguin Books.
- Brandpreventie.* (2019). *WTCB Contact*, 16-19.
- Brandpreventie, A. D.-D.* (2016). *Koninklijk besluit 7 december 2016 Basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing nieuwe gebouwen.* ibz.
- BuildingTalk.* (2015, September 15). Opgehaald van <https://www.buildingtalk.com/newton-adds-unique-slotted-insulation-board-to-cavity-drainage-system/>
- Cambier, C. E.* (2019). *Bouwen voor een circulaire economie.* Brussel: VUB.
- Celit.* (2021). *Technische fiche isolerende onderdakplaten.*
- Craipeau, M.* (2019). *BIR.* Opgehaald van *Tyres and rubber*: <https://www.bir.org/the-industry/tyres-rubber>
- De Groot en Visser.* (2021). Opgehaald van <https://www.degrootenvisser.nl/nieuws/de-voordelen-van-een-elementgevel/>
- Dekton.* (2021). *Productiefiche.*
- Delta.* (2021). Opgehaald van <https://www.doerken.com/be-nl/producten/gevel/delta-fassade-20.php>
- Deweerd, M., & Mertens, M.* (2020). *A guide for identifying the reuse potential of construction products.*
- Dialoog.* (2020). Opgehaald van *Huis afbreken is een ecologische misdaad*: <https://www.dialoog.be/tijdschrift/archief/archief-groene-gedachten/huis-afbreken-is-ecologische-misdaad/>

- Dirkx, I. (2010, 11 23). *w tcb.be - geveldag - etics*. Opgehaald van [wtcb.be](https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?lang=nl&dtype=agenda&doc=2010_11_23_Geveldag_ETICS.pdf):  
[https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?lang=nl&dtype=agenda&doc=2010\\_11\\_23\\_Geveldag\\_ETICS.pdf](https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?lang=nl&dtype=agenda&doc=2010_11_23_Geveldag_ETICS.pdf)
- Dubois, S., Remy, O., & de Bouw, M. (2016). *Retrofitting with AIM-ES*. WTCB.
- Dubois, S., Remy, O., de Bouw, M., & Vanhellemont, Y. (2019). *Geprefabriceerde multifunctionele gevelsystemen*. Brussel: WTCB.
- Durelis. (2016, 01 13). *Durelis Vapourblock*. Opgehaald van [file:///D:/Downloads/Datasheet\\_Durelis-Vapourblock\\_NL%20\(2\).pdf](file:///D:/Downloads/Datasheet_Durelis-Vapourblock_NL%20(2).pdf)
- Durmisevic, E., Beurskens, P. R., Adrosevic, R., & Westerdijk, R. (2017). *Systemic view on reuse potential of building elements, components and systems: comprehensive framework for assessing reuse potential of building elements*. Hiser International Conference, (p. 6). Delft, Netherlands.
- Earth overshoot day. (2020). Opgehaald van <https://www.overshootday.org/newsroom/country-overshoot-days/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). Opgehaald van *Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition*:  
[https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE\\_Ellen-MacArthur-Foundation\\_9-Dec-2015.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf)
- Emis. (2021). Opgehaald van *Materiaalrecyclage: rubber*:  
[https://afss.emis.vito.be/techniek/materiaalrecyclage-rubber#group\\_process\\_description](https://afss.emis.vito.be/techniek/materiaalrecyclage-rubber#group_process_description)
- Energiesparen. (2021). Opgehaald van *Luchtdichtheid*: <https://www.energiesparen.be/bouwen-en-verbouwen/epb-pedia/gebouw/luchtdichtheid/impact-op-het-resultaat?language=nl>
- Energiesparen. (2021). Opgehaald van *Renovatiepact*: <https://www.energiesparen.be/vlaamse-langetermijnrenovatiestrategie-voor-gebouwen-2050>
- Energiesparen. (2021). Opgehaald van *EPB eisen per aanvraagjaar*:  
<https://www.energiesparen.be/EPB-pedia/eisen-per-aanvraagjaar>
- EPD. (2021). Opgehaald van [https://www.environdec.com/library/\\_?Epd=18495](https://www.environdec.com/library/_?Epd=18495)
- Epsindustry. (2021). Opgehaald van <https://www.epsindustry.org/packaging/recycled-content-eps#:~:text=Expanded%20polystyrene%20building%20products%20can, reintroduced%20into%20the%20molding%20process.>
- Equitone. (2021). Opgehaald van <https://www.equitone.com/nl-nl/gevelpanelen/equitone-natura/>
- Etanco. (2021). Opgehaald van <https://www.etanco.be/index.html>
- EU. (2010). *Housing statistics in the European Union*.
- Eurabo. (2021). Opgehaald van <https://www.eurabo.be/nl>
- European aluminium. (2016, mei 25). Opgehaald van *Recycled content*: <https://www.european-aluminium.eu/media/1644/recycled-content-vs-end-of-life-recycling-rate-may-2016.pdf>
- Fassada. (2021). Opgehaald van <https://www.fassada.com/>

- Fisher. (2021). *Insulation fixing loads*.
- FOD. (2016). *Koninklijk Besluit basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing nieuwe gebouwen*.
- Fotopoulou, A., Semprini, G., Cattani, E. (2018). *Deep renovation in existing residential buildings through façade additions: A case study in a typical residential building of the 70s. Energy and buildings*.
- Galle, W. (2019). *Bouwen voor een circulaire economie*. VUB.
- Gids duurzame gebouwen. (2021). Opgehaald van TOTEM: <https://www.guidebatimentdurable.brussels/nl/methodologiek.html?IDC=10395>
- Gregoire, Y., Dirx, I., Smits, A. (2016). *Bepreparaties op buitenisolatie (ETICS)*. WTCB.
- Habemo. (2021). Opgehaald van <https://www.habemo.be/nl/diensten/dak/dakdichting/>
- Henz, O. (2011). PIXII. Opgehaald van *Houtskeletbouw: platform- of balloonmethode*: <https://pixii.be/ontdek/kennis/houtskeletbouw-platform-balloonmethode>
- Himpe, E. (2012). *Life cycle energy use of a zero-energy house. Innovation for sustainable production*, (pp. 6-10).
- Hotta, Y., Visvanathan, C., & Kojima, M. (2016). *Recycling rate and target setting: challenges for standardized measurement. Journal of Material Cycles and Waste Management*.
- Houtinfo. (2021). Opgehaald van <http://www.houtinfo.be/wp-content/uploads/28149%20-%20Classificatietabel%20brandreactie%20van%20houten%20plaatmaterialen.pdf>
- idm. (2021). Opgehaald van *gips en pleisterwerk*: <https://www.idm.be/gips-en-pleisterwerk>
- Ik BENOveer. (2017, januari). Opgehaald van *Vlaams energieagentschap*: <https://www.energiesparen.be/ikbenoveer>
- Interreg Europe. (2021). Opgehaald van *CESME, Rockwool*: [https://www.interregeurope.eu/fileadmin/user\\_upload/tx\\_tevprojects/library/Rockwool%20\(DK\).pdf](https://www.interregeurope.eu/fileadmin/user_upload/tx_tevprojects/library/Rockwool%20(DK).pdf)
- ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
- Isolatie-info. (2021). Opgehaald van <https://www.isolatie-info.be/isolatieplaten/XPS-isolatieplaten>
- Isoproc. (2021). Opgehaald van <https://www.isoproc.be/nl/solutions/producten/detail/celit-3d/355>
- IVP. (2016, 11 01). *Technisch handboek ETICS*. Opgehaald van [https://www.sto.be/media/documents/brochures/algemeen/TECHNISCH\\_HANDBOEK\\_ETICS\\_NL\\_201.pdf](https://www.sto.be/media/documents/brochures/algemeen/TECHNISCH_HANDBOEK_ETICS_NL_201.pdf)
- Janssens, T. (2019). *Hergebruik van bouwmaterialen: op naar een circulaire mindset. BOUWEN RENOVEREN Bio-ecologisch bouwen*, 45-51.
- Joostdevree. (2010, September). Opgehaald van *Rockpanel*: [https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgr/Rockpanel\\_9\\_handboek\\_www\\_Rockpanel\\_nl.pdf](https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgr/Rockpanel_9_handboek_www_Rockpanel_nl.pdf)



- Kawneer. (2021). Opgehaald van [https://www.kawneer.com/bcs/architectuursystemen/nl/product.asp?prod\\_id=4358](https://www.kawneer.com/bcs/architectuursystemen/nl/product.asp?prod_id=4358)
- kenniskaarten. (2021). Opgehaald van *circulaire economie*: <https://kenniskaarten.hetgroenebrein.nl/kenniskaart-circulaire-economie/circulatie-materialen-circulaire-economie/>
- Khasreen, M., Banfill, F., & Menzies, G. (2019). *Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of buildings: a review*. *Sustainability*.
- Kingspan. (2021). Opgehaald van <https://www.kingspan.com/nl>
- Kingspan. (2021). Opgehaald van <https://www.kingspan.com/blx/nl-be/producten/geisoleerde-daken-gevelsystemen/geisoleerde-sandwichpanelen/kenniscentrum/voordelen-van-sandwichpanelen/wat-zijn-sandwichpanelen>
- Leefmilieu Brussel. (2021). Opgehaald van *Duurzame materialen: hoe kiezen?*: [https://leefmilieu.brussels/sites/default/files/user\\_files/pres\\_20150326\\_mat\\_1\\_4aand\\_nl.pdf](https://leefmilieu.brussels/sites/default/files/user_files/pres_20150326_mat_1_4aand_nl.pdf)
- Leefmilieubrussels. (2018, 03). *Energieontwerp: hoe de verwarmingsbehoefte tot een minimum beperken? (slide 6)*. Opgehaald van <https://leefmilieu.brussels/sites/default/files/pres-180315-rhpe-1-3-bne-nl.pdf>
- LeonardoFix. (2021, 04 14). Opgehaald van *LeonardoFix.be*: <https://leonardofix.be/nl/professional/aluminium-draagstructuren/atk-103-blinde-mechanische-bevestiging>
- Marlite. (2021). Opgehaald van <https://marlite.com/wp-content/uploads/2021/02/LEED-Modules-1.pdf>
- Maroy, K., Decorte, W., Steeman, M., & Van Den Bossche, N. (2017). *Ontwerpgids-PRO3*.
- Mees, C., & Loncour, X. (2015). *TV 255: Luchtdichtheid van gebouwen*. Brussel: WTCB.
- NIBE. (2021). Opgehaald van <https://www.nibe.info/nl/b2b>
- NomaCool. (2021). Opgehaald van <https://www.noma.be/nl/producten/afwerkingprofielen-voor-isolatieplaten>
- OVAM. (2016, December). *24 ontwerprichtlijnen voor veranderingsgericht bouwen*. Opgehaald van [www.ovam.be/veranderingsgerichtbouwen](http://www.ovam.be/veranderingsgerichtbouwen)
- Paduart, A., & Brancart, S. e. (2018). *Alternatief voor traditionele renovatie. Ik ga bouwen en renoveren*.
- Passiefhuis. (2021). Opgehaald van <https://passiefhuismarkt.nl/prefab-bouwen/#:~:text=Voordelen%3A,als%20gevolg%20een%20snellere%20bouwtijd.>
- Pombo, O., Rivela, B., & Neila, J. (2016). *The challenge of sustainable building renovation: assessment of*. *Journal of Cleaner Production*.
- Recitel insulation. (2021). Opgehaald van *Hoe isoleer je akoestisch*: <https://www.recticelinsulation.com/be-nl/hoe-isoleer-je->



- Van Gulk, L., Leenknecht, E., & Debusseré, E. (2020). *Development of a circularity assessment method for facade systems*. Gent: UGent.
- Van Steenkist, J. (2012). *Levensduur van bouwmaterialen voor massiefbouw*. Gent: Ugent.
- Vandenbroucke, M. (2018). *Rapport technische levensduur van gebouwcomponenten*. OVAM.
- Verbouw. (2021). Opgehaald van <https://www.verdouw.nu/Rockpanel-alle-afmetingen-kleuren-en-soorten-op-een-rij#:~:text=Rockpanel%20is%20een%20gevelplaat,hoogwaardige%20anorganische%20steenwolvezels%20van%20Rockwool>.
- Vilches, A., García-Martínez, A., & Sánchez-Montañés, B. (2016, 11 01). *researchgate*. Opgehaald van [https://www.researchgate.net/figure/Building-Assessment-Modules-for-Life-Cycle-Assessment-according-to-EN-158042012-160-72\\_fig3\\_310602382](https://www.researchgate.net/figure/Building-Assessment-Modules-for-Life-Cycle-Assessment-according-to-EN-158042012-160-72_fig3_310602382)
- VitaRecycles. (2021, Februari 17). Opgehaald van *The Recycling Process of Extruded Polystyrene (XPS) – Explained*: <https://www.vitarecycles.com/blog/the-recycling-process-of-extruded-polystyrene-xps-explained/>
- Vlaanderen circulair. (2021). Opgehaald van *Eureca*: <https://bouwen.vlaanderen-circulair.be/nl/projecten/detail/eureca>
- Vlaanderen is wonen. (2021). Opgehaald van <https://www.wonenvlaanderen.be/lexicon/aangepast-aan-de-grootte-van-uw-gezin>
- VloerverwarmingTips. (2021). Opgehaald van <https://vloerverwarmingtips.be/noppenplaat/>
- VMSW. (2020). *Ontwerpleidraad sociale woningbouw*. VMSW.
- Vrijders, A. R. (2018). *Naar een circulaire economie in de bouw*. WTCB.
- Warmteplan. (2021). Opgehaald van <https://www.warmteplan.nl/brandveiligheid-cellulose-isolatie/>
- Wikipedia. (2020, 12 17). *Hydrostatische druk*. Opgehaald van [https://nl.wikipedia.org/wiki/Hydrostatische\\_druk#:~:text=Hydrostatische%20druk%20is%20de%20druk,uitgedrukt%20in%20de%20eenheid%20pascal](https://nl.wikipedia.org/wiki/Hydrostatische_druk#:~:text=Hydrostatische%20druk%20is%20de%20druk,uitgedrukt%20in%20de%20eenheid%20pascal).
- Wille, D. (2017). *Annex: Monetisation of MMG method*. Mechelen: OVAM.
- WTCB. (1994). *Een deklvloer kiezen*. *Digest*, 6. Opgehaald van [https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?lang=nl&dtype=publ&doc=WTCB\\_Digest\\_nr\\_2.pdf](https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?lang=nl&dtype=publ&doc=WTCB_Digest_nr_2.pdf)
- WTCB. (2010, 02). *Ventilatie van gebouwen – Inleidende Infofiche: basisprincipes en rol van de actoren*. Opgehaald van <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infofiches&pag=42&art=1>
- WTCB. (2016). Opgehaald van *Beoordeling van de brandreactie*: [https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=standards\\_regulations&pag=fire&art=standards\\_and\\_regulations&niv01=belgian-european\\_standardization&niv02=passive\\_fire\\_safety&niv03=evaluation\\_reaction\\_to\\_fire](https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=standards_regulations&pag=fire&art=standards_and_regulations&niv01=belgian-european_standardization&niv02=passive_fire_safety&niv03=evaluation_reaction_to_fire)
- WTCB. (2017). *Cluster bouwindsutrie en off-site construction*. Zemst.

WTCB. (2021). *Opgehaald van Houtskeletbouw en luchtdichtheid:*

<https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact33&art=507>

WTCB. (2021). *Opgehaald van Herziening van de norm over borstweringen:*

<https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact52&art=783>